

Titre: L'exergie : une illusion ou une révolution dans l'évaluation des impacts ? Analyse du potentiel de l'exergie comme indicateur thermodynamique de l'impact de l'utilisation des ressources
Title: L'exergie : une illusion ou une révolution dans l'évaluation des impacts ? Analyse du potentiel de l'exergie comme indicateur thermodynamique de l'impact de l'utilisation des ressources

Auteur: Marie Claudette José Louroux
Author: Marie Claudette José Louroux

Date: 2025

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Louroux, M. C. J. (2025). L'exergie : une illusion ou une révolution dans l'évaluation des impacts ? Analyse du potentiel de l'exergie comme indicateur thermodynamique de l'impact de l'utilisation des ressources [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/64551/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/64551/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Guillaume Majeau-Bettez
Advisors:

Programme: Génie chimique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**L'exergie : une illusion ou une révolution dans l'évaluation des impacts ?
Analyse du potentiel de l'exergie comme indicateur thermodynamique de
l'impact de l'utilisation des ressources**

MARIE CLAUDETTE JOSÉ LOURIoux

Département de génie chimique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie chimique

Avril 2025

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**L'exergie : une illusion ou une révolution dans l'évaluation des impacts ?
Analyse du potentiel de l'exergie comme indicateur thermodynamique de
l'impact de l'utilisation des ressources**

présenté par **Marie Claudette José LOURIOUX**
en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Robert LEGROS, président

Guillaume MAJEAU-BETTEZ, membre et directeur de recherche

Natacha GONDTRAN, membre

DÉDICACE

*À mon frère,
Aux enfants que nous sommes.*

*"Négliger les enfants, c'est nous détruire nous-même.
Nous n'exissons dans le présent que dans la mesure
où nous mettons notre foi dans le futur."*

Paul Auster

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont naturellement à mon directeur : Guillaume. Je n'aurais pas pu demander un meilleur superviseur. Tu as joué un rôle essentiel dans mon évolution personnelle, et je te serai éternellement reconnaissante d'avoir éveillé ma curiosité. Dès le début de mon parcours de maîtrise, tu m'as poussée à cultiver un esprit critique et à défendre mes propres opinions, envers et contre (presque) tous. Tu as (inconsciemment ou sciemment, je reste incertaine) fait naître une passion pour la recherche et pour cela, je ne te remercierai jamais assez. Je pense pouvoir affirmer que tu as été bien plus qu'un simple superviseur : tu as souvent assumé le rôle d'ami, et ton altruisme n'a jamais cessé de m'impressionner. Tu m'as offert un espace pour réfléchir, pour développer mon esprit critique, et surtout, tu as nourri ma créativité au lieu de l'étouffer. Merci d'avoir toujours été présent, de m'avoir rassurée lorsque j'en avais besoin au cours de ces deux dernières années, et, je l'espère, dans celles à venir.

Je remercie également Cécile et Jean-Philippe, pour leur contribution à mon article mais aussi pour les échanges et leur aide précieuse. La grande bataille de l'exergie étant très ardue pour une personne...

Merci à mes syndicalistes préférés et amis, Titouan et Nadim. Merci à Titouan, de m'avoir supporté en tant que jeune padawan (à moins que ce ne soit l'inverse !) et pour m'avoir transmis ta curiosité insatiable, ta passion pour le monde qui nous entoure et pour avoir nourri nos débats, parfois interminables. Merci à Nadim, pour ta bienveillance, ton écoute précieuse et ta quiétude dans les moments difficiles. Merci à vous deux d'avoir su m'aider à surmonter mes doutes.

Merci à Julien, pour tes bras toujours ouverts, tes conseils et ta patience. Merci à Han pour m'avoir accueilli au CIRAIQ et d'être chaque jour une personne rayonnante. Merci à Maxime, min biloute. Merci à Elliot, Pénélope, Juliette et Lisa pour les rires et belles conversations. Enfin un immense merci à toutes les autres personnes formant la formidable équipe du CIRAIQ. Vous êtes des collègues respectueux.e.s, ouverts.e.s d'esprit et qui contribuent à créer chaque jour une ambiance de travail bienveillante. Merci pour les discussions, les rires et souvenirs que ce soit au 3333 ou au MC, m'ayant permis de vivre pleinement mon aventure de maîtrise.

Un immense merci à mes ami.e.s au Québec – Maya, Claire, Paco, Nuno, Maxime, Lucas, Jasmine, Antoine et tous les autres que je n'ai pas cité – pour avoir enduré mes explications sur l'exergie, pour m'avoir soutenu lorsque je baissais un peu trop les bras, et pour avoir

toujours encouragé mes idées, même les plus folles. Merci également à mes ami.e.s Chloé, Pierre-Louis, Louise et les sans incruste qui, bien que de l'autre côté de l'océan, restent toujours présents, même avec le décalage, parfois avec parcimonie mais toujours avec cœur. Merci tout particulier à mes parents pour leur aide tout au long de ce tortueux parcours, à la plus merveilleuse des Mamies pour ses doux mots hebdomadaires, ainsi qu'à Papy, qui s'efforce de comprendre ce que je fais, même si l'exergie ne figure pas dans son vieux dictionnaire, et qui n'en revient pas – moi non plus d'ailleurs – que je vais faire plus d'années d'études que lui.

Finalement, merci à Gaspar d'avoir été présent dans les hauts comme dans les bas (très bas), d'avoir pris soin de la larve que je peux parfois être, de m'avoir trop souvent vaincu aux échecs et d'avoir nourri mon esprit d'amour et de précieux moments.



RÉSUMÉ

CONTEXTE

Avec les préoccupations croissantes concernant la préservation des ressources matérielles et énergétiques pour les générations futures et la réduction de leur dissipation à travers la technosphère et l'écosphère, de nombreuses méthodologies et indicateurs ont émergé pour évaluer les impacts liés à l'utilisation des ressources, dont beaucoup sont fondés sur des principes thermodynamiques. Parmi eux, l'exergie — une métrique thermodynamique reliant les ressources énergétiques et non énergétiques au concept de travail — a été proposée comme indicateur unifié, indépendant de facteurs économique et technologique.

OBJECTIFS

L'objectif principal de ce projet de recherche est d'évaluer la pertinence d'un indicateur basé sur l'exergie pour mesurer l'utilisation des ressources. Ce travail s'inscrit dans une problématique plus large : la nécessité de disposer de méthodes d'évaluation d'impact capables de représenter le mieux possible les chaînes de cause à effet liées aux ressources. Plus précisément, ce projet de maîtrise vise à analyser la cohérence entre le concept d'exergie et la quantification des impacts de l'utilisation des ressources en Évaluation des Impacts du Cycle de Vie (EICV). En examinant les hypothèses sous-jacentes à l'exergie, il devient possible d'en identifier le potentiel ainsi que les limites.

MÉTHODOLOGIE

Dans cette étude, une analyse approfondie des méthodes exergétiques disponibles dans la littérature est réalisée, mettant en lumière les hypothèses sous-jacentes au concept d'exergie pour son application en évaluation d'impact. À partir de cette analyse, une chaîne de cause à effet est élaborée, intégrant des flux élémentaires caractérisés par des facteurs exergétiques. Ce chemin d'impact permet d'identifier et de mettre en évidence les incohérences liées à l'utilisation de l'exergie, en s'intéressant aux incohérences dans la définition de l'exergie des matériaux et à l'application du concept de réversibilité thermodynamique —concept décrivant les processus qui peuvent théoriquement être inversés sans effets nets — pour son évaluation notamment à travers une comparaison des effets de la dissipation de l'or et du charbon.

Ensuite, le travail théorique nécessaire pour extraire une quantité donnée d'or et de charbon est calculé, puis comparé au travail réel requis dans un contexte marqué par les irréversibilités du monde réel. Permettant d'obtenir des ratios entre le travail réel et le travail théorique seront calculés pour ces deux ressources.

RÉSULTATS

Nos résultats montrent que l'utilisation de l'exergie comme indicateur de ressource entraînent des résultats qui s'éloignent de son objectif initial. Dans les systèmes réels, où l'irréversibilité prédomine, le potentiel de travail théorique maximal d'une ressource diverge souvent de manière significative de son potentiel réel. Cette divergence varie selon les ressources : pour l'or, le cuivre et le charbon, les ratios entre le potentiel de travail réel et théorique ont été calculés comme étant respectivement de 659 628, 1 320, et 1.44 (à 5).

CONCLUSION

Ces résultats soulignent les limites de l'exergie comme mesure unique pour évaluer la valeur des ressources. Elle ne parvient pas à refléter pleinement leur accessibilité ni leur valeur sociétale, qui dépasse largement leur simple capacité à effectuer un travail physique. En particulier pour les ressources matérielles, des facteurs tels que les propriétés technologiques, leur transformation et leurs applications jouent un rôle déterminant dans leur valorisation, des éléments que les calculs d'exergie ne capturent pas entièrement.

L'étude conclut que l'exergie, dans son état actuel, ne constitue pas un indicateur approprié pour une évaluation intégrée des impacts des différentes catégories de ressources en raison de son caractère trop "théorique". Son utilisation devrait être limitée à l'analyse des irréversibilités dans les processus sociétaux, plutôt que comme un outil global pour évaluer les impacts de l'utilisation des ressources.

Enfin, il apparaît crucial que les recherches futures s'orientent vers le développement de cadres multidimensionnels capables de mieux appréhender la valeur instrumentale des ressources, notamment en évaluant leur perte de contribution potentielle au bien-être, en particulier pour les matériaux non énergétiques. Par ailleurs, une attention accrue devrait être portée au rôle des innovations technologiques dans la réduction de la dissipation des ressources et l'amélioration de leur efficacité de récupération.

ABSTRACT

CONTEXT

With growing concerns about preserving material and energy resources for future generations and reducing their dissipation through the technosphere and ecosphere, numerous methodologies and indicators have emerged to assess the impacts of resource use, many of which are based on thermodynamic principles. Among them, exergy — a thermodynamic metric linking both energetic and non-energetic resources to the concept of work — has been proposed as a unified indicator, independent of economic and technological factors.

OBJECTIVES

The primary goal of this research project is to assess the relevance of an exergy-based indicator for measuring resource use. This work is part of a broader issue: the need for impact assessment methods that can best represent the cause-and-effect chains related to resources. Specifically, this master’s project aims to analyze the coherence between the exergy concept and the quantification of resource use impacts in life cycle impact assessment (LCIA). By examining the underlying assumptions of exergy, it becomes possible to identify its potential and limitations.

METHODOLOGY

In this study, a thorough analysis of available exergy-based methods from the literature is conducted, highlighting the underlying assumptions of the exergy concept for its application in impact assessment. From this analysis, a cause-and-effect chain is developed, incorporating elementary flows characterized by exergonic factors. This impact pathway helps identify and highlight inconsistencies in the use of exergy, focusing on inconsistencies in defining material exergy and the application of the thermodynamic reversibility concept — a concept describing processes that can theoretically be reversed without net effects — for its assessment, particularly through a comparison of the dissipation effects of gold and coal.

Next, the theoretical work required to extract a given quantity of gold and coal is calculated and compared to the actual work required in a context marked by real-world irreversibilities. Ratios of real work to theoretical work are then calculated for these two resources.

RESULTS

Our results show that biases in how exergy is calculated and interpreted as a resource indicator lead to results that deviate from its original purpose. In real-world systems, where irreversibility predominates, the theoretical maximum work potential of a resource often di-

verges significantly from its actual potential. This divergence varies by resource: for gold, copper, and coal, distance ratios of 659 628, 1 320, and 1.44 (to 5), respectively, were calculated.

CONCLUSION

These results highlight the limitations of exergy as a sole measure for assessing the value of resources. It fails to fully reflect their accessibility and societal value, which go far beyond their mere ability to perform physical work. In particular, for material resources, factors such as technological properties, transformation, and applications play a crucial role in determining their value — elements that exergy calculations do not fully capture.

The study concludes that exergy, in its current form, is not an appropriate indicator for integrated impact assessment of different resource categories due to its overly "theoretical" nature. Its use should be limited to the analysis of irreversibilities in societal processes, rather than as a global tool for assessing the impacts of resource use.

Finally, it is essential for future research to focus on developing multidimensional frameworks capable of better capturing the instrumental value of resources, particularly by assessing their loss of potential contribution to well-being, especially for non-energetic materials. Additionally, more attention should be given to the role of technological innovations in reducing resource dissipation and improving their recovery efficiency.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES	x
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xv
LISTE DES ANNEXES	xvi
 CHAPITRE 1 INTRODUCTION ET REVUE DE LITTÉRATURE	 1
1.1 Définitions et concepts de base	1
1.1.1 L'Analyse du Cycle de Vie	1
1.1.2 Quel consensus existe-t-il sur l'évaluation des impacts de l'utilisation des ressources ?	3
1.1.3 Valeur des ressources	5
1.1.4 Mille et une méthodes	6
1.1.5 Un indicateur thermodynamique	9
1.1.6 Les lacunes de l'exergie	12
1.2 Objectifs de recherche	15
1.3 Plan du mémoire	16
 CHAPITRE 2 THÉORIE DE L'EXERGIE	 17
2.1 Définitions	17
2.2 Exergie physique	20
2.3 Exergie chimique	21
2.3.1 L'environnement de référence	21
2.3.2 Exergie des ressources matérielles	23

2.3.3 Exergie des ressources fossiles	30
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	34
CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : ASSESSING THE POTENTIAL OF EXERGY AS A THERMODYNAMIC RESOURCE-USE IMPACT INDICATOR	37
4.1 Introduction	38
4.2 Exergy framework	44
4.2.1 Problem definition	44
4.2.2 Modeling concept	45
4.2.3 Equation definition	45
4.3 Exergy concepts	47
4.3.1 Reversibility and non-reversibility	48
4.3.2 Exergy of material resources	49
4.3.3 Everything seems perfect	53
4.4 Exergy potential as an impact assessment method for resources	54
4.4.1 Hypothesis on reversible process	54
4.4.2 Current extraction processes	55
4.4.3 A story of order of magnitude	56
4.5 Discussion	57
4.5.1 Relevance of exergy	57
4.5.2 Limitations and robustness	58
4.5.3 Exergy model applicability	59
4.5.4 Recommendation on resource use in life cycle impact assessment	59
4.6 Conclusion	60
CHAPITRE 5 DISCUSSION	62
5.1 Résultats et atteinte de l'objectif	62
5.1.1 Sous-objectif 1 : Clarification du concept d'exergie	62
5.1.2 Sous-objectif 2 : Modélisation d'un chemin d'impact	62
5.1.3 Sous-objectif 3 : Biais associés à l'utilisation de l'exergie	63
5.1.4 Réalisation de l'objectif principal	63
5.2 Limites de l'étude et pistes d'amélioration	64
5.2.1 Caractérisation des flux élémentaires	64
5.2.2 Définition de l'environnement de référence	66
5.2.3 Incertitude des données sur les ressources	67
5.3 Perspectives de recherche sur l'impact de l'utilisation des ressources	67

5.3.1	Nouveau paradigme sur la valeur des ressources	67
5.3.2	Résolution des inventaires de cycle de vie	69
CHAPITRE 6 CONCLUSION	72	
6.1	Synthèse des travaux	72
6.2	Recommendations	72
RÉFÉRENCES	74	
ANNEXES	87	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Les différentes perspectives sur la valeur des ressources et leur modèle associé	7
Tableau 1.2	Types de méthodes fournissant des indicateurs pour évaluer l'impact de l'utilisation des ressources abiotiques	8
Tableau 1.3	Nombre de ressources abiotiques incluses dans les méthodes EICV sélectionnées	13
Tableau 2.1	Les différents environnements de référence et leurs exigences	22
Tableau 2.2	Exergie chimique des éléments	26
Tableau 2.3	Exergie chimique des éléments (suite)	27
Tableau 2.4	Exergie de concentration d'une substance, mesurée entre sa concentration dans <i>Thanatia</i> et sa concentration dans une mine	31
Tableau 2.5	Exergie de concentration d'une substance, mesurée entre sa concentration dans <i>Thanatia</i> et sa concentration dans une mine (suite)	32
Tableau 2.6	Facteur β calculé à partir du pouvoir calorifique inférieur (PCI) ou supérieur (PCS) d'un combustible fossile	33
Table 4.1	Exergy of Gold and Copper	54
Table 4.2	Energy consumption of different resources extraction and refining . . .	56
Table 4.3	Ratio of concentration exergy compared to energy consumption requirements for the extraction and refinement of various mineral and fossil resources	58

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Les quatre étapes de la méthodologie d'ACV	3
Figure 1.2	Cadre méthodologique des indicateurs d'IMPACT World+, classés respectivement au niveau intermédiaire et au niveau des dommages. Les indicateurs relatifs aux dommages sont ensuite regroupés en domaines de protection	4
Figure 1.3	Méthodes basées sur l'exergie liées à la méthode de CExC.	12
Figure 2.1	(a) Diagramme Sankey représentant les flux énergétiques pour l'exemple du procédé avec la centrale thermique et (b) Diagramme Grassman représentant les flux exergétiques de ce même procédé.	19
Figure 2.2	Classification des types d'exergie	20
Figure 2.3	Représentation graphique de l'exergie nécessaire pour concentrer une ressource en lien avec l'équation 2.11	28
Figure 2.4	Quantité d'exergie nécessaire ou obtenable théoriquement pour purifier ou diluer un métal à partir de différent état de concentration	29
Figure 3.1	Schéma des différentes étapes méthodologiques de l'article	36
Figure 4.1	Conceptual impact pathway assessing the loss of accessibility to resource by change in state property resulting in the dissipation of work potential	46
Figure 4.2	Graphical representation of the effect model for the impact pathway for coal (a) and gold (b). The final dead state, also called <i>Thanatia</i> , has a homogeneous gold mass fraction of 1.50×10^{-9} g/g which corresponds to the overall concentration of gold in the earth's crust while carbon is present in this dead state as CO ₂ in the atmosphere at a molar concentration of 0.169 mol/m ³	48
Figure 4.3	Illustration of the state change for calculating the concentration exergy	57
Figure 5.1	Représentation graphique des perspectives de recherche évoquées, en lien avec les étapes de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)	70

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse du Cycle de Vie
EICV	Évaluation des Impacts du Cycle de Vie
MJ	Méga Joule
K	Kelvin
IRP	International Resource Panel
AdP	Aire de Protection
ADP	Abiotic Depletion Potential
SOP	Surplus Ore Potential
SCP	Surplus Cost Potential
GeoPolRisk	Geopolitical Supply Risk
ESSENZ	Integrated Method to Assess Resource Efficiency
CExC	Cumulative Exergy Consumption
CEENE	Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment
CExD	Cumulative Exergy Demand
ELCA	Environmentally orientated Life Cycle Assessment
TR	Thermodynamic Rarity
ERC	Exergy Replacement Cost
EdR	Environnement de Référence
ADR	Average Dissipation Rate
EDP	Environmental Dissipation Potential
ARP	Abiotic Resource Project

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Données utilisées pour la réalisation de l'article	87
----------	--	----

CHAPITRE 1 INTRODUCTION ET REVUE DE LITTÉRATURE

Pour contrer le réchauffement climatique, l'humanité cherche à s'affranchir des ressources fossiles limitées en s'engageant dans une transition énergétique. L'objectif à terme est que tous les procédés industriels reposent sur des sources d'énergie décarbonée, telles que le solaire ou l'éolien [1]. Dans ce contexte, l'efficacité énergétique de ces sources renouvelables joue un rôle central dans la planification stratégique des secteurs industriels, tant au Québec qu'à l'échelle mondiale.

Cependant, la transition énergétique est également freinée par la disponibilité limitée des ressources métalliques nécessaires au déploiement des énergies renouvelables [1]. Ainsi, les besoins en énergie et en matériaux s'avèrent étroitement liés, et leur approvisionnement pourrait être simultanément contraint [2].

Cet équilibre nécessite des compromis complexes, tels que la réduction de la consommation de ressources primaires ou fossiles, ainsi que des décisions concernant les matériaux (comme le fer ou le nickel) ou les formes d'énergie (par exemple, la chaleur ou l'électricité) à revaloriser en priorité [1]. Pour guider ces choix vers des solutions globalement durables, il est essentiel de s'appuyer sur un indicateur unifié évaluant l'impact de l'utilisation des ressources.

Dans cette optique, l'ACV s'impose comme un outil clé. Elle permet de quantifier, grâce à des indicateurs, les impacts associés à l'usage des ressources et d'orienter les choix nécessaires pour réussir une transition environnementale efficace.

1.1 Définitions et concepts de base

1.1.1 L'Analyse du Cycle de Vie

L'ACV est une méthode qui permet de modéliser les impacts environnementaux potentiels d'un système de produit ou de service sur l'ensemble de son cycle de vie [3]. La modélisation des impacts se fait depuis l'extraction des matières premières nécessaires à sa fabrication jusqu'à son traitement en fin de vie (mise en décharge, recyclage, etc.), en passant par ses phases d'usage, d'entretien et de transport. Cette approche holistique permet ainsi une prise de décision éclairée en matière de conception, de production et de gestion de fin de vie.

La réalisation d'une ACV s'articule autour de quatre étapes principales (voir figure 1.1).

La première étape consiste à définir les objectifs et le champ d'étude. Cette phase permet de préciser la finalité de l'ACV, d'identifier le public cible et de délimiter le périmètre de l'étude,

notamment en fixant les frontières du système et l'unité fonctionnelle.

La deuxième étape concerne l'analyse de l'inventaire. Elle vise à recenser et quantifier les flux entrants (matières premières, énergie) et sortants (émissions, déchets, produits finis) tout au long du cycle de vie. Cette analyse repose sur l'utilisation de bases de données spécialisées en ACV (par exemple Ecoinvent ou GaBi) ainsi que sur des données spécifiques au produit ou au secteur étudié.

La troisième étape correspond à l'EICV. C'est ici que les flux d'inventaire sont traduits en impacts environnementaux à l'aide de méthodes intégrant diverses catégories d'impact, chacune associée à des indicateurs spécifiques.

Enfin, la dernière étape, qui en réalité doit être menée en parallèle avec les précédentes, est l'interprétation des résultats. Cette phase permet de vérifier la cohérence et la robustesse des analyses, tout en identifiant des pistes d'amélioration.

Pour évaluer les impacts et résoudre les compromis liés à l'utilisation des ressources dans le cadre de la transition énergétique, il est essentiel de se focaliser sur la troisième étape décrite précédemment. Cela implique de s'appuyer sur les méthodes d'EICV, en mettant particulièrement l'accent sur la création et l'amélioration des indicateurs intégrés aux différentes catégories d'impact.

Les méthodes d'EICV sont des outils essentiels dans l'ACV pour quantifier et interpréter les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service. Elles se divisent généralement en deux catégories : les méthodes *midpoint*, qui évaluent les impacts à un stade intermédiaire de la chaîne de cause à effet, et les méthodes *endpoint*, qui évaluent les dommages finaux sur des Aire de Protection (AdP)¹ comme la santé humaine ou la qualité des écosystèmes (voir figure 1.2). Parmi les méthodes couramment utilisées, on trouve ReCiPe [5], qui offre à la fois des indicateurs *midpoint* et *endpoint*, et IMPACT World+ [6], une méthode plus récente qui vise à fournir une couverture géographique globale et une évaluation régionalisée des impacts. Le choix de la méthode dépend souvent de l'objectif de l'étude, de la région géographique concernée et du niveau de détail requis dans l'analyse des impacts. Ces méthodes sont régulièrement mises à jour afin de refléter les avancées dans les domaines scientifiques. Ces méthodes couvrent un grand nombre de chaînes de cause à effet évaluables, dont 21 pour IMPACT World+ au niveau des dommages.

1. L'AdP représente les entités que nous voulons protéger en utilisant l'ACV. Les AdP les plus utilisées sont la santé humaine, les ressources naturelles et la qualité des écosystèmes. [4]

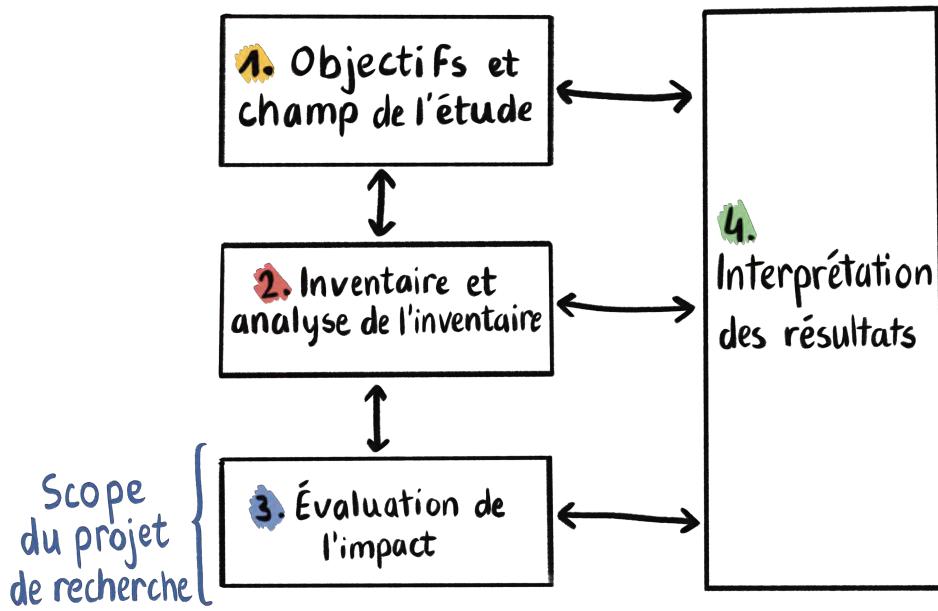


FIGURE 1.1 Les quatre étapes de la méthodologie d'ACV

1.1.2 Quel consensus existe-t-il sur l'évaluation des impacts de l'utilisation des ressources ?

L'évaluation des impacts liés à l'utilisation des ressources repose sur de nombreuses chaînes de cause à effet, et aucun indicateur ne fait consensus dans la communauté ACV. Les divergences dans les perspectives adoptées influencent les décisions qui en découlent, rendant le processus complexe.

Une question centrale se pose : « Quelles entités cherchons-nous à protéger dans le cadre de l'évaluation des impacts liés aux ressources et aux autres AdP en ACV ? ». Pour les ressources naturelles, il est essentiel de définir les critères sur lesquels baser l'évaluation des impacts. Cependant, cette démarche s'avère particulièrement complexe en raison de la difficulté à identifier et caractériser les mécanismes environnementaux sous-jacents, ainsi que du défi posé par la sélection d'indicateurs pertinents permettant, en définitive, d'estimer ces impacts de manière fiable.

Un exemple illustratif est la chaîne de cause à effet liée à l'extraction des ressources : leur exploitation peut entraîner une indisponibilité temporaire ou permanente, compromettant ainsi leur capacité à répondre aux besoins de la société actuelle tout en privant les générations futures de leur accès ou de leur usage [7].



v2.1 - MIDPOINT-EXPERT, METHODOLOGICAL FRAMEWORK

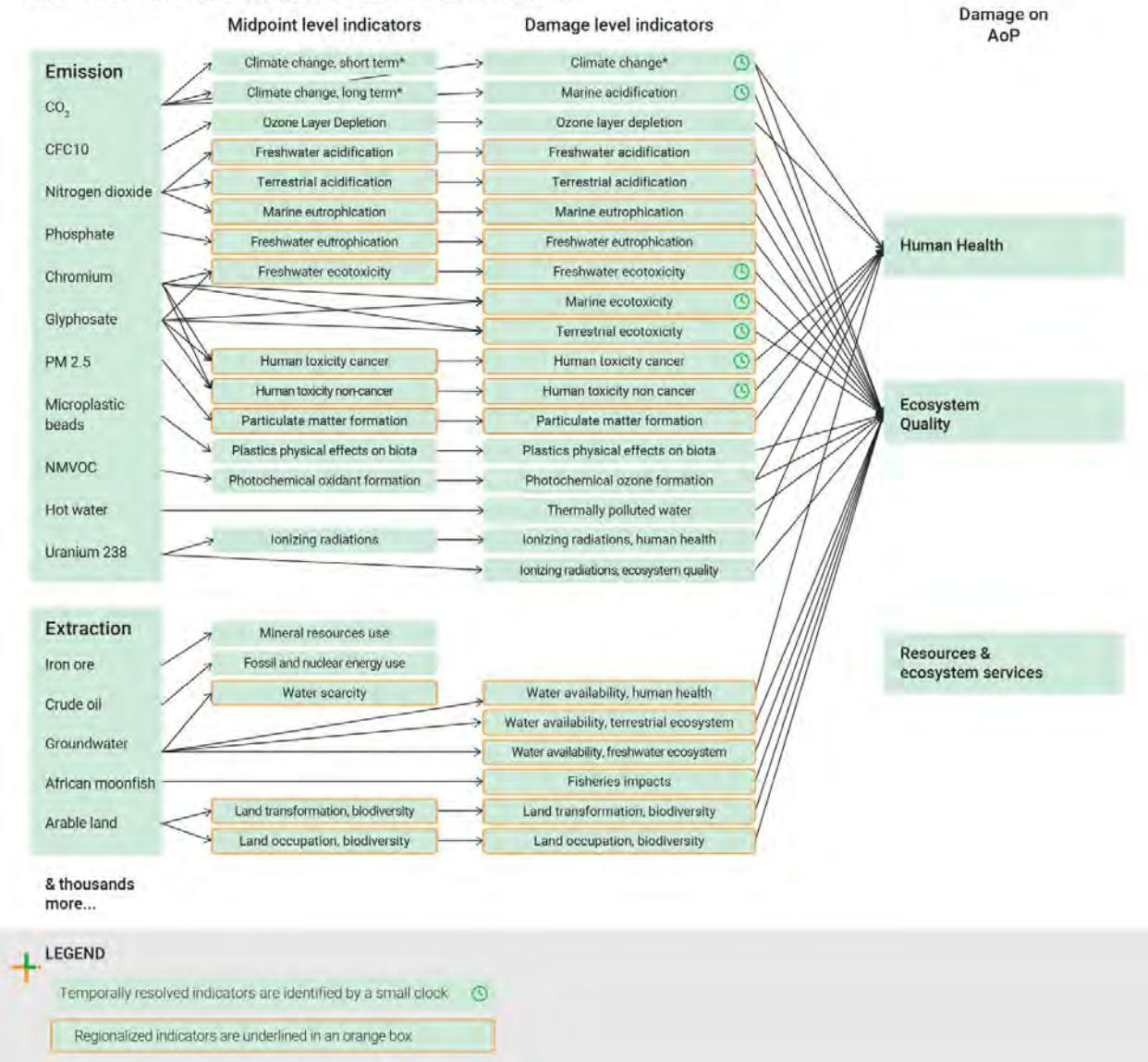


FIGURE 1.2 Cadre méthodologique des indicateurs d'IMPACT World+, classés respectivement au niveau intermédiaire et au niveau des dommages. Les indicateurs relatifs aux dommages sont ensuite regroupés en aire de protection [6].

La revue de littérature scientifique pour ce projet commence par l'état de l'art sur la valeur des ressources. En Section 1.1.4 une vue d'ensemble des différentes méthodes d'évaluation des impacts pour les ressources sera donnée. Puis, avec une courte introduction au concept d'exergie (développé postérieurement en Chapitre 2), un focus sera fait sur le lien entre l'exergie et les ressources. Une étude des différences entre les méthodes basées sur l'exergie est également réalisée (Section 1.1.5). Finalement, la conclusion de ce chapitre mettra en évidence les lacunes dans ce domaine de recherche, qui constituent le point de départ de la réalisation de ce projet (Section 1.1.6).

1.1.3 Valeur des ressources

Quand on parle de ressources naturelles, il est important de clarifier ce qu'elles sont et de définir ce qu'elles représentent pour notre société. Il existe de nombreuses manières de classer les ressources naturelles, selon qu'elles soient renouvelables ou non, abiotiques ou biotiques, épuisables ou non, etc... [8]. Le terme ressource «abiotique» désigne les ressources minérales, métalliques et les combustibles fossiles tandis que les ressources «biotiques» proviennent d'organismes vivants [8, 9]. Selon Sonderegger et al. les ressources naturelles sont des “material and non-material assets occurring in nature that are at some point in time deemed useful for humans” [10]. La notion d'utilité donnée précédemment revient également dans la définition donnée par l'International Resource Panel (IRP), où les ressources sont vues «as parts of the natural world that can be used in economic activities to produce goods and services.» [11]. Les définitions trouvées dans la littérature restent néanmoins très hétérogènes selon le point de vue de la valeur de la ressource. Cette valeur peut être intrinsèque ou instrumentale. La première représente la valeur qui est attribuée à une ressource en raison de sa nature même, indépendamment de toute utilité ou fonction qu'elle pourrait avoir. Tandis que la deuxième est attribuée à quelque chose en fonction de son utilité ou de son rôle en tant que moyen pour atteindre un objectif ou un résultat particulier [12]. C'est là qu'interviennent les AdP, elles contribuent à identifier les éléments que nous voulons préserver ou protéger, ainsi que les impacts qui doivent être modélisés. Les divergences de point de vue dépendent de la perspective donnée à ces AdP [8, 12]. On se demande alors si on doit se limiter à la valeur instrumentale de la ressource ou si on doit également prendre en compte sa valeur intrinsèque ? Souhaite-t-on regarder l'utilité actuelle des ressources ou inclure aussi leur utilité future ? Qu'elle est cette utilité, est-elle physiquement palpable pour l'homme comme fonction d'approvisionnement ou relève-t-elle de services essentiels aux écosystèmes et à leur fonctionnement [8, 12, 13] ? Si on se concentre sur leur valeur instrumentale, souhaite-t-on assurer leur disponibilité, qui concerne la présence physique d'une ressource, ou leur l'accessibilité, qui concerne la capacité à utiliser une ressource [14] ? Est-il plus pertinent d'évaluer les effets de l'extraction des res-

sources ou les effets de la dissipation ? Ces questions ont conduit à des indicateurs naissants d'approches de modélisation différentes selon la perspective utilisée (voir le Tableau 1.1) [7]. Il est également pertinent d'aborder la notion seuil en lien avec les limites planétaires et l'ACV, connue sous le terme d'ACV Absolue (elle n'est pas retranscrite dans le Tableau 1.1). Cette approche vise principalement à évaluer si un système anthropique peut être considéré comme écologiquement durable de manière absolue (avec des seuils limites), en prenant en compte un ensemble exhaustif de catégories d'impact [15, 16]. Selon cette approche, les seuils sont définis comme étant *«the maximum persistent impact that the environment can sustain without suffering perceived unacceptable impairment of the functional integrity of its natural systems or, in the case of non-renewable resource use, that corresponds to the rate at which renewable substitutes can be developed»* [15]. En ce qui concerne les ressources, il s'agit d'identifier un seuil temporel qui reflète la capacité d'adaptation à leur utilisation. Par exemple, si une période de X années est requise pour que l'ensemble des utilisateurs s'ajustent à la raréfaction d'une ressource, les stocks disponibles ne devraient pas être épuisés avant l'écoulement de cette durée [16].

1.1.4 Mille et une méthodes

Les méthodes présentées ci-dessous sont classées en fonction des types d'indicateurs qu'elles fournissent et des approches adoptées. Cependant, cette liste reste partielle et non exhaustive. L'objectif n'est pas de fournir une revue complète des méthodes d'évaluation des impacts liés à l'utilisation des ressources, mais plutôt de conceptualiser les méthodes exergétiques en les reliant aux problématiques générales de modélisation d'indicateurs pour l'évaluation des impacts des ressources.

Différentes approches de modélisation ont donné une multitude de méthodes pour l'évaluation de l'impact de l'utilisation des ressources abiotiques, on en compte plus d'une vingtaine [17]. Les indicateurs découlant de ces méthodes sont divisés suivant les perspectives données dans le Tableau 1.1 et leur type donnés dans le Tableau 1.2.

On retrouve les méthodes telles que Abiotic Depletion Potential (ADP) [18, 19] et EDIP [20], quantifiant la contribution d'un système de produits à l'épuisement des stocks naturels. Elles correspondent à la perspective A et au type 2. Les méthodes ReCiPe 2008 [5], Surplus Ore Potential (SOP) [21], Surplus Cost Potential (SCP) [22] ou bien Eco-Indicator 99 [23], quant à elles, quantifient les conséquences futures de la contribution d'un système de produits à la modification de la qualité des ressources. Elles suivent également la perspective A et font partie du type 3.

Perspective	Modèle	Méthode
<p><i>"Les perspectives de type A se concentrent sur les êtres humains (les "parties prenantes"), qui ont un intérêt à utiliser les ressources de l'économie (le "système concerné")."</i> [7]</p>	<p>Modélisation d'un flux unidirectionnel et non réversible d'un stock quantifié dans l'environnement vers l'économie (disponibilité).</p>	<p>ADP, EDIP, ReCiPe 2008, SOP, SCP, Eco-Indicator 99</p>
<p><i>"Les perspectives de type B sont similaires aux perspectives de type A en ce sens qu'elles se préoccupent de l'accès continu aux ressources par les humains en vue de leur utilisation dans l'économie (partie prenante : les humains, système concerné : l'économie)."</i> [7]</p>	<p>Modélisation d'un stock quantifié dans l'environnement et/ou l'économie et d'un flux quittant ce stock vers un "endroit" où il sera accessible dans l'économie ou dans l'environnement (accessibilité).</p>	<p>GeoPolRisk, ESENZ, EDP</p>
<p><i>"Les perspectives de type C distinguent et considèrent à la fois la valeur instrumentale des ressources dans l'économie et dans l'environnement (en tant que "système concerné") telle qu'elle est appréciée par les êtres humains (en tant que "parties prenantes")."</i> [7]</p>	<p>Même modélisation que la perspective A ainsi qu'une prise en compte de l'impact sur l'environnement de l'utilisation de ce flux dans l'économie (fonction ex-situ et in-situ).</p>	<p>Ecological Scarcity Method</p>
<p><i>"Les perspectives de type D considèrent les fonctions in situ des ressources abiotiques dans l'environnement (en tant que "système concerné"), qui sont reconnues comme bénéfiques pour les humains (en tant que "parties prenantes")."</i> [7]</p>	<p>Même modélisation que la perspective A sans prendre en compte la notion de stock, mais plutôt un environnement de référence. L'utilisation des ressources est modélisée comme un flux unidirectionnel (consommation) de l'environnement vers l'économie.</p>	<p>CEENE, CEXD</p>

TABLEAU 1.1 Les différentes perspectives sur la valeur des ressources et leur modèle associé

Type	Description
1	Méthode de consommation des ressources naturelles se basant sur la masse et l'énergie
2	Méthode établissant un lien entre la consommation de ressources naturelles et les stocks ou la disponibilité des ressources
3	Méthode établissant un lien entre la consommation actuelle de ressources naturelles et les conséquences de l'extraction future de ces ressources
4	Méthode de consommation basée sur la thermodynamique (ex : exergie et énergie solaire)

TABLEAU 1.2 Types de méthodes fournissant des indicateurs pour évaluer l'impact de l'utilisation des ressources abiotiques [10]

Il existe aussi des méthodes où le stock est défini par sa viabilité d'extraction et donc son accessibilité (par ses propriétés physiques, sa concentration du minerai cible, etc...), plutôt que par la présence même de la ressource dans l'environnement ou l'économie, elles correspondent à la perspective B. La méthode Environmental Dissipation Potential (EDP) [24], évalue la diminution potentielle de l'accessibilité au niveau mondial de ressources primaires (dans l'environnement) et/ou secondaires (dans la technosphère) à très long terme en raison de l'augmentation des émissions de ressources (dissipation environnementale). EDP est l'une des rares méthodes proposant des indicateurs permettant d'évaluer la perte d'accessibilité due à la dissipation des ressources [24]. Geopolitical Supply Risk (GeoPolRisk) [25] et Integrated Method to Assess Resource Efficiency (ESSENZ) [26] sont deux méthodes suivant également cette perspective (perspective B) et sont de type 3. Elles quantifient l'accessibilité aux ressources sous l'effet de contraintes géopolitiques et socio-économiques. Ceux sont des méthodes de gestion des risques d'approvisionnement.

Finalement, on retrouve les méthodes utilisant la thermodynamique, plus largement développées en section 1.1.5. Les méthodes basées sur la thermodynamique suivent le plus souvent la perspective B et sont de type 4.

La grande diversité de méthodes disponibles pour évaluer les impacts de l'utilisation des ressources peut entraîner la confusion chez leurs utilisateurs. Et pour cause, toutes ces méthodes existent pour répondre à des questions ou à des aspects différents de l'utilisation des ressources. Plusieurs groupes de recherche, dont Berger et al., ont mis en avant, par des études de cas, que les approches de modélisation et les données sous-jacentes peuvent aboutir

à des résultats divergents [17, 27, 28]. Certaines méthodes se concentrent sur des mécanismes d'impact spécifiques ou couvrent seulement une partie des ressources naturelles, ce qui peut entraîner des incohérences dans les résultats des évaluations d'impact [17]. Des méthodes sont recommandées en fonction de la perspective employées, plutôt que d'utiliser ces méthodes de manière interchangeable. Malgré cela, des lacunes importantes subsistent. La question des flux dissipatifs de ressources, définie comme étant : «*Flows to sinks or stocks that are not accessible to future users due to different constraints. These constraints prevent humans to make use of the function(s) that the resources could have in the technosphere. The distinction between dissipative and non-dissipative flows of resources may depend on technological and economic factors, which can change over time*» [29] reste en suspens et n'est que rarement intégrée dans les modèles [24, 28]. Certaines ressources abiotiques, telles que les minéraux et agrégats sont souvent non couverts. L'inclusion des ressources secondaires (matériaux recyclés) et des stocks anthropogéniques (ressources extraites et actuellement utilisées) reste peu explorée dans la littérature. Enfin, peu de méthodes permettent de prendre en compte à la fois les ressources non énergétiques (comme les ressources minérales) et les ressources énergétiques (comme le gaz naturel) en les caractérisant à l'aide d'un indicateur commun exprimé dans une unité unique. Cette limitation peut conduire à des décisions inappropriées concernant la préservation de l'AdP des ressources.

1.1.5 Un indicateur thermodynamique

L'exergie

Les méthodes d'évaluation des impacts basés sur la thermodynamique apportent une perspective très différente des précédentes méthodes évoquées. La thermodynamique est utilisée par le concept d'exergie. L'exergie est dérivée de la 2^e loi de la thermodynamique, elle est définie comme étant :

- La quantité **maximale** de travail pouvant être obtenue lorsqu'une matière est amenée à un état d'équilibre thermodynamique avec les composants du système qui l'entoure par le biais d'un processus réversible [30, 31].
- La quantité **minimale** de travail nécessaire pour produire un matériau dans un état choisi à partir de composants du système environnant par le biais d'un processus réversible utilisant l'environnement comme source unique de chaleur [32].

L'exergie à l'instar de l'énergie permet de donner une dimension différente à la valeur d'un joule d'une source d'énergie par rapport à une autre. Elle définit la *qualité* de ces sources par leur utilité potentielle à faire un travail [30, 33]. Aussi, l'exergie n'est pas conservée dans les processus du monde réel contrairement à l'énergie qui ne peut pas être créée ni détruite

selon la 1^{re} loi de la thermodynamique.

L'exergie et les ressources

Le concept d'exergie possède de nombreux avantages qui le rendent intéressant dans le contexte d'évaluation d'impact [34]. Premièrement, l'exergie est une propriété extensive dont la valeur dépend du système étudié et de l'Environnement de Référence (EdR) (voir section 2.3.1) [35]. Ensuite, l'exergie permet de comparer tous les systèmes thermodynamiques sans qu'il soit nécessaire d'utiliser des facteurs de pondération [30]. En effet, il est possible de caractériser les ressources énergétiques et matérielles utilisées dans un procédé grâce au travail utile exprimé dans une unité commune en Joules [36, 37]. Gaudreau et al. [38] explique que l'utilisation de l'efficacité exergétique permet de mieux identifier les inefficacités en déterminant et en quantifiant les causes et les lieux des pertes par rapport à l'efficacité énergétique. L'efficacité exergétique est définie comme étant le ratio des intrants et extrants d'exergie d'un système [36]. Comme dit précédemment, l'exergie n'est pas conservée lorsqu'elle est consommée, elle a donc un potentiel d'indicateur approprié pour évaluer l'impact de l'utilisation des ressources.

Les méthodes basées sur l'exergie

Il existe une vingtaine de méthodes d'analyse exergétique [39], principalement différenciées par leurs objectifs finaux. Toutes ne sont pas adaptées à l'évaluation des impacts en ACV. Parmi elles, sept sont spécifiquement cohérentes avec une application en ACV, tandis que les autres s'orientent vers des analyses différentes, notamment dans le domaine de l'ingénierie, où elles permettent d'évaluer et d'optimiser divers processus et systèmes technologiques.

En se concentrant sur les méthodes exergétiques adaptées à l'ACV, des différences subsistent dans leur modélisation. Certaines intègrent un plus large éventail de ressources, définissent des frontières de système spécifiques, utilisent des proxys², ou tiennent compte de facteurs technologiques et sociaux. De plus, toutes ces méthodes ne sont pas conçues pour l'EICV. Certaines se limitent à la caractérisation des flux élémentaires sans les intégrer dans le cadre de l'ACV, autrement dit, sans nécessairement définir un objectif et un champ d'étude précis ni établir de lien avec des catégories d'impacts associées aux aires de protection.

C'est le cas de la première méthode développée, celle du professeur Szargut [40], connue sous le nom de Cumulative Exergy Consumption (CExC), a pour objectif de calculer la

2. Dans le contexte de l'ACV, un proxy est une donnée ou un élément utilisé comme substitut pour représenter ou estimer une autre donnée indisponible ou non mesurable.

consommation cumulée de ressources naturelles. Elle caractérise cette consommation en unités exergétiques tout au long des étapes d'une ACV, lors de la phase d'évaluation d'impact, et attribue le coût total exergétique des ressources (en Méga Joule (MJ)) aux produits [40]. Ce coût exergétique n'est pas relié à un impact potentiel sur les aires de protections. Les méthodes élaborées par la suite sont dérivées de la CExC. La figure 1.3 illustre les liens entre ces différentes méthodes et le nombre de publications où elles sont mentionnées au cours des dix dernières années.

Parallèlement, la méthode Exergetic Cost, proposée par Lozano et Valero, s'aligne sur le concept de CExC [41]. Cette approche se concentre sur le coût exergétique cumulé des processus en le comparant à la valeur exergétique du produit final, fournissant une mesure de l'efficacité globale de l'utilisation des ressources, elle est équivalente au CExC.

Bösch et al. ont introduit la méthode Cumulative Exergy Demand (CExD) pour l'évaluation de l'exergie spécifique des minéraux. Leur approche consiste à calculer d'abord une valeur moyenne d'exergie pour un minéral générique, puis à l'attribuer aux minéraux spécifiques en fonction de critères économiques et de leur concentration dans le minéral [42]. Cette méthode révèle que les métaux provenant de minéraux moins concentrés possèdent des valeurs de CExD plus élevées. Contrairement à une simple caractérisation des flux élémentaires, cette méthode s'inscrit davantage dans l'évaluation des impacts de l'utilisation des ressources à travers un critère exergétique. Ce critère illustre l'effort requis pour l'extraction et le raffinage.

La méthode Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE), développée par Dewulf et al, représente une avancée notable par rapport au CExD. Elle vise à quantifier de manière plus précise l'exergie «retirée» de l'environnement naturel en incluant les ressources énergétiques, non-énergétiques et l'occupation des sols [43].

L'Analyse Exergétique du Cycle de Vie (Environmentally orientated Life Cycle Assessment (ELCA)), développée initialement par Cornelissen en 1997 [44, 45] et affinée par [37], étend l'utilisation de l'exergie pour l'évaluation d'impact en analyse de cycle de vie. Cette méthode considère l'irréversibilité du cycle de vie comme l'indicateur le plus pertinent de l'épuisement des ressources naturelles. Elle soutient que les minéraux ne sont pas épuisés en termes d'atomes, mais que la perte de qualité des gisements nécessite des efforts croissants pour l'extraction future, mesurable en termes d'exergie.

Enfin, la méthode Thermodynamic Rarity (TR), basée sur le concept de coût de remplacement de l'exergie (Exergy Replacement Cost (ERC)) développé par Valero et al., propose une approche nouvelle sur l'utilisation de l'exergie en évaluation d'impact. Elle vise à établir une meilleure correspondance entre l'exergie chimique des substances et l'exergie nécessaire pour les récupérer à partir d'une terre hypothétiquement dégradée, nommée «Thanatia» [31, 46, 47].

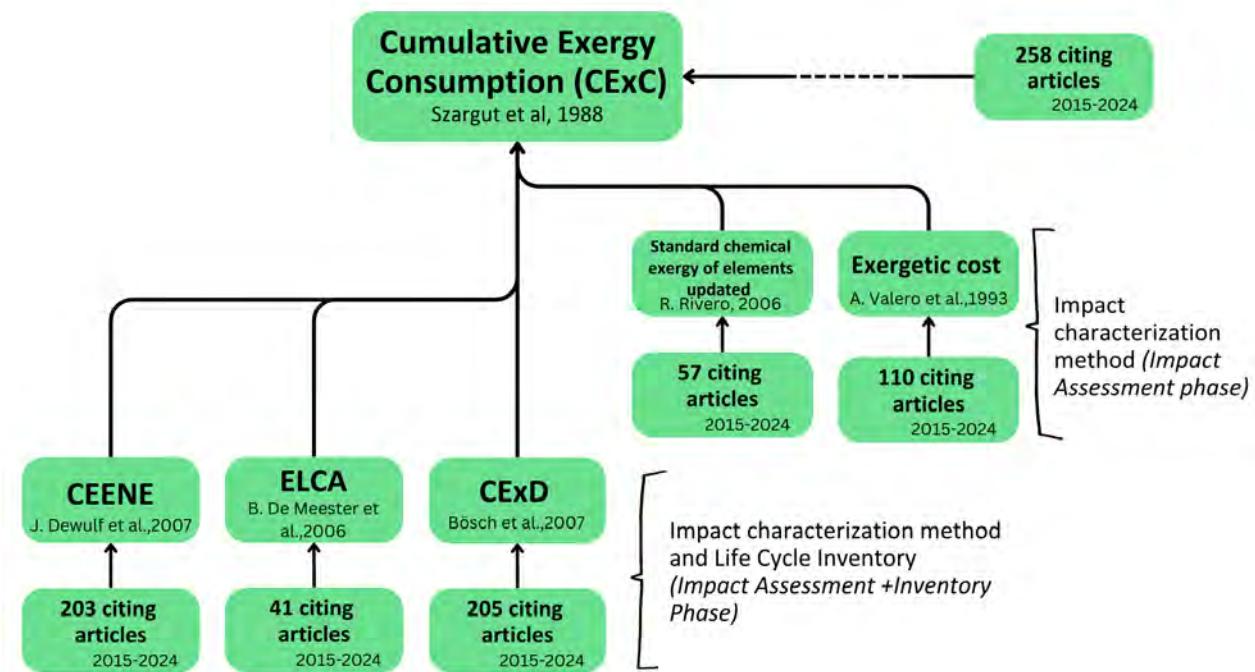


FIGURE 1.3 Méthodes basées sur l'exergie liées à la méthode de CExC.

Les méthodes basées sur l'exergie ont l'avantage d'inclure un grand nombre de ressources dans leur définition par rapport aux autres méthodes données en section 1.1.4. Rørbech et al. ainsi que Berger et al. ont détaillé la couverture des ressources abiotiques pour différentes méthodes EICV sélectionnées, le tableau 1.3 regroupe ces informations [17, 48].

1.1.6 Les lacunes de l'exergie

Malgré les avantages cités précédemment, l'exergie n'apparaît pas comme étant le choix prédominant comme indicateur pour évaluer l'impact de l'utilisation des ressources. Plusieurs auteurs, comme Dincer et al souligne les raisons pour lesquelles les parties prenantes peuvent être réticentes à adopter l'analyse exergétique [50]. Les méthodes sont souvent perçues comme trop complexes ou fastidieuses, notamment en raison de la nécessité de choisir un EdR [36, 50, 51]. Il est aussi revenu que l'interprétation et l'utilisation des résultats d'une analyse exergétique peuvent sembler difficiles pour certains [36, 50]. Finalement, les auteurs d'autres types de méthodes d'impact n'ont pas constaté que les méthodes exergétiques conduisent à des résultats tangibles et directement applicables [17, 27, 36, 49]. Ces deux derniers arguments à l'encontre des méthodes exergétiques s'appliquent également aux autres méthodes d'évaluation comme expliqué en section 1.1.4. Et il s'agit du problème principal qui englobe l'ensemble de ce domaine d'évaluation, à savoir : quels sont les critères qui

TABLEAU 1.3 Nombre de ressources abiotiques incluses dans les méthodes EICV sélectionnées

Méthodes	Métaux et minéraux ^{1,2,3}	Ressources fossiles ^{1,2}
Méthodes basées sur l'exergie		
CExD	65	5
CEENE	54	4
ERC	58	3 ⁴
Autres types de méthodes		
ADP Ultimate Reserve	49	4
EDP	-	-
Average Dissipation Rate (ADR)	61	-
EDIP	29	4
ReCiPe 2008	21	36
SOP	75	-
SCP	75	-
Eco-Indicator 99	13	3
GeoPolRisk	24	0
ESSENZ	36	-

¹ Valeur du tableau 1 de [48]

² Valeur des informations complémentaires de [17]

³ Valeur du tableau 1 de [49]

⁴ Valeur du chapitre 4.7.1 de [47]

donnent des résultats tangibles et explicites pour l'évaluation de l'impact de l'utilisation des ressources. Dans les sections suivantes, nous analysons les désavantages liés à la définition de l'EdR et l'interprétation des méthodes exergétiques.

Définition du système étudié

La définition précise des frontières du système est une étape cruciale en analyse exergétique, car elle influence directement la portée et la précision de l'étude. Cette délimitation détermine quels éléments sont inclus dans le système et quelles interactions avec l'environnement extérieur seront prises en compte. La définition des frontières dépend de l'objectif de l'analyse et conditionne l'identification des flux de ressources et des interactions à examiner, qu'il s'agisse de flux de masse ou d'autres formes d'échanges comme le travail [52].

Or, dans certains cas ces frontières ne représentent pas correctement le concept d'exergie. Finnveden et Östlund [53] calculent comme exergie détruite, celle qui est requise pour l'extraction sans prendre en compte les émissions dans l'environnement qui possèdent également un potentiel de travail. Le résultat de leur analyse ne rend pas compte des avantages à uti-

liser l'exergie, les frontières du système ayant été choisies pour respecter ce qui est fait en ACV. La définition des frontières est complexifiée par le manque de compréhension de ce que l'exergie implique dans sa relation avec l'environnement [54].

Le choix de l'État de Référence (EdR) pour calculer l'exergie joue un rôle important dans la définition des frontières du système, mais il comporte aussi des limites. Gaudreau en a fait une analyse approfondie [51] et met en avant deux grandes contradictions liées à l'EdR.

Première contradiction : Le groupe de Szargut et Valero critique l'EdR défini à l'équilibre par Ahrendts [55], affirmant que la Terre n'est pas dans un état d'équilibre thermodynamique. Pourtant, ce même groupe propose un EdR basé sur un état d'équilibre [31, 56], ce qui semble paradoxal.

Deuxième contradiction : Bien que ce groupe recommande un EdR à l'équilibre, il définit sa composition en se basant sur les éléments les plus courants d'une Terre qui n'est pas à l'équilibre. Cela soulève des questions sur la cohérence de leur méthode, car leurs propres critères d'équilibre ne sont pas pleinement respectés.

Ces incohérences posent des problèmes pour l'application pratique de l'exergie. Par exemple, dans un tableau de l'article de Szargut [56], on compare les valeurs d'exergie selon les choix de composition de l'EdR, en fonction de la substance la plus abondante ou la plus stable³. Les écarts observés sont significatifs : les résultats peuvent varier dans un rapport de 1,11 à 11,6. Cela montre à quel point le choix de l'EdR peut influencer fortement les calculs d'exergie.

Complexité d'interprétation

Les méthodes exergétiques précédemment introduites présentent des limitations significatives dans leur interprétation et dans ce qu'elles apportent à l'ACV. Du fait de leurs différences dans leur modélisation, leur scope pour l'ACV varie entre de la caractérisation de flux élémentaires à un niveau *midpoint* à l'évaluation d'impact au niveau *endpoint*. Les méthodes CExC de Szargut et al. [40] et Exergetic cost de Lozano et Valero [41] s'arrêtent à une caractérisation des flux sans donner d'interprétation sur l'impact de l'utilisation des ressources.

À l'inverse, les méthodes CExD de De Meester et al. [37] et CEENE de Dewulf et al. [43] ont été développées pour l'évaluation des impacts, mais elles diffèrent dans leurs finalités et leur interprétation. La méthode CExD évalue l'exergie extraite de la nature et transférée dans le système technologique, tandis que CEENE mesure l'exergie totale dont le système naturel est privé. Cette divergence conceptuelle conduit à des évaluations distinctes des ressources. De plus, CExD s'éloigne des avantages fondamentaux de l'exergie en introduisant une allo-

3. Une substance désigne un ensemble d'éléments du tableau périodique

cation économique pour certaines ressources minérales, ce qui en limite la cohérence avec les principes de l'exergie [37]. Par ailleurs, la méthode ERC de Valero et al. [31] est également critiquée pour son manque de cohérence avec l'idée que l'exergie peut se départir des critères économiques et technologiques. Sa dépendance aux technologies minières actuelles restreint sa pertinence, en particulier dans une perspective à long terme.

En évaluation d'impact, les différences d'interprétation des indicateurs exergétiques compliquent leur adoption dans la communauté EICV. Le choix d'une méthodologie semble parfois arbitraire, selon les mécanismes environnementaux évalués. Bien que l'exergie soit souvent perçue comme une mesure de la valeur à conserver des ressources, cette interprétation reste peu justifiée dans le contexte des impacts environnementaux. Elle ne répond pas pleinement aux enjeux soulevés en section 1.1.3, tels que la fonctionnalité des ressources ou les impacts liés à leur dissipation [17, 27, 36, 49].

Ces limites mettent en évidence la nécessité d'une étude approfondie de la pertinence même de l'exergie pour évaluer les impacts de l'utilisation des ressources. Les questions fondamentales persistent : les contraintes résident-elles dans la définition du système ou dans l'utilisation même de l'exergie ? Pourquoi l'interprétation des résultats obtenus à partir des méthodes basées sur l'exergie est-elle si complexe ? En conclusion, ne sous-estimons-nous pas la part de subjectivité et les limites pratiques de l'exergie pour évaluer l'accessibilité et l'utilisation des ressources ?

1.2 Objectifs de recherche

L'objectif général de ce projet de recherche est de clarifier la pertinence d'un indicateur basé sur l'exergie pour l'évaluation d'impact de l'utilisation des ressources. Plus précisément, ce projet de maîtrise a pour objectif principal d'**évaluer le potentiel de l'exergie comme indicateur thermodynamique apte à représenter l'impact de l'utilisation des ressources**, en analysant si l'utilisation d'indicateurs exergétiques permet d'obtenir des résultats facilitant la prise de décision en faveur des entités que nous souhaitons protéger dans le cadre de l'évaluation des impacts liés à l'utilisation des ressources.

L'objectif de ce projet n'est pas de développer une nouvelle méthode basée sur le concept d'exergie, ni d'harmoniser les méthodes existantes. Il n'a pas non plus pour but de déterminer quelles méthodes, avec ou sans recours à l'exergie, sont les plus adaptées à l'évaluation des impacts liés à l'utilisation des ressources.

L'objectif est d'évaluer le degré de cohérence entre le concept d'exergie et la quantification des impacts des ressources dans le cadre de l'ACV. En prenant en compte les hypothèses

fondamentales associées à l'exergie, ce projet permettra d'identifier son potentiel ainsi que ses limites en tant qu'indicateur. L'objectif principal sera découpé en plusieurs sous-objectifs :

1. Définir et la clarifier le concept d'exergie appliquée aux ressources naturelles.
2. Concevoir un modèle de chemin d'impact basé sur l'exergie, rendant explicite ce que l'on souhaite protéger des ressources quand on utilise un indicateur exergétique.
3. Estimer les biais associés à l'utilisation de l'exergie pour différents types de ressources, en se basant sur des données relatives à la phase d'extraction.

Les livrables du projet sont les suivants : un article scientifique soumis à une revue avec comité de lecture (voir dans le chapitre 4 de ce document) et ce présent mémoire.

1.3 Plan du mémoire

Ce mémoire est rédigé «par article», ce qui signifie que l'article scientifique élaboré au cours du projet de maîtrise, actuellement soumis au journal *International Journal of Life Cycle Assessment*, est directement intégré dans le corps du mémoire.

Le plan de ce mémoire se présente de la manière suivante : dans un premier temps ce présent Chapitre 1, apporte une revue de littérature exhaustive sur les méthodes d'impact pour basée sur le concept d'exergie et permettra de répondre à la première question de ce projet. La revue de littérature sera par la suite appuyée par le Chapitre 2, qui présente le concept d'exergie en détail. Les deux premiers chapitres permettent d'atteindre le premier sous-objectif. Le Chapitre 3, résume la méthodologie utilisée dans l'article présenté lui dans le Chapitre 4. L'article permet d'atteindre tous les objectifs donnés ci-dessus, et présente les résultats du projet de recherche. Le mémoire se clôture par une discussion sur les perspectives du projet de recherche en Chapitre 5 et sur une conclusion en Chapitre 6.

CHAPITRE 2 THÉORIE DE L'EXERGIE

Dans ce chapitre, nous introduisons le concept d'exergie, qui permet d'évaluer le potentiel maximum des ressources naturelles à produire du travail utile. Une définition approfondie de l'exergie est proposée, dépassant la brève explication donnée dans l'introduction. Ce chapitre pose ainsi les bases nécessaires pour déterminer les valeurs exergétiques de diverses ressources naturelles, répondant au premier sous-objectif du projet et ouvrant la voie à l'atteinte des objectifs suivants. Il est structuré en trois sections : la section 2.1 introduit la définition générale du concept, la section 2.2 examine en l'exergie physique, et enfin, la section 2.3 explore en détail l'exergie chimique, composante centrale de ce projet.

2.1 Définitions

Comme introduit en section 1.1.5, l'exergie d'un système (un système représente un ensemble de flux de matières) est définie comme étant la quantité **maximale** de travail pouvant être obtenue lorsque le système est amené à un état d'équilibre thermodynamique avec les composants du système qui l'entourent par le biais d'un processus réversible [30, 31]. Ainsi, l'énergie d'un système qui serait effectivement disponible pour effectuer une tâche donnée sous la forme d'un travail tout en étant en contact avec l'environnement ne serait égale qu'à une partie de l'énergie du système. Autrement dit, toute la quantité de travail qu'un système possède ne serait pas réellement disponible pour accomplir une tâche. Ce travail ne serait disponible que jusqu'à ce que le système atteigne un équilibre thermodynamique. L'exergie représente la variation d'un système par rapport à l'état d'équilibre, qui est en fait une représentation de son potentiel de travail utile.

L'exergie, comparée à l'énergie, est une fonction d'état du système considéré, ainsi que de l'état de son environnement. Cet environnement est défini en spécifiant sa température, sa pression et sa composition chimique. L'exergie est seulement conservée si le changement d'état se fait par un procédé réversible. Sinon, celle-ci est détruite et représente des pertes exergétiques. Les pertes exergétiques sont des pertes de travail potentiel dans le système.

Les pertes d'exergie sont dues à l'irréversibilité des procédés. Plus leur irréversibilité est grande plus la destruction d'exergie augmente. En effet, l'exergie est consommée dans tous les processus du monde réel à mesure que l'entropie est produite, conformément à la 2^e loi de la thermodynamique. Celle-ci est déterminée par la loi de Gouy-Stodola qui représente les

pertes irréversibles d'exergie [57] (2.1) :

$$\delta B = T_0 \Sigma \Delta S$$

Avec δB = Exergie détruite [MJ] (2.1)

T_0 = Température de l'environnement [K]

S = Entropie produite [MJ/K]

Un processus réversible, quant à lui, peut être inversé une fois qu'il a eu lieu et ne laissera aucun changement dans son système ou son environnement [58]. Les processus réversibles permettent de conserver la quantité de travail utile disponible dans une ressource. Les processus réversibles sont seulement théoriques et ne peuvent jamais être observés.

Il faudrait un temps infini ou une surface infinie et éviter toutes frictions, toutes différences de température finit lors de transfert de chaleur et tout mélange de substances pour parvenir à la réversibilité [57, 58].

L'irréversibilité d'un système est influencée par le procédé utilisé, par l'état de départ et d'arrivée ainsi que par les flux entrants dans le système. Ces derniers peuvent être caractérisés par une valeur d'exergie de par leur habilité à produire un travail, les flux sortants du système en possèdent aussi. Or, si l'exergie des flux sortants est moins élevée que l'exergie des flux entrants, c'est à dire : si les flux sortants possèdent une habilité à fournir un travail plus faible que ce qu'il a fallu pour les produire, il y a alors une perte d'exergie. Pour ce qui est d'un système avec des transferts thermiques, le calcul de la quantité de travail maximale disponible peut se faire avec le facteur de Carnot (2.2).

$$W_{max} = Q \times \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (2.2)$$

Avec

Q = le transfert de chaleur

T_0 = la température ambiante

$1 - \frac{T_0}{T}$ = le facteur de Carnot caractérisant la qualité de la chaleur

On donne l'exemple suivant où une centrale électrique avec un rendement thermique global de 40%, reçoit 100 MW de transfert de chaleur de gaz naturel à une température moyenne de 1300 K et rejette du condenseur un transfert de chaleur à 323,15 K vers l'extérieur à une température ambiante de 293,15 K. Par ce procédé, 60 MW de chaleur est rejeté au

condenseur et 40 MW d'électricité est produit.

La quantité maximale de travail disponible à l'entrée du procédé est de :

$$W_{max,in} = 100 \times \left(1 - \frac{293,15}{1300}\right) = 77,45 \text{ MW} \quad (2.3)$$

Tandis que la quantité maximale de travail disponible à la sortie du procédé est de :

$$W_{max,out} = 60 \times \left(1 - \frac{293,15}{323,15}\right) + 40 = 5,57 + 40 = 45,57 \text{ MW} \quad (2.4)$$

Avec les 40 MW correspondant à l'électricité produite qui peut théoriquement être convertie en travail utile sans aucune perte.

Les pertes exergétiques dues à l'irréversibilité du procédé sont de :

$$\Delta W_{max} = W_{max,in} - W_{max,out} = 31,88 \text{ MW}$$

Il est possible de représenter les résultats sous la forme d'un diagramme Sankey en Figure 2.1a pour les flux énergétiques et d'un diagramme de Grassmann pour les flux exergétiques en Figure 2.1b.

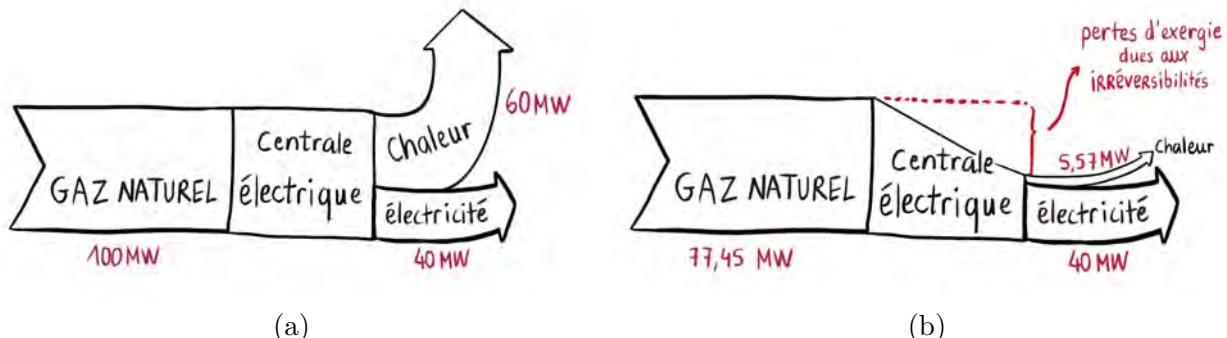


FIGURE 2.1 (a) Diagramme Sankey représentant les flux énergétiques pour l'exemple du procédé avec la centrale thermique et (b) Diagramme Grassmann représentant les flux exergétiques de ce même procédé.

L'exergie comme l'énergie peut se classifier en différentes formes d'exergie, elles sont représen-

tées dans la Figure 2.2. Les quatre composantes principales sont l'exergie cinétique et l'exergie potentielle regroupées dans l'exergie physique mécanique sur la Figure 2.2, l'exergie physique thermo-mécanique et enfin l'exergie de concentration et chimique. Les exergies cinétique et potentielle d'un flux correspondent respectivement aux valeurs de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle de ce flux. Cependant, ces exergies sont généralement négligeables par rapport aux valeurs de l'exergie physique et chimique du flux considéré [57]. Les deux types restants sont utilisés pour l'analyse des flux de matière : l'exergie physique thermo-mécanique (on simplifiera par **exergie physique**) et l'exergie de concentration et réaction chimique.

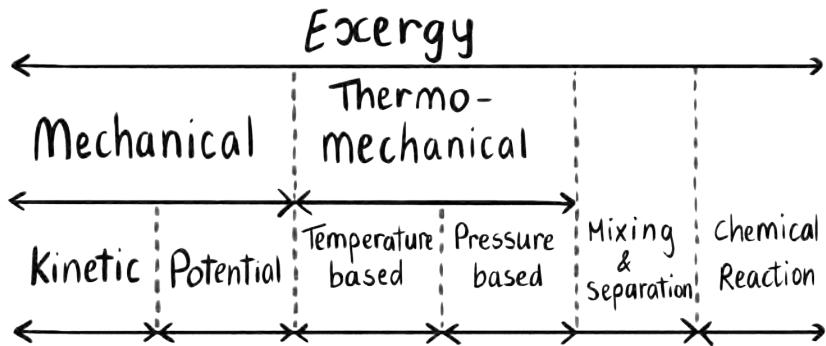


FIGURE 2.2 Classification des types d'exergie repris de [59]

2.2 Exergie physique

L'exergie physique est définie par le calcul d'enthalpie et de l'entropie d'un flux du système. La détermination de l'exergie physique nécessite de calculer la variation de l'enthalpie H et de l'entropie S entre l'état donné et l'état de référence à l'équilibre thermodynamique définie par une température T_0 et une pression P_0 sans qu'il y ait de modification de la composition chimique de la substance considérée dans le système [57]. Les différences de température et de pression, entre l'état donné et l'état du même système à équilibre, conditionnent l'amplitude de l'exergie physique.

Ainsi, l'exergie physique par unité de masse d'un flux de matière, dans un état donné à une température T et pression P , est la suivante :

$$\begin{aligned}
 b_{ph} &= \Delta H - T_0 \Delta S \\
 &= H - H_0 - T_0 (S - S_0)
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Avec

b_{ph} = exergie physique du flux considéré [MJ]

H = enthalpie spécifique du flux considéré [MJ/kg]

H_0 = enthalpie spécifique du flux considéré à la pression et à la température de l'EdR [MJ/kg]

T_0 = température de l'EdR [K]

S = entropie spécifique du flux considéré [MJ/kg.K]

S_0 = entropie spécifique du flux considéré à la pression et à la température de l'EdR [MJ/kg.K]

2.3 Exergie chimique

L'exergie chimique est la plus importante de ce projet, il est donc utile de bien la définir. Nous avons déjà expliqué que l'exergie d'un système représente la quantité **maximale** de travail utile pouvant être obtenue lorsque ce système passe d'un état défini à un état d'équilibre complet avec l'EdR (voir section x), sans intervention d'un autre système. De la même manière, l'exergie peut être définie comme le travail **minimum** nécessaire pour créer ce système, avec sa structure et sa concentration, à partir des substances présentes dans l'EdR [31, 57]. Ainsi, l'exergie chimique reflète le déséquilibre chimique entre le système étudié et l'EdR, et elle est toujours positive.

2.3.1 L'environnement de référence

Le calcul de l'exergie d'une ressource naturelle nécessite la définition d'un EdR. Cet EdR est conceptualisé comme un état d'équilibre thermodynamique ultime de la planète, où toutes les substances ont atteint leur niveau maximal de réaction, dispersion et mélange. La composition chimique spécifique de l'EdR détermine les valeurs d'exergie de référence, qui à leur tour influencent les calculs d'exergie pour diverses ressources. L'EdR ne subit que des processus internes réversibles dans lesquels son état reste inchangé, c'est-à-dire que sa température, sa pression et les potentiels chimiques pour chacune des substances le composant restent constantes [50].

La variabilité dans la définition de l'EdR entraîne des différences dans les valeurs d'exergie calculées. Cette relation met en évidence le lien fondamental entre le calcul de l'exergie et les caractéristiques thermodynamiques spécifiques de l'EdR sélectionné soulignant ainsi l'importance cruciale du choix de cet environnement de référence dans l'analyse exergétique.

Gaudreau a réalisé une analyse des exigences dans la définition de différents environnements de référence trouvés dans la littérature. Son travail est retranscrit dans le tableau 2.1.

TABLEAU 2.1 Les différents environnements de référence et leurs exigences à partir de [51]

Auteur	Environnement de référence	Valeur exergétique
Ahrendts [55]	<ul style="list-style-type: none"> Doit inclure trois phases (solide, liquide, gaz) Système d'exergie chimique en régime permanent Température constante 	<ul style="list-style-type: none"> L'exergie d'une substance doit correspondre à la valeur d'une ressource rare, en tenant compte des perspectives thermodynamiques et économiques. Les valeurs d'exergie ne doivent pas être excessivement élevées pour éviter une surestimation des efficacités.
Szargut, Valero et al., Valero [32, 46, 56, 60]	<ul style="list-style-type: none"> Doit inclure trois phases (solide, liquide, gaz) Système d'exergie chimique en régime permanent Température et pression constantes 	<ul style="list-style-type: none"> Les niveaux d'exergie doivent être suffisamment élevés pour préserver l'intégrité thermodynamique du capital naturel. Choisir les états physiques (gaz, liquide, solide) de certaines substances de référence afin d'éviter des exergies négatives.

Ahrendts propose un modèle d'EdR en considérant une croûte terrestre d'épaisseur variable entre 1 et 1000 mètres, les valeurs d'exergie résultantes dépendent de cette épaisseur [55]. Cet environnement de référence s'écarte considérablement de la composition terrestre actuelle et de celle d'une Terre potentiellement dégradée [55].

L'EdR le plus accepté est celui de Szargut et al., il a été utilisé dans la méthode CExD de Bösch et al [42] et dans d'autres méthodes exergétiques présentées précédemment en section 1.1.5. Il correspond à un modèle de Terre dissipée thermodynamiquement, composé d'une hydrosphère, d'une atmosphère et d'une croûte solide parfaitement mélangées, où aucune interaction n'existe entre les trois sous-systèmes [60]. Cet EdR est défini avec une température de T_0 (298,15K) et une pression de P_0 (1 atm). La composition de l'environnement de référence doit être similaire à l'environnement réel dans lequel le processus se déroule [50]. Dans l'EdR proposé par Szargut [32], constitué de 85 substances de référence, le choix a été fait de représenter et respecter les deux critères suivant [31] :

- les substances les plus abondantes dans l'environnement réel
- les substances les plus stables et donc proches de l'état d'équilibre (ce qui signifie qu'aucun changement de composition ou de réaction n'est possible)

Le modèle d'EdR proposé par Szargut se limite à une substance de référence unique par élément. Cette simplification ne reflète pas la complexité d'une Terre dégradée, qui comprendrait une multitude de substances. De plus, ces modèles s'appuient sur des valeurs actuelles plutôt que sur des projections futures. Une limitation notable de ces modèles est l'apparition d'exergies négatives pour certains minéraux plus stables que leur substance de référence [31].

Une tentative plus récente de Valero et al. de représenter un EdR plus proche de la conceptualisation donnée en début de section a permis la création de *Thanatia* [46, 47]. Cet EdR représente une terre thermodynamiquement morte avec comme composition [47] :

- L'hydrosphère, incluant les eaux souterraines, les rivières et les lacs, qui tendrait vers une composition similaire à celle des océans.
- L'atmosphère présenterait des concentrations significativement plus élevées en CO_2 et autres polluants, résultant de la combustion totale des combustibles fossiles.
- La croûte continentale, bien que dépourvue de combustibles fossiles, maintiendrait une composition similaire à l'actuelle, mais avec une dispersion complète des gisements à haute teneur en minéraux.

Thanatia comprend une liste de la composition et de la concentration moyenne des 294 minéraux les plus abondants de la croûte terrestre. Ces concentrations représentent la limite inférieure des teneurs en minerai, en dessous duquel l'exergie d'une mine deviendrait nulle [46, 47]. *Thanatia* n'est pas un 'outil' de calcul des exergies chimiques, mais plutôt comme une base de référence à partir de laquelle on peut calculer les exergies de concentration.

Il existe encore aujourd'hui des limitations dans la définition de l'EdR, plusieurs ont été abordées dans la section 1.1.6. Ces limites seront approfondies dans la discussion en Chapitre 5. Les EdR de Szargut [32] et de Valero et al [46, 47] sont, malgré leurs limites, acceptés par la communauté scientifique des méthodes exergétiques [31, 37, 42, 43] et aussi largement employés dans diverses analyses exergétiques [61–67]. Ils seront utilisés pour le calcul d'exergie dans le restant de ce mémoire.

2.3.2 Exergie des ressources matérielles

Une fois la définition d'un EdR clarifiée, il est possible d'évaluer l'exergie de ressources naturelles. Celle-ci se divise en deux parties : l'exergie de réaction chimique et l'exergie de concentration.

Exergie de réaction chimique

L'exergie de réaction chimique (simplifier par la suite par exergie chimique) représente l'exergie d'une substance aux conditions de température et de pression ambiantes. Elle est définie comme le travail maximal pouvant être obtenu lorsque cette substance est amenée de manière réversible à l'état de référence, en utilisant l'environnement comme source de chaleur et uniquement les substances de référence nécessaires pour réaliser ce processus. L'exergie de réaction chimique standard repose sur l'hypothèse conventionnelle de conditions standard de température et de pression ambiantes, ainsi que d'une concentration standard des substances de référence dans l'environnement naturel.

L'exergie chimique b_{ch} d'un matériau i quelconque peut être déterminée en utilisant les valeurs d'exergie des substances de référence et en tenant compte de sa réaction de référence [32]. L'énergie associée à cette réaction de référence est représentée par l'énergie de Gibbs standard, ΔG_f (Kj/mol). Elle s'ajoute à l'exergie chimique du matériau calculé, qui correspond à la somme des exergies chimiques des substances de référence constituant le matériau (2.6).

$$b_{ch,i} = \Delta G_{f,i} + \sum_j n_{j,i} b_{ch,j} \quad (2.6)$$

avec

$\Delta G_{f,i}$: énergie de Gibbs en kJ/mol

$b_{ch,j}$: exergie chimique standard de référence de l'élément j contenu dans i en kJ/mol

$n_{j,i}$: la quantité de moles de l'élément j par mole de la substance i

La formule de l'énergie de Gibbs (2.7) lors de la formation d'une mole d'une substance à partir de ses éléments constitutifs dans leur état de référence est :

$$G = H - TS \quad (2.7)$$

avec

T_0 : la température de l'EdR [K]

H : l'enthalpie

S : l'entropie

Pour calculer la variation de l'énergie de Gibbs (ΔG) lors d'une réaction ou d'un processus,

on utilise la formule (2.8) :

$$\Delta G = \Delta H - T_0 \Delta S \quad (2.8)$$

Cette équation est fondamentale en thermodynamique et permet de déterminer la spontanéité d'une réaction :

- Si $\Delta G < 0$, la réaction est spontanée (exergonique)
- Si $\Delta G > 0$, la réaction n'est pas spontanée (endergonique)
- Si $\Delta G = 0$, le système est à l'équilibre

Dans le cadre du calcul de l'exergie chimique, les réactions sont sélectionnées de manière à garantir une variation d'énergie de Gibbs (ΔG) systématiquement négative.

Pour ce qui est du calcul de l'exergie chimique des substances de référence, la concentration de cette substance dans l'environnement est utilisée. On parle ici d'une concentration moyenne sur l'ensemble du globe correspondant à la concentration de la substance dans l'EdR. Cependant, la croûte terrestre constitue un mélange complexe de solutions solides, rendant complexe le calcul de l'exergie chimique. Nous ne pouvons qu'en estimer l'exergie de manière approximative, en supposant que les espèces de référence se comportent comme des constituants d'une solution idéale. Les valeurs de concentration molaire standard sont dérivées des concentrations massiques des plus récentes publications sur le sujet [68]. Pour les substances de référence gazeuses et solides, la formule est la suivante (2.9) :

$$b_{ch,j} = +RT \ln \left(\frac{1}{z_{0,j}} \right) = -RT_0 \ln(z_{0,j}) \quad (2.9)$$

avec

$z_{0,j}$: fraction molaire standard conventionnelle de la substance j dans l'environnement

R : Constante universelle des gaz parfaits (8,314 kJ/(mol.K))

T_0 : la température de l'EdR [K]

Les valeurs de l'exergie chimique standard des substances de référence gazeuses O₂, H₂O, CO₂, N₂ sont calculées en priorité, car elles sont nécessaires pour le calcul de l'exergie chimique standard des substances de référence non gazeuses. Le tableau 2.2 présente les exergies chimiques de la plupart des éléments, selon les valeurs calculées par [32] et [47]. Les différences entre ces deux sources varient de -5,5 à 4,3 kJ/mol, rendant leurs résultats globalement équivalents. Pour la suite du mémoire, les calculs utiliseront les valeurs d'exergie fournies par [47].

TABLEAU 2.2 Exergie chimique des éléments

Élément	Szargut (kJ/mol) [32]	Valero (kJ/mol) [47]	Delta	b_{ch} (kJ/kg)
Ag	70.2	69.7	0.5	646.15
Al	795.7	794.3	1.4	29440.33
As	494.6	494.1	0.5	6595.03
Au	50.5	51.5	-1	261.46
B	628.5	628.6	-0.1	58149.86
Bi	274.5	274.8	-0.3	1314.96
Br ₂	101.2	101.3	0.1	632.63
Cd	293.8	293.2	0.6	2608.31
Ce	1054.6	1054.2	0.4	7523.55
Cr	584.7	584.4	0.3	11239.33
Cu	134.2	134	0.2	2108.58
Dy	975.9	974.9	1	5999.38
Er	972.8	973	-0.2	5817.29
Eu	1003.8	1003.9	-0.1	6606.34
Fe	374.3	376.8	-2.5	6746.64
Ga	514.9	514.6	0.3	7380.95
Ge	557.6	556.5	1.1	7662.12
H ₂	236.1	236.1	0	118050.00
Ho	978.6	979.3	-0.7	5937.67
I ₂	174.7	175	-0.3	1377.95
In	436.8	437.4	-0.6	3809.44
K	366.6	366.5	0.1	9373.40
La	994.6	994.3	0.3	7157.87
Li	393.0	392.9	0.1	56613.83
Lu	945.7	946.6	-0.9	5410.07
Mg	626.1	629.6	-3.5	25898.81
Mn	487.7	484.6	3.1	8820.53
Mo	730.3	730.5	-0.2	7613.34
N ₂	0.7	0.7	0	25.00
Nb	899.7	900.2	-0.5	9688.95
Nd	970.1	969.8	0.3	6723.52
O ₂	3.97	4	-0.03	125.00
Pb	232.8	232.2	0.6	1120.66
Pd	146.1	145.7	0.4	1369.10
Pt	141.0	146.5	-5.5	750.97
Re	559.5	561.3	-1.8	3014.34
Rh	179.7	183	-3.3	1778.25
Ru	318.6	315.2	3.4	3118.63

TABLEAU 2.3 Exergie chimique des éléments (suite)

Élément	Szargut [kJ/mol] [32]	Valero [kJ/mol] [47]	Delta	b_{ch} [kJ/kg]
Sc	925.2	923.8	1.4	20547.15
Se	346.5	346.7	-0.2	4390.83
Sm	993.6	993.9	-0.3	6610.14
Sn	551.9	547.6	4.3	4612.92
Ta	974.0	974.8	-0.8	5387.12
Tb	998.4	999	-0.6	6285.79
Ti	907.2	904.4	2.8	18892.83
V	720.4	721.5	-1.1	14163.72
W	827.5	827.7	-0.2	4502.28
Y	965.5	966.3	-0.8	10868.29
Yb	944.3	944.9	-0.6	5460.59
Zn	339.2	339	0.2	5185.07
Zr	1083.4	1077.4	6	11811.01

Exergie de concentration

Le problème fondamental de concentration peut être illustré en considérant la dilution (ou la formation) d'un mélange de ressources d'un état concentré à un état où les ressources sont dispersées de manière homogène dans la croûte terrestre (ou inversement), correspondant à l'EdR *Thanatia*. Comme introduit en section 2.3.1, l'exergie se détruit par l'effet de processus irréversible et est donc liée à la création d'entropie. L'exergie de la concentration ou la dilution de matières peut être évaluée en utilisant une interprétation statistique de l'entropie via l'équation de Boltzmann :

$$S = k \ln \Omega \quad (2.10)$$

avec

S : l'entropie en [J/K]

k : la constante de Boltzmann, ayant une valeur de $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

Ω : le nombre de micro-états accessibles au système

Le travail nécessaire pour séparer une substance d'un mélange ne suit pas un comportement linéaire en fonction de sa concentration. Au contraire, la deuxième loi de la thermodynamique reflétée dans l'équation ci-dessus et représentée à la Figure 2.3 stipule que l'effort requis pour séparer une substance d'un mélange suit une courbe logarithmique négative en fonction de la

concentration. Cela signifie que lorsque la concentration tend vers zéro, l'énergie nécessaire pour concentrer une ressource à un état pur tend vers l'infini. Une purification complète est donc impossible.

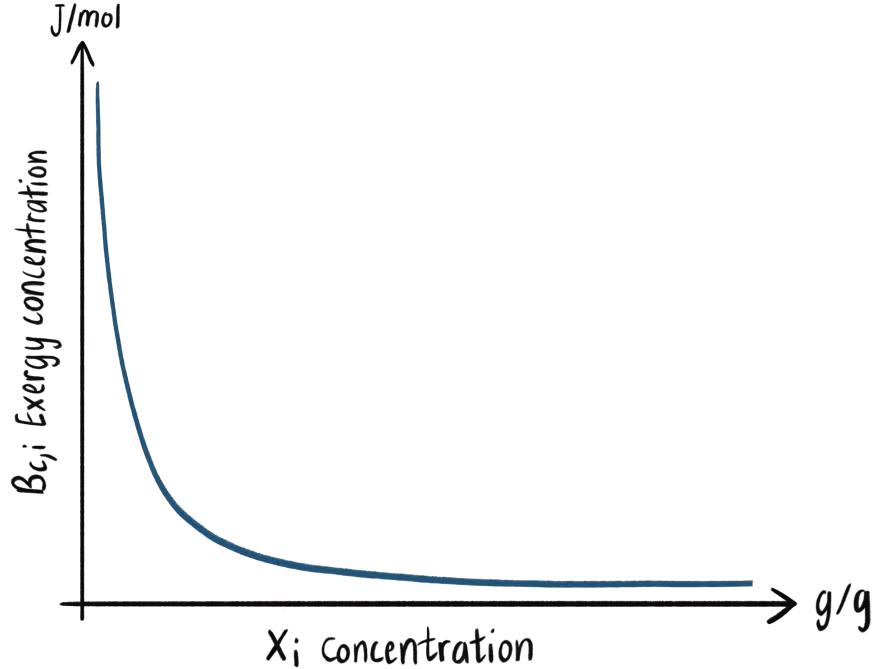


FIGURE 2.3 Représentation graphique de l'exergie nécessaire pour concentrer une ressource en lien avec l'équation 2.11

Si on remplace l'équation 2.10 dans l'équation 2.1 on obtient un minimum de travail lié aux pertes exergétiques nécessaire à la concentration d'une ressource de l'environnement de référence de Valero et al. [47] à un état plus concentré. C'est également équivalent à un maximum de travail obtenable par la dilution d'une ressource dans l'environnement de référence de Valero et al. [47] à partir d'un état plus concentré. Ce travail minimum ou maximum selon si l'on regarde la concentration ou dilution de ressources représente l'exergie de concentration (2.11).

$$b_{c,i} = +RT \ln\left(\frac{x_{i,\text{état initial}}}{x_{i,\text{état final}}}\right) \quad (2.11)$$

avec

$x_{i,\text{état initial}}$: la concentration de l'élément i dans un stock défini, en g/g

$x_{i,\text{état final}}$: la concentration de la ressource dans *Thanatia* (état complètement dispersé), en g/g

R : la constante universelle des gaz parfaits (8,314 kJ/(mol.K))

T_0 : la température de l'EdR [K]

L'équation 2.11 voit sa valeur augmenter lorsque l'on cherche à extraire une ressource issue d'un stock à haute concentration, proche d'un état pur (voir Figure 2.4). En effet l'exergie de concentration d'une ressource est d'autant plus élevée que sa concentration dans *Thanatia* est faible, et qu'il existe encore des gisements concentrés, comme pour des métaux tels que l'or, l'argent, le palladium ou le platine. L'exploitation de ces gisements nécessite de puiser dans des ressources qui ont mis des centaines d'années à se concentrer. L'exergie de concentration illustre ici le caractère non renouvelable de ces extractions ainsi que le travail accompli par notre planète pour former ces gisements concentrés.

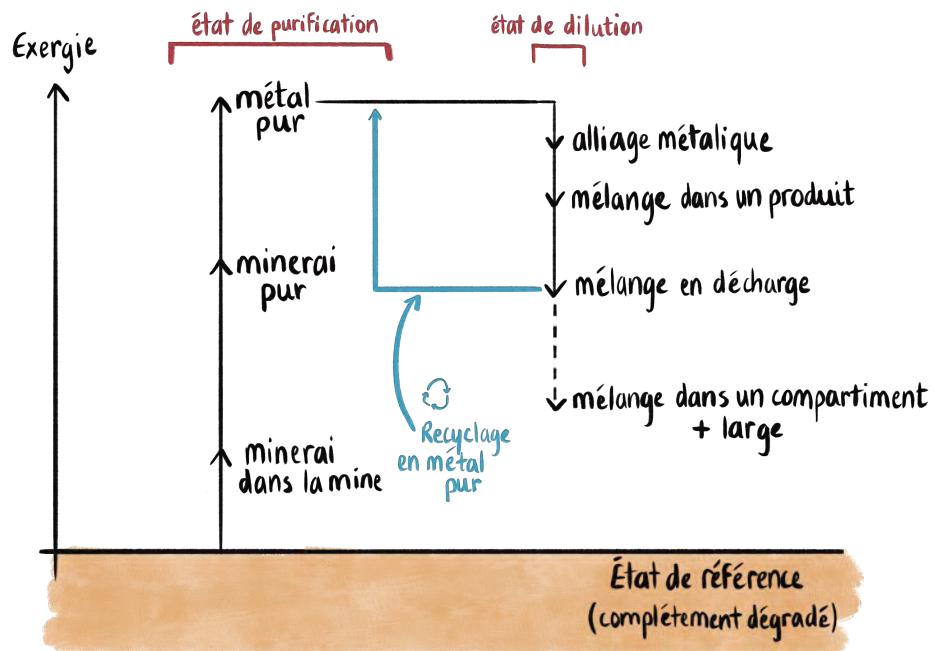


FIGURE 2.4 Quantité d'exergie nécessaire ou obtenable théoriquement pour purifier ou diluer un métal à partir de différent état de concentration

L'analyse de l'équation 2.11 révèle qu'une évaluation exergétique des ressources minérales nécessite de connaître la teneur de la ressource i dans les gisements actuels, c'est-à-dire la

proportion de l'élément d'intérêt dans le gisement, désignée par x_i . Il est également indispensable de disposer de la concentration moyenne de cette ressource $x_{i,\text{état final}}$ dans la croûte terrestre. L'élément logarithmique de l'exergie de concentration dans l'équation 2.11 représente le coût exergétique économisé en raison de la forme concentrée de la ressource, en comparaison à sa dispersion dans la croûte terrestre.

Valero et al. [31] ont effectué le calcul de l'exergie de concentration pour une cinquantaine d'éléments, ces valeurs sont retranscrites dans le tableau 2.4. La valeur de la «concentration de l'élément i dans un stock défini nécessaire» pour le calcul de l'exergie de concentration correspond à la concentration moyenne dans les mines actuellement exploitées de la substance où l'élément i est le plus fréquemment présent (par exemple, l'Argentite pour l'Argent) [31, 47, 69].

Avec les valeurs d'exergie chimique et de concentration, il est possible de calculer l'exergie totale par unité d'une ressource non-énergétique. C'est simplement la somme de l'exergie chimique et de l'exergie de concentration (2.12) :

$$b_{T,i} = b_{ch,i} + b_{c,i} \quad (2.12)$$

avec

$b_{T,i}$: L'exergie totale par unité de ressource i [kJ/kg]

$b_{ch,i}$: L'exergie chimique par unité de ressource i [kJ/kg]

$b_{c,i}$: L'exergie de concentration par unité de ressource i [kJ/kg]

2.3.3 Exergie des ressources fossiles

Les combustibles fossiles sont un type de minéraux, et leurs exergies chimique et de concentration peuvent donc être calculées avec les équations 2.6 et 2.11. Les combustibles liquides et gazeux ont leur valeur exergétique étroitement liée à leur exergie chimique.

La complexité chimique et l'hétérogénéité des combustibles rendent difficile la prédiction de leur exergie chimique. Plusieurs modèles thermodynamiques ont cependant été proposés pour calculer l'exergie des combustibles fossiles. Szargut et al [57], par exemple, a calculé les ratios exergie/pouvoir calorifique, puis estimé des valeurs moyennes de ces ratios en prenant en compte la composition chimique des combustibles liquides et gazeux. En outre, il a été largement démontré que l'exergie chimique des combustibles peut, dans de nombreux cas, être

TABLEAU 2.4 Exergie de concentration d'une substance, mesurée entre sa concentration dans *Thanatia* et sa concentration dans une mine, basée sur les données de [31, 47]

Élément	Substance où l'élément est le plus fréquemment présent [69]	Concentration mine x_i [g/g]	Concentration <i>Thanatia</i> $x_{i,\text{état final}}$ [kJ/kg]	b_c
Ag	Argentite	4.40E-06	5.30E-08	44.20
Al	Gibbsite	4.60E-01	8.15E-02	54.99
As	Arsenopyrite	1.00E-02	4.80E-06	116.33
Au	Gold	2.75E-07	1.50E-09	65.58
B2O3		2.00E-01	1.70E-05	333.72
BaSO4	Barite	8.30E-01	4.14E-06	129.67
Be	Beryl	1.00E-02	2.10E-06	39.05
Bi	Bismuthinite	9.00E-03	1.60E-07	52.71
Br		5.00E-03	5.00E-08	357.18
C	Graphite	5.00E-01	1.99E-03	1 140.64
CaF2	Fluorite	2.50E-01	1.32E-06	385.78
CaSO42H2O	Gypsum	8.00E-01	1.08E-04	128.29
Cd	Greenockite	1.00E-04	9.00E-08	120.32
Co	Linnaeite	1.08E-03	1.73E-05	25.18
Cr	Chromite	4.35E-01	9.20E-05	93.70
Cs		2.33E-01	4.90E-06	-
Cu	Chalcopyrite	5.80E-03	2.80E-05	72.03
Fe	Hematite	5.11E-01	1.92E-02	50.93
Ga	in Bauxite	2.30E-05	1.75E-05	3.61
Ge	in Zinc	5.00E-05	1.40E-06	84.71
Group of minerals containing K, Na, Ca		4.50E-01	1.45E-01	-
Hf		6.00E-05	5.30E-06	33.70
Hg	Cinnabar	3.83E-03	5.00E-07	95.29
I		1.60E-04	7.00E-08	151.08
In	in Zinc	4.00E-04	5.60E-08	79.23
K		2.50E-01	2.32E-01	1.97
Li	Spodumene	4.00E-04	2.40E-05	37.47
Mg	Magnesite	4.50E-01	1.50E-01	32.30
Mn	Pyrolusite	3.15E-01	7.74E-04	171.32
Mo	Molybdenite	1.30E-04	1.10E-06	73.89
Nb	Ferrocolumbite	6.38E-03	1.20E-05	40.23
Ni	Garnierite (laterites)	1.30E-02	2.40E-05	18.01
Pb	Galena	2.05E-01	7.05E-05	82.62
Pd	Palladium	8.02E-07	3.95E-10	177.40
Pt	Platinum	8.02E-07	3.95E-10	96.77
Re		2.23E-04	1.98E-04	1.58
Ce2O3		9.70E-04	6.30E-05	20.65

TABLEAU 2.5 Exergie de concentration d'une substance, mesurée entre sa concentration dans *Thanatia* et sa concentration dans une mine (suite), basée sur les données de [31, 47]

Élément	Substance où l'élément est le plus fréquemment présent [69]	Concentration mine x_i [g/g]	Concentration <i>Thanatia</i> $x_{i,ER}$ [g/g]	b_c [kJ/kg]
Sb	Stibnite	3.78E-02	4.00E-07	83.60
Sn	Cassiterite	4.80E-03	2.10E-06	127.21
Sr		3.40E-01	3.20E-04	197.14
Ta	Tantalite	6.50E-03	9.00E-07	39.28
Te	Tetradymite	1.00E-06	5.00E-09	18.47
Th		3.00E-02	1.05E-05	85.01
Ti	Ilmenite	6.90E-03	3.84E-03	9.58
V	Vanadium	2.00E-02	9.70E-05	259.31
W		7.17E-03	1.90E-06	111.05
Zn	Sphalerite	4.06E-02	6.70E-05	162.97
ZrO ₂	Zircon	2.69E-03	1.93E-04	35.62

estimée de manière satisfaisante par l'utilisation des valeurs connues du pouvoir calorifique inférieur (PCI) ou supérieur (PCS) [32, 50, 57, 70] avec la formule suivante 2.13 :

$$b_{ch,i} = \beta \times PCI_i \quad (2.13)$$

avec

$b_{ch,i}$: L'exergie chimique par unité de ressource i [kJ/kg]

β : ratio entre l'exergie et le pouvoir calorifique de la ressource i

PCI_i : Pouvoir calorifique inférieur pour une ressource i [kJ/kg]

Les limites à l'utilisation de facteur β sont les suivantes :

- Cette méthode est une approximation et peut ne pas être aussi précise que des calculs plus détaillés ;
- Le facteur β peut varier selon la composition exacte du combustible.

Dans le tableau 2.6 sont répertoriés les facteurs β évalués par [32, 57].

Pour les combustibles liquides, le rapport entre l'exergie chimique et l'énergie chimique exprimée par PCI peut être déterminé à l'aide de la formule suivante 2.14 [32, 57] :

$$\beta = 1,0401 + 0.1728 \frac{h}{c} + 0.0432 \frac{o}{c} + 0.2169 \frac{s}{c} \left(1 - 2.0628 \frac{h}{c} \right) \quad (2.14)$$

où c , h , o et s représentent respectivement les fractions massiques de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et de soufre dans le combustible. Pour calculer l'exergie chimique d'un combustible solide, il est également nécessaire de prendre en compte la teneur en soufre, ainsi que le taux d'humidité et la quantité de cendres.

TABLEAU 2.6 Facteur β calculé à partir du pouvoir calorifique inférieur (PCI) ou supérieur (PCS) d'un combustible fossile [32, 57]

Combustible	Facteur β avec le PCI	Facteur β avec le PCS
Anthracite	1.09	1.03
Lignite	1.17	1.04
Coke	1.06	1.04
Fioul	1.07	0.99
Essence	1.07	0.99
Gaz naturel	1.04	0.99
Gaz de cokerie	1.00	0.89
Gaz de haut fourneau	0.98	0.97

Ce chapitre met en avant la complexité des calculs liés à l'exergie et souligne le défi de vulgariser ce concept tout en maintenant sa rigueur scientifique. Néanmoins, il a permis au lecteur d'acquérir une compréhension claire du concept d'exergie, en particulier de l'exergie chimique, essentielle pour la modélisation des impacts associés à l'utilisation des ressources. Le chapitre 3 suivant présentera les grandes lignes méthodologiques de l'article scientifique (chapitre 4), notamment sur l'intégration de l'exergie dans l'EICV et l'analyse de son potentiel d'application.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre détaille la méthodologie adoptée dans l'article, en explicitant les différentes étapes suivies et leur articulation avec les sections de l'article (Chapitre 4). Il met en évidence la manière dont chaque section contribue aux sous-objectifs de l'étude (voir Figure 3.1).

La revue de littérature présentée dans le chapitre 1 a permis d'identifier précisément les limites des méthodes exergétiques existantes et de définir les critères nécessaires pour atteindre l'objectif de ce mémoire : évaluer le potentiel de l'exergie en tant qu'indicateur thermodynamique pertinent pour quantifier l'impact de l'utilisation des ressources.

Dans la section 4.2, le chemin d'impact de l'utilisation des ressources via l'exergie est défini en abordant les problématiques liées à l'évaluation des ressources, notamment :

- la dissipation des ressources : les flux vers des puits ou des stocks inaccessibles aux utilisateurs futurs en raison de diverses contraintes. Ces contraintes empêchent l'exploitation des fonctions que les ressources pourraient offrir dans la technosphère [49].
- la perte de valeur instrumentale des ressources : c'est-à-dire leur utilité pour la société humaine [12, 71]. Dans un contexte exergétique, l'utilisation des ressources a un impact sur le potentiel de travail utile.

Ces problématiques, en lien avec les concepts d'exergie abordés dans le chapitre précédent, permettent d'établir des facteurs de caractérisation. Ces derniers quantifient la valeur exergétique des ressources en fonction des compartiments environnementaux dans lesquels elles ont été extraites ou émises. L'application de ces facteurs permet d'évaluer l'impact final associé à la dissipation d'un potentiel de travail résultant de l'utilisation des ressources. Ce potentiel correspond à une quantité d'exergie devenue inaccessible aux générations futures en raison de la dispersion des ressources dans des compartiments environnementaux où leur concentration est extrêmement faible. L'analyse porte ici non pas sur la quantité de ressources dissipées, mais sur le potentiel de travail dissipé, défini par :

- le travail maximal théoriquement obtenable lorsqu'un système atteint l'équilibre avec son environnement de référence ;
- le travail minimal théoriquement requis pour amener un système à un état donné ;

Dans la section suivante de l'article (section 4.3), le concept d'exergie est approfondi à travers une analyse des hypothèses fondamentales qui le sous-tendent, en insistant sur son fondement théorique lié aux procédés réversibles. Les valeurs exergétiques de différentes ressources sont évaluées, permettant une comparaison entre l'exergie de ressources énergétiques (telles que le charbon) et celle de ressources non énergétiques (telles que l'or et le cuivre). Le cheminement

d'impact détaillé dans la section 2 est appliqué à ces mêmes ressources, mettant en évidence les premières limites de l'exergie pour une évaluation conjointe de l'utilisation des ressources énergétiques et non énergétiques.

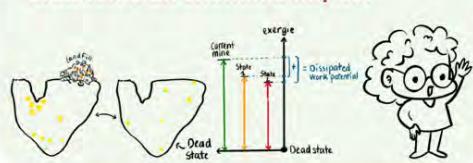
La section 4.4 de l'article approfondit ces limitations en fournissant des arguments quantitatifs. Cette analyse met en relief la différence entre le travail potentiel théorique représenté par l'exergie et le travail réellement disponible. Une comparaison entre le travail réel et théorique sera réalisée pour les ressources énergétiques et non énergétiques, suivie d'une analyse comparative des deux types de ressources. Ce travail permet ainsi d'évaluer le potentiel et, surtout, la pertinence de l'exergie comme indicateur de l'impact lié à l'utilisation des ressources.

Sous-objectif 2

Section 2 (article)

Problématiques liées à l'évaluation de l'impact de l'utilisation des ressources

Création d'un chemin d'impact

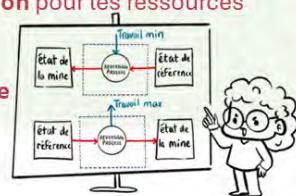


Sous-objectif 1

Section 3

Clarification et Calcul de l'exergie chimique et de concentration pour les ressources

- Réversibilité
- Travail théorique



Facteurs de caractérisation et valeurs exergétiques pour des ressources :



Sous-objectif 3

Section 4

Comparaison entre les valeurs de travail réel et de travail théorique



Légende

Données littérature

Données calculées

FIGURE 3.1 Schéma des différentes étapes méthodologiques de l'article

CHAPITRE 4 ARTICLE 1 : ASSESSING THE POTENTIAL OF EXERGY AS A THERMODYNAMIC RESOURCE-USE IMPACT INDICATOR

Soumis le 14 février 2025 à The International Journal of Life Cycle Assessment.

Contribution : Marie Lourioux : Rédaction - version originale, méthodologie, conceptualisation, conservation des données. Guillaume Majeau-Bettez : Rédaction - Révision et édition, validation, supervision. Cécile Bulle : Rédaction - Révision et édition, méthodologie. Jean-Philippe Harvey : Rédaction - Révision et édition, validation.

Marie Lourioux¹, Cécile Bulle^{2,3}, Jean-Philippe Harvey⁴, Guillaume Majeau-Bettez¹

1 CIRAIG, Department of Chemical Engineering, Polytechnique Montreal, C.P. 6079, succ. Centre-Ville, Montréal, Quebec, H3C 3A7, Canada

2 CIRAIG, Institute of Environmental Sciences, UQAM, Montreal, Quebec H2X 3Y7, Canada

3 CIRAIG, Department of Strategy and Corporate Social Responsibility, ESG, UQAM, Montreal, Quebec H3C 3P8, Canada

4 Center for Research in Computational Thermochemistry, Department of Chemical Engineering, Polytechnique Montreal, C.P. 6079, Station Downtown, Montreal, QC, H3C 3A7, Canada

Purpose

With growing concerns about preserving material and energy resources for future generations and minimizing their dissipation through the technosphere and ecosphere, numerous methodologies and indicators have emerged to assess resource use impacts, many grounded in thermodynamic principles. Among these, exergy—a thermodynamic metric that links both energetic and non-energetic resources to the concept of work—has been proposed as a unified indicator. In this study, we evaluate the relevance and implications of using exergy-based indicators within the context of life cycle impact assessment modeling for resource use.

Methods

Through a comprehensive literature review of existing methodologies and critiques of exergy definitions, we analyze the assumptions underlying various thermodynamic indicators. We then construct an impact pathway using exergy methods to clarify the insights exergy can provide regarding resource use and dissipation. Finally, we examine the limitations of exergy-based impact pathways, focusing on inconsistencies in defining material exergy and the challenges of thermodynamic reversibility—a concept that theoretically allows processes to be reversed without net effects—for exergy assessment.

Results and discussion

Our findings reveal that biases in how exergy is calculated and interpreted as a resource indicator produce results that deviate from its original purpose. In real-world systems, where non-reversibility dominates, the theoretical maximum work potential of a resource often diverges significantly from its actual potential. This divergence varies by resource, and tends to disproportionately favor energy-resources.

Conclusions

The study concludes that exergy, as it is currently used, is not a suitable metric for jointly assessing the impact of different resource categories due to its overly theoretical nature. We recommend restricting the use of exergy to identify non-reversibility in societal processes rather than attempt to evaluate resource use impact comprehensively.

Keywords : Life cycle assessment, Life cycle impact assessment, Mineral resources, Exergy, Dissipation, Energetic resources.

4.1 Introduction

Transitioning to a more sustainable world requires a balancing act between preserving resources for future generations and using them to achieve the transition [1]. This balance involves complex trade-offs, such as choosing between decreasing primary resources or energy carriers consumption, or deciding which materials (e.g., iron or nickel) or energy forms (e.g., heat or electricity) to prioritize for recovery [1, 72]. Life Cycle Assessment (LCA) emerges as a powerful tool to navigate these trade-offs, offering a standardized method to estimate the environmental impact of products and services across their entire life cycle.

LCA links life cycle inventory data to impact categories that affect specific Area of Protection (AoP) — entities we aim to safeguard, primarily human health, natural resources and ecosystem quality. However, to effectively use LCA in decision-making, robust indicators are needed for all AoP. Resources AoP in particular, have proven challenging to define due to the lack of consensus on what exactly should be protected [17, 73–75].

One of the primary challenges lies in the differing units used to measure the amount of natural resource extracted or dissipated. Energy carriers are generally quantified in Joules, while material resources are measured in mass units. This discrepancy creates methodological inconsistencies, making it difficult to evaluate overall resource use, efficiency, and impact. This inconsistency highlights a crucial observation : "the assessment of energy efficiency and material efficiency in isolation fails to capture the full improvement potential from efficiency, as interactions between energy and materials – which is the whole purpose of an industrial

process – are overlooked" [36]. This statement underscores the importance of developing integrated approaches that can evaluate energy and material resources jointly, thereby providing a more holistic understanding of resource value.

The development of resource-specific impact assessment methods is thus critical, but it raises fundamental questions about what value we aim to protect. The debate has centered on whether to prioritize the intrinsic value of resources —their inherent worth independent of human utility— or their instrumental value, which is derived from their usefulness to human society [12, 71]. Since Verones et al. [12], the focus is now on the instrumental value perspective. Rørbech et al., Sonderegger et al. and Berger et al. [17, 48, 74] classified groups of methods according to their interpretation of the AoP for natural resources : depletion methods (protection of a set of stock), future efforts methods (societal effort to extract a stock less available in the future) and thermodynamic accounting methods (extraction of exergy). The different methods assess the underlying concerns considered relevant to the resource use problem, such as the evaluation of resource availability as the physical presence of a resource (depletion methods) and resource accessibility as the ability to make use of a resource (future efforts methods) [14, 17].

Historically, most methods have assessed impacts based on the removal of a resource from the environment when it is extracted and used by the society [5, 18]. However, some resources are not ultimately removed or lost, but dissipated across their life cycle. This means they flow into stocks with lower concentrations, remain in use, and/or degrade in quality. This shifts the focus from resource depletion, which evaluates the impact of extraction, to approaches that assess the impact of dissipation. These approaches consider what might be termed the "fate" of resources within the product system [24, 76–78].

To address the challenge of differing units, price-based and stock-based indicators offer a unified approach to resource valuation by employing a single unit of measurement.

The JRC price-based method, a recent representative of price-based approaches, quantifies the potential loss of exchange value that resources provide within the technosphere [49, 71]. By relying on market price data, it assumes that the human value of resources is captured in their market price. However, this approach has limitations, such as failing to account for the loss of value of resources dissipated upstream in the life cycle, where resources may exist in less-refined forms and lower concentrations. This issue arises because characterization factors are based on the prices of refined resources [49, 71]. Existing price-based indicators have key limitations :

- they don't always keep the wanted focus on dissipation (**limit 1**) ;
- they are unreliable as they depend on highly variable market values (**limit 2**) : prices

remain volatile leading to unreliable data to assess the impact of resource use [79]. Prices also depend on assumptions about the future evolution of extraction technologies and their capabilities ;

- they don't capture long-term opportunity costs. There is a risk of market failure that is embedded in the characterization factors (**limit 3**).

A stock-based indicators, such as $ADP_{ultimate reserves}$, aims to address the issue of mineral resource depletion, i.e. the impact of depleting the natural stock of a non-renewable resource, thereby limiting its availability for future generations [18]. However, this approach may not fully capture the complex dynamics of mineral resource utilization within technological systems. The movement of resources between the technosphere (human-made systems) and the ecosphere (natural environment) is a critical consideration. The limitations of stock-based indicators are :

- these methods do not take into account for the decline in resource quality and/or accessibility within the technosphere, or the potential transfer from the technosphere to the ecosphere as a direct effect of dissipation (**limit 1**) [18].
- they are dependent on assumptions about the future evolution of extraction technologies and their capabilities, and are therefore subject to price fluctuations (**limit 2**) [49].

The search for a single indicator, quantifying a common property that designates the value of a wide range of resources to society, led the impact assessment community to consider the concept of work, taken from physics. Work is an energy exchange between a defined system and its surrounding. It can be performed by a technology (e.g., cars which transport us over long distances) or required by it (e.g., Hall-Héroult cells which uses electric power to smelt aluminum). In all cases, work is a valuable asset for society and is monetized. By definition, work refers to the energy transferred to or from a massive particle/object due to a force applied over a displacement and it is measured in joules. In the case of resources, the notion of work is linked to the exergy concept which is based on the 2nd law of thermodynamics applied to the thermodynamic ensemble where the temperature, the pressure and the mass balances are imposed, i.e. the NPT ensemble. In this thermodynamic ensemble, the Gibbs energy (also called the free energy) quantifies the amount of useful work involved in a given chemical process.

The definition of exergy can be expressed in two equivalent forms. On the one hand, exergy quantifies the *maximum* useful work that can theoretically be obtained from a system as it comes to equilibrium with its reference environment [50]. This concept is highly relevant to describe the efficiency of processes that involve energy carriers and widely used in industrial field. On the other hand, exergy also quantifies the *minimum* work required to bring a system

to a given state starting from a state of equilibrium with its environment [32]. While the first definition directly applies to energy carriers and other work-producing resources, the latter definition can capture the work that would theoretically be required to bring or restore any resource (mineral, biological, etc.) to a certain quality. For example, it quantifies the minimum work that would be required to reverse a dissipation process and restore a resource to its original state. With this definition, the exergy concept offers a unique unit (Joules) that links the useful notion of work to both energy and material resources. Exergy also makes it possible to consider the quality of resources, as a resource in a concentrated state will have greater working potential and higher quality than the same resource in a very diluted state [80]. In other words, resource degradation seems to always boil down to a question of work potential : a degraded resource will not be able to fuel as much work (for energy-resource, e.g., coal), or will require work in order to be restored to its original state if future generations need it (for other resources, e.g., gold).

Several exergy analysis methods exist. Although these methods differ in their application, they are grounded in a shared theoretical foundation based on the concept of exergy. This shared basis originates from the work of Szargut [40], who introduced the Cumulative Exergy Consumption indicator and was among the first to explore the valuation of resources using the exergy concept. Cumulative Exergy Consumption (CExC) [40] has the objective to calculate the cumulative consumption of natural resources in exergy units across all stages of an LCA. The CExC exergy-based method sums the exergy of all input elementary flows involved in the production of a product, representing its exergetic cost. Similarly, Exergetic Cost [41] builds on the CExC method by comparing exergy consumption with the exergy content of the final product.

The methods Cumulative Exergy Demand (CExD) [42] and Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE) [43] are closely related, with CEENE being an update of CExD. These constitute characterization methods of elementary flows in exergy unit, and align more closely with impact assessment. This criterion illustrates the exergy removed from natural environment. Other approaches, such as Exergetic Life Cycle Assessment (ELCA) [37, 45] and Exergy Replacement Cost (ERC) [47, 81], assess the decline in resource deposit quality, which will demand greater future extraction efforts, expressed in exergy terms.

However, none of these seven methods address emissions flows or consider their environmental impacts, leaving a gap in assessing the consequences of resource use (e.g. dissipation effect, loss of accessibility).

From an AoP's perspective, Schulze et al. [7] explain that exergy methods can adopt a

perspective in which the focus is on the instrumental value of resources : The continuous access of people to resources, thanks to the work potential, for use in society, is what must be "protected". [7,12,14]. From this perspective, resources extracted from both the ecosphere and technosphere are considered, as both can affect resource accessibility. Exergy methods enable the evaluation of the work potential lost during resource use, allowing for an assessment of the long-term accessibility of the targeted resources.

The exergy methods are well established and robust, considering their foundation in thermodynamic laws [36]. Since exergy is not dependent on technological or monetary assumptions, it is not subject to **limitations 2** and **3**. Adopting exergy as a general indicator makes it possible to give a thermodynamic value to any type of flow and identify loss of material quality and dissipation throughout its use in society [38, 82].

These capabilities are particularly crucial for natural energy sources such as coal, crude oil, and natural gas, whose availability depends on the Earth's carbon cycle, operating on geological timescales. The dissipation of carbon into the atmosphere in its fully oxidized form (CO_2) is therefore a significant concern. In this context, exergy-based approaches have proven valuable, with applications including the development of energy-efficient power cycles [83] and energy recovery from waste [84], both aimed at maximizing the utilization of readily available energy sources.

In contrast to fossil fuels, metals are not mined for their energy content but for their physical properties. However, the declining quality of available mineral resources —depleted in valuable chemical species— has led to increased energy demands for extracting essential products such as oxides, metals, and salts from primary sources. Similarly, recovering the physical properties of materials at their end of life can prove challenging and energy intensive depending on inter-alloy contamination, for example [85]. In determining the sustainability of recycling strategies, exergy analysis provides an objective framework to compare the work-efficiency of recycling and secondary processes against their primary counterparts [86].

Critical analyses on the theoretical foundations of exergy methods are limited. Debates center on the choice of reference environment (i.e. the reference environment is needed for the calculation of exergy and represents an equilibrium state environment) [38, 51]. The second issue relates to the partial incommensurability between energetic and non-energetic resources. Gaudreau questions how exergy should be applied to non-energetic resources, considering that their use requires work (and thus exergy) rather than provides it [38, 51, 87]. Lior et al. [88] demonstrates with examples that exergy efficiency is not well defined and often used differently within indicators. These drawbacks raise questions about the relevance of exergy in relation to what we want to protect about resources, while numerous articles are published

using exergy indicators.

Previous methods, based on prices and stocks, which use a single indicator to quantify the impact of resource use, have major limitations (**limit 1,2,3**) that need to be resolved. Linking every resource to its notion of work potential should overcome the subjectivity relying on market price or technology, which also leads to an unnecessary definition of the time perspective (**limit 2 and 3**). When assessing the consumption of a resource, it should be possible with exergy to evaluate the potential cost (work) to future generations caused by this degradation. However, the criticisms leveled at exergy methods by Gaudreau [38, 51], question its relevance, as Dewulf et al., Bösch et al. and Szargut [42, 43, 89] exergy methods give a high exergy value to very abundant fossil resource such as coal, while gold, an inert mineral resource, has a lower exergy value. Although exergy is not directly linked to rarity, this raises concerns about the conclusions drawn from such values—for instance, a higher exergy value for coal might imply prioritizing its protection over gold, which could conflict with broader resource management priorities.

Exergy, in theory, allows for the consideration of resource quality, as a concentrated resource possesses greater work potential and higher quality compared to the same resource in a highly diluted state. This aligns with the need to characterize resource dissipation (**limit 1**) [76]. However, a limitation arises from its theoretical nature : since exergy represents potential work, it may fail to capture the practical realities of resource use, such as the actual impacts caused by resource dissipation.

It was taken for granted that the exergy concept was pertinent and expendable to all material resources, mainly because exergy stems from the notion of work, and this underpins the robustness and transparency of this indicator. There is a real question mark, however, over our complete understanding of what we are trying to represent with exergy methods. In other words, are we not overestimating the real-world applicability of exergy in assessing the impact of resources use ?

While the thermodynamic concept of exergy is precisely defined, there is a need to clarify implicit assumptions linked to its use as an impact assessment method for energetic and non-energetic resources. This paper aims to assess the assumptions underlying the use of exergy as an impact assessment indicator and its potential to characterize the impacts of resource use, to inform real-world decisions on resource efficiency and trade-offs. It introduces the development of a hypothetical impact model with exergy as the indicator, detailing the implicit assumptions required to establish such an indicator in Section 4.2. In Section 4.3, a clarification of the exergy definition and a calculation for non-energetic resources are given, with an inquiry ending on the ostensibly perfect exergy concept. While the expectation

about exergy as a resource accessibility indicator is high, the Section 4.4 dives into exergy assumptions on reversibility to find out if exergy can fairly value different types of resources in a common unit.

4.2 Exergy framework

As seen in different author's contributions, the diversity of impacts measured using exergy complicates the development of a unified characterization model aimed at protecting the natural resources AoP at the endpoint level [17, 39, 74]. This challenge arises because exergy methods are typically designed to assess impacts at the midpoint level. The concept of AoP will however allow us to make the implicit assumptions underlying the choice of exergy as an indicator explicit. Section 4.2.1 defines the problem of resource use and time perspective, and Section 4.2.2 discusses the model framework, specifying the flows within the technosphere and environment that are utilized to assess the issue of dissipation. In Section 4.2.3, this general conceptual model is formalized into a mathematical equation. In Section 4.3.3, in conjunction with exergy data, the model is applied to quantify the impact of resource dissipation.

4.2.1 Problem definition

Defining the AoP in the context of exergy methods is crucial to clarify what we aim to protect and what qualifies as an impact. By choosing an exergy indicator, work is implicitly regarded as the key to making any resource accessible, regardless of the services it provides. Protecting work, therefore, presents an elegant solution, as it encompasses the protection of all services rendered by all resources.

The impact associated with the loss of work potential arises from the dissipation of resources (Figure 4.1).

In the development of the characterization model, the definition of a resource is inspired by the framework proposed by Sonderegger et al [10], where resources are described as 'material and non-material assets occurring in nature that are, at some point in time, deemed useful for humans.'

Based on the resource definition above, the impact of resource consumption —resulting from activities such as extraction and emissions— leads to the dissipation of the resource's work potential, causing damage to the resource-specific AoP (Figure 4.1). Work potential is viewed as beneficial to society, regardless of the specific activity in which it is used. The concept of dissipation is closely linked to work potential, as it reflects the degree of refinement required, and thus the work potential needed, to restore a resource to its pure state.

4.2.2 Modeling concept

The life cycle inventory (LCI) quantifies the exchanges of any materials (e.g., land, water or chemicals) between the technosphere and the ecosphere associated with a functional unit. This analysis relies on a comprehensive resource flow framework rooted in consistent mass balance principles. While the total amount of a resource entering and leaving a life cycle remains conserved, it undergoes transformations into different physical and chemical forms (e.g., ore, emissions). For example, carbon in coal enters the technosphere and exits as CO_2 in the atmosphere [90]. Typically, elementary flows of resources are characterized at the input level (e.g., ore extraction). However, evaluating only resource extraction is insufficient, as it overlooks net changes in material states within the system. It is also crucial to consider the exergy associated with permanent additions to stocks within the technosphere (e.g., landfills) and emissions leaving the technosphere as flows into the ecosphere (e.g., into less concentrated compartments) (Figure 4.1).

The theoretical approach to modeling the final destination of an emitted contaminant relies on the concept of a fate factor. This factor represents the distribution of the contaminant, released into one compartment, across receiving compartments (air, soil, water) under steady-state conditions, continuing until the contaminant fully degrades.

In this study, within the context of emitted resources, a fate factor is needed to determine the final state of an emission, characterized by properties such as chemical form, concentration, and receiving compartment (Figure 4.1).

Each emission's final state can be assessed in terms of its exergy, which quantifies the useful work needed to transform the resource from the reference state to its final emission state. The same principle applies to extractive flows, where exergy represents the useful work required to bring a resource from a reference state to its extraction state (e.g., a mine).

4.2.3 Equation definition

The following step is carried out as part of the Life Cycle Inventory (LCI). For a given elementary flow m of resource i , the first step is to quantify dissipative flows of i throughout the life cycle. This involves performing a resource flow analysis, systematically tracking and balancing resource flows, and assigning each flow to specific extraction compartments and final emission compartments y with detailed precision. Emission flows generated during a product's life cycle result in the dissipation of resources, meaning they move to less concentrated compartments, such as tailings or dispersed environmental compartments [91].

For each elementary flow m_i , a fate factor is required to determine the state (e.g. concen-

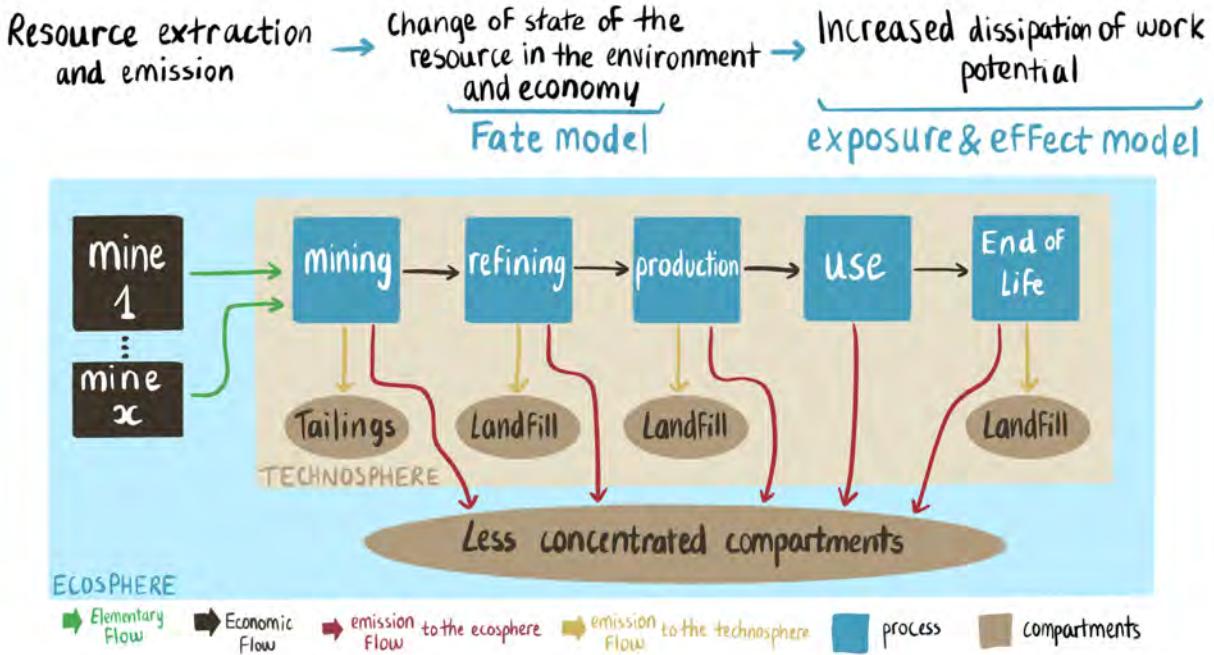


FIGURE 4.1 Conceptual impact pathway assessing the loss of accessibility to resource by change in state property resulting in the dissipation of work potential

tration, chemical form) of the resource in the compartment where it is emitted or extracted. The fate factor represents the distribution of a resource in terms of concentration, expressing the elementary flow of i in kilograms per kilograms of matter in compartment y , defined as follows (4.1) :

$$x_{i,y} = \text{kg}_{\text{elementary flow } i} / \text{kg}_{\text{compartment } y} \quad (4.1)$$

With the ultimate/original state of an emitted or extracted substance, it is possible to express it in terms of its exergy, which represents the characterization factor (CF). The exergy of a resource i in a given compartment y consists of two components : its chemical exergy $b_{ch,i,y}$ and its concentration exergy $b_{c,i,y}$ (Equation 4.2). Both are extensively explained in Section 4.3.2. Along the impact pathway, only the concentration exergy $b_{c,i,y}$ varies as the concentration of resource $x_{i,y}$ changes, depending on the compartment state y . Assessing this exergy requires a reference state (i.e., *final state*) with a concentration of resource i in the earth's crust as $x_{i,\text{final state}}$. In this reference final state, all resources are considered to be completely homogeneously dispersed or oxidized, and all fossil fuels have been burnt (typically called *Thanatia, a dead state*, in the literature by Valero et al. [81]). It's defined with a temperature of T_0 (298,15K) and pressure of P_0 (1 atm) to align with standard environmental

conditions.

$$CF_{i,y} = b_{T,i,y} = b_{c,i,y} + b_{ch,i,y} = RT_0 \ln \left(\frac{x_{i,y}}{x_{i,\text{final state}}} \right) + b_{ch,i,y} \quad (4.2)$$

From this, the exergy can be interpreted be the minimum required work to go from the final reference state (*final state*) to a state y for a resource i , expressing the total exergy of a resource $b_{T,i,y}$ (see section 4.3.2) in MJ/unit of i . Conversely, it can equally well be interpreted as the maximum released work that can be obtained going from a state y to a final reference state *final state* for a flow of resource i , also expressing the total exergy of a resource $b_{T,i,y}$ in MJ/unit of i .

The exergy $b_{T,i,y}$ of emission flows decreases as the concentration $x_{i,y}$ approaches the concentration of the final reference state $x_{i,\text{final state}}$, reflecting an increasing dissipation of these flows.

The impact defined with the exergy framework is *the dissipated work potential*, which represents the sum of extraction flows and emission flows exergy for all resources i across all compartment states y .

$$\text{Dissipated work potential} = \sum_i \sum_y m_{i,y} [b_{T,i,y}] \quad (4.3)$$

For both extraction and emission flows, the reference state concentration $x_{i,\text{final state}}$ is used in exergy calculations, as concentration exergy is evaluated relative to a harmonized reference environment in equation 4.3. This approach effectively cancels out the reference state when determining the dissipated work potential. Examples of coal and gold are depicted in Figure 4.2. In the initial state, carbon which is available as coal of different grades has an oxidation state of 0, and gold is in its metallic form in various deposits. In the final state, carbon is fully oxidized, while gold remains in its metallic form.

4.3 Exergy concepts

Once exergy is embedded in an impact framework, we can dig into its fundamentals to provide a clear explanation of what is calculated for resources using the concept of exergy. Exergy values are calculated with the assumption of reversible processes. The exergetic value of resources is determined with equations based on their chemical and geological characteristics.

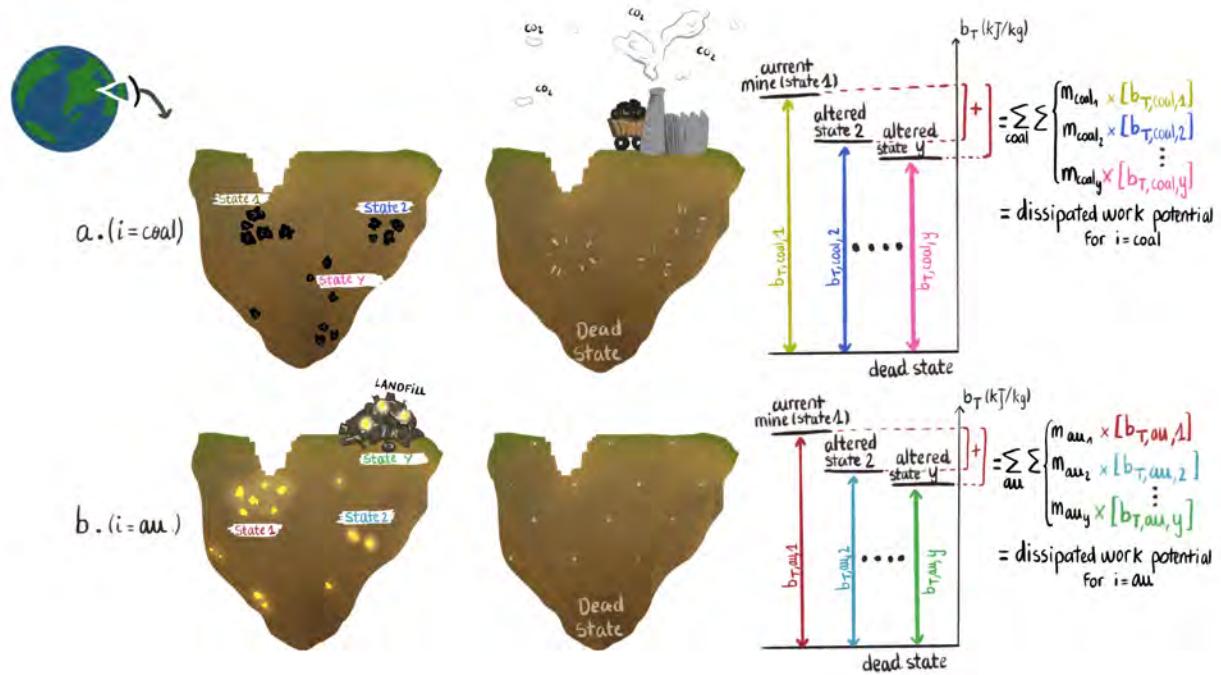


FIGURE 4.2 Graphical representation of the effect model for the impact pathway for coal (a) and gold (b). The final dead state, also called *Thanatia*, has a homogeneous gold mass fraction of 1.50×10^{-9} g/g which corresponds to the overall concentration of gold in the earth's crust while carbon is present in this dead state as CO₂ in the atmosphere at a molar concentration of 0.169 mol/m³.

4.3.1 Reversibility and non-reversibility

A reversible process, by definition, can be reversed once it has taken place and will leave no change in its system or environment [58]. Reversible processes can never be observed, only in a thermodynamic utopia would processes be fully reversible, that is, where processes would progress infinitely slowly to reach equilibrium and avoid some factors that could prevent reversibility [58, 89] :

- **Friction** : dissipated energy as heat interaction
- **Unrestrained expansion** : loss of capacity to perform mechanical work
- **Heat transfer through a finite temperature difference** : irreversible heat transfer
- **Mixing of two different substances** : increase of configurational entropy via solution

4.3.2 Exergy of material resources

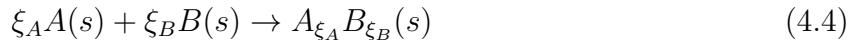
"Exergy expresses the quality of energy and can be defined as the minimal work necessary to produce a material in its specified state from materials common in the environment in a **reversible way**, heat being exchanged only with the environment." [32]. The term "in a reversible way" in the exergy definition denotes that the minimum work potential required to transition a resource from the dead state to a defined state is *quantitatively identical* to the maximum work potential recoverable when the resource undergoes dissipation from that defined state back to the dead state :

$$-b_{\text{required}} = b_{\text{released}}$$

Where b_{required} is positive as it is the useful work potential necessary to concentrate a resource, whereas b_{released} is negative as it is the useful work potential obtainable from a resource.

Thermodynamic origin of the chemical and concentration exergy

The fundamental description of the chemical and concentration exergy contributions can be obtained by defining the variation of the Gibbs energy of chemical reactions. Let's first look at the chemical reaction involving pure solid elements A and B producing the solid chemical compound $A_{\xi_A}B_{\xi_B}$ at atmospheric pressure :



In equation 4.4, the stoichiometric factors ξ_A and ξ_B are used to define the stoichiometry of this chemical reaction. These factors are also used to evaluate the standard Gibbs energy variation of this reaction (ΔG_r^0) which requires the definition of the standard Gibbs energy of the pure elements ($G_{A(s)}^0$ and $G_{B(s)}^0$) and of the pure compound ($G_{A_{\xi_A}B_{\xi_B}}^0$). This results in the following equation :

$$\Delta G_r^0(T, 1atm) = G_{A_{\xi_A}B_{\xi_B}}^0 - \xi_A G_{A(s)}^0 - \xi_B G_{B(s)}^0 \quad (4.5)$$

In most computational thermodynamic communities that provide extensive thermodynamic databases to describe the energetics of metallurgical processes used to extract natural resources (including the CALPHAD scientific community as introduced by Liu et al. [92]), pure elements under their equilibrium state at 298,15K and 1 atm are selected as reference energetic states. Under non-standard conditions (i.e. considering non-pure reactants/products),

the Gibbs energy variation of this chemical reaction (ΔG_r) is expressed as follows :

$$\Delta G_r(T, 1atm) = \Delta G_r^0 + RT \ln \left(\frac{a_{A\xi_A} B_{\xi_B}}{a_A^{\xi_A} a_B^{\xi_B}} \right) \quad (4.6)$$

In equation 4.6, the affinity a_i of each reactant and product (also commonly called activity), which contributions appear in the second term of the right-hand side of this equation, varies from $0 < a_i \leq 1$. The simplest assumption here is to consider that these non-pure reactants and products are embedded in ideal solutions. Under this assumption, their affinity is directly estimated using their molar fraction x_i , i.e. $a_i \approx x_i$. This leads to the following general expression :

$$\Delta G_r(T, 1atm) = \Delta G_r^0 + RT \ln \left(\frac{x_{A\xi_A} B_{\xi_B}}{x_A^{\xi_A} x_B^{\xi_B}} \right) \quad (4.7)$$

It is to be noted that more precise evaluation strategies of these chemical exergy contributions considering non-ideal solutions can be found elsewhere [89,93], but are not considered here for the sake of simplicity. Finally, in the specific case of the evaluation of the so-called concentration exergy, there is no chemical reaction (i.e. $\Delta G_r^0=0$). In this case, only the concentration difference between the initial and final state contributes to the variation of the Gibbs energy of the reaction.

The sign convention for the variation of the Gibbs energy of a reaction needs to be defined here : the contribution has a negative sign if work is transferred from the system to the surrounding as a result of its change of state and has a positive sign if work from the environment is required to change the state of the system. The same sign convention applies to the exergy contributions.

Formulation of the chemical exergy

For the calculation of the chemical exergy of resources, a reference environment defined with a temperature of T_0 (298,15K) and pressure of P_0 (1 atm) is used. Szargut [89] proposed to select "*reference substances*" as substances found in abundance in the actual environment and near equilibrium state (meaning no change in composition nor reaction is possible). The exergy of a reference substance $b_{ch,j}$ [kJ/mol] is determined with its average molar concentration in the environment (4.8).

$$b_{ch,j} = +RT \ln \left(\frac{1}{z_{0,j}} \right) = -RT_0 \ln(z_{0,j}) \quad (4.8)$$

where

$z_{0,j}$: conventional standard molar fraction in the environment of the reference substance j

R : molar gas constant $[8.314 J.K^{-1}.mol^{-1}]$

In the simplest cases (such as, the gold extraction from the Earth's crust), the material resource is already available in its useful state. The chemical exergy contribution is simply associated to the concentration variation from the mine ore grade state to pure state. The application of equation 4.7 to the extraction reaction of gold from the mine ore grade with a gold molar fraction $z_{0,Au}$, i.e. $Au(z_{0,Au}) \rightarrow Au(S, pure)$, leads to the following chemical exergy contribution $b_{ch,Au}$:

$$b_{ch,Au} = +RT \ln \left(\frac{1}{z_{0,Au}} \right) = -RT \ln(z_{0,Au}) \quad (4.9)$$

In Szargut [89], concentration data are used to find the chemical exergy of reference substance in equation 4.8 and they need to be calculated before other values, as they are required for the calculation of compound.

When the material resource is embedded in a compound and is in an oxidized state (such as copper in chalcocite- Cu_2S), a chemical reaction associated to its extraction needs to be defined.

The chemical exergy of any resources can be determined using the exergy values of the reference substances and its associated reference reaction. The chemical exergy of a resource i, denoted $b_{ch,i}$ [kJ/mol], is obtained from the standard Gibbs energy of the reference reaction, $\Delta G_{r,i}^0$ [kJ/mol], and includes the sum of the exergy of the reference substances contained in i (4.10) :

$$b_{ch,i} = \Delta G_{r,i}^0 + \sum_j n_{j,i} b_{ch,j} \quad (4.10)$$

where

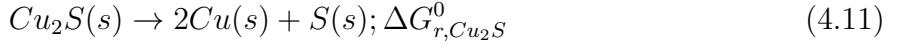
$\Delta G_{r,i}^0$: Gibbs energy of reaction in kJ/mol

$b_{ch,j}$: chemical exergy of the reagent substance j contained in i in kJ/mol

$n_{j,i}$: the amount of moles of the reference element j per mole of substance i

In the case of metallic copper extraction from chalcocite (which concentration in mine ore

grade is z_{0,Cu_2S}), the following standard chemical reaction is considered :



The standard Gibbs energy variation of such reactions (ex. : $\Delta G_{r,Cu_2S}^0$) can be obtained from thermodynamic packages such as FactSage [94]. The chemical exergy b_{ch,Cu_2S} is then evaluated by considering the molar fraction of chalcocite in the ore. This leads to the following equation :

$$b_{ch,Cu_2S} = \Delta G_{r,Cu_2S}^0 + RT \ln\left(\frac{1}{z_{0,Cu_2S}}\right) \quad (4.12)$$

Finally, if the copper and sulfur products are not a pure state, then the following general expression of the chemical exergy is obtained :

$$b_{ch,Cu_2S} = \Delta G_{r,Cu_2S}^0 + 2RT \ln(x_{Cu}) + RT \ln(x_S) - RT \ln(z_{0,Cu_2S}) \quad (4.13)$$

Formulation of the concentration exergy

The concentration exergy is typically introduced in order to evaluate the free energy which would be ultimately available if the earth's final state was a completely dead chemical state or more generally when a change of reference state is performed. Assuming that the free energy is available as a result of a chemical dispersion only (entropy), the concentration exergy can be obtained using the following expression (4.14) :

$$b_{c,i} = +RT \ln\left(\frac{x_{i,\text{initial state}}}{x_{i,\text{final state}}}\right) \quad (4.14)$$

where

$x_{i,\text{initial state}}$: the concentration of the substance i in a defined stock in g/g

$x_{i,\text{final state}}$: the concentration of the resource in a final defined stock

(e.g. Thanatia : the completely dispersed state) in g/g

If a chemical element has been extracted from a mineral and is concentrated as a metal (e.g. metallic copper extracted from Cu₂S), then it needs to be re-oxidized and dispersed to reach a chemically dead state. In this case, the chemical exergy contribution needs to be applied.

The total exergy for a material resource $b_{T,i}$ in kJ/mol is then (4.15) :

$$b_{T,i} = b_{ch,i} + b_{c,i} \quad (4.15)$$

4.3.3 Everything seems perfect

Exergy values

Two material resource exergy values have been calculated and are presented in Table 4.1 (calculation steps are available in the Online Resource 1 (Annexe A). The concept of exergy is now clearly defined, and the analyzed resources are expressed in the same unit (kJ), representing their useful work potential at a specified state. The next step involves implementing and following the previously introduced impact pathway. However, upon analyzing the results, discrepancies are observed between the calculated values and the expected outcomes.

As previously explained, exergy involves the concept of reversibility, meaning the absolute value of the maximum work obtainable from a resource is *quantitatively identical* to the minimum work required to obtain it from a dead state. For instance, the total exergy of gold—comprising chemical and concentration exergy is +255.69 kJ/kg, while coal has a value of −22 248 kJ/kg [89]. This implies that, in theory, the useful work potential of 1 kg of coal would theoretically be sufficient to extract and concentrate 87 kg of gold, while the theoretical useful work potential of 1 kg of pure gold could yield a maximum of 1.15×10^{-2} kg of coal. The latter result is, of course, purely theoretical as it would rely on the full valorization of the free energy of gold dispersion to concentrate the fully oxidized carbon of the atmosphere (as CO₂) in the form of coal, which reversible process is impossible.

While this exergy comparison is intriguing from a physical perspective, it is entirely impractical. If it were even remotely feasible to extract and concentrate such a large amount of gold using so little coal, coal would be far more valuable than gold. Although coal can be converted into energy, and energy could theoretically be used to concentrate gold, this is far from achieving any kind of alchemical equivalence! A major limitation of this concept is the unrealistically low exergy value attributed to gold. The idea that 255.69 kJ is sufficient to obtain 1 kg of gold is nonsensical in the real world.

Application of the Exergy Framework

In this subsection, the Exergy framework developed in Section 4.2 is applied to quantify natural resource degradation. The Dissipated Work Potential is calculated for an extraction and corresponding emissions m_{gold} equal to 1 kg of gold and m_{coal} equal to 1 kg of coal. Each resource begins from its current mine ore grade state and is emitted in two lower concentration compartments. The fate factor for the initial state is taken from the literature, while the fate factors for the emission states are hypothetically calculated by reducing the ore content by one order of magnitude for each compartment.

Table 4.1 Exergy of Gold and Copper

Substance	value in kJ/mol		value in kJ/kg $b_{T,i}$
	$b_{ch,i}$ ¹	$b_{c,i}$ ²	
Gold(<i>Au</i>)	+37.47	+12.89	+255.69
Copper from copper sulfide	+134.00	+13.79	+2183.72

¹ Value from Table 4.2 in Valero et al. [47] and for gold, the chemical exergy contribution is simply associated to the concentration variation from the mine ore grade state to pure state.

² Calculated using the value in Table A.21 in Valero et al. [81], and for gold, the concentration exergy contribution is associated to the concentration variation from *Thanatia* state to ore grade state.

For gold, the current mine ore grade has a fate factor of approximately 2.72×10^{-7} g/g [95], with the two emission compartments having fate factors of 7.51×10^{-8} g/g and 5.76×10^{-9} g/g, respectively. The same process is applied to coal, where the current coal grade in the mine is 3.94×10^{-1} g/g [96], and the chosen emission compartments are 3×10^{-2} g/g and 8×10^{-3} g/g.

Using the equation 4.3 (calculation steps are available in the Online Resource 1 (Annexe A)), the dissipated work potential for gold is equal to 29.12 kJ, whereas for coal is 640.68 kJ. This result suggests that as concentration decreases due to extraction and dissipation, future generations will have less access to the useful work potential of 1 kg of coal compared to 1 kg of gold. Moreover, extracting coal would require greater effort than obtaining gold.

The example of gold and coal shows a very limited relevance of the exergy impact pathway to access the impact of resource dissipation on resource accessibility. The problem could lie either in the definition of our impact pathway, or in the concept of exergy itself.

4.4 Exergy potential as an impact assessment method for resources

4.4.1 Hypothesis on reversible process

The assumption of reversibility is the cornerstone, to our understanding, of the exergy concept for assessing the impact of resources. This assumption connects the idea of work—whether generated or consumed—to different resource categories, allowing them to be compared or potentially converted into a common unit. For fossil fuel resources, work is required to concentrate these resources to usable levels, and work can then be obtained from them through processes such as combustion or fuel cells. Similarly, for other material resources, energy must be expended to concentrate these resources, and theoretically, work could be recovered if a

membrane-based process allowed energy to be harnessed from chemical gradients (chemical potentials) of these resources. However, practical limitations arise, as it is generally impractical/impossible to generate usable chemical work from concentration gradients of material resources. Additionally, extraction or concentration processes are highly non-reversible, as significant work potential is lost as heat, a less usable form of energy.

The preceding explanation raises important questions about the actual work potential achievable in real processes, which varies by resource category. If all resource extractions exhibited similar deviations from reversibility, exergy could still provide a relative measure of lost work potential. However, if they do not, how significant is the irreversibility deviation from resource to resource?

In the previous subsection 4.3.3, we illustrated the theoretical exergy values by comparing coal and gold : theoretically, an enormous amount of gold could be extracted with a minimal amount of coal due to their relative exergy values. According to exergy, coal appears to be a far more valuable resource, one warranting greater protection.

Yet exergy remains a theoretical construct, and the real work potential of any resource may vary. Ideally, the gap between theoretical and real work potential would be consistent across resource categories to enable meaningful comparisons and effective assessments of resource impacts. Otherwise, the varying disparity risks creating a bias, potentially resulting in a distorted choice of resources to protect.

4.4.2 Current extraction processes

The exploitation of natural resources presents stark contrasts in terms of required work and energy efficiency. On the one hand, the extraction of material resources from the Earth's crust demands substantial real work due to the complexity and high energy requirements of these processes (e.g. rock crushing, no heat recovery). On the other hand, the extraction of fossil resources, such as coal, requires relatively little actual work when compared to their theoretical work potential.

Table 4.2 presents the energy consumption required for the extraction and refining of various resources. These values reflect the energy needed to concentrate resources from their raw state in the mine to a pure form. Value for fossil resources in Table 4.2 is derived from the Ecoinvent database version 3.10 [97] and represent the energy required to extract fossil fuels. These values refer to the cumulative energy demand (CED) results for specific activities : the processes of hard coal mine operation and hard coal preparation in the Rest of World (RoW) region. For material resources, we can either find the average amount of energy required in

the Ecoinvent database or in the literature (Table 4.2). Both ways yield values in the same order of magnitude.

Table 4.2 Energy consumption of different resources extraction and refining

Resource	Energy consumption in MJ/kg	Source
Mineral resources		
Gold	125,000	[95]
Copper from copper sulfide	73.00	[98]
Fossil resources		
Hard coal	0.96	[97]

4.4.3 A story of order of magnitude

The use of exergy to assess the impact of resource use presents significant limitations, particularly when comparing mineral and fossil resources. This subsection aims to demonstrate and emphasize the disparity between the theoretical and actual work associated with these two resource categories.

To illustrate this gap, certain adjustments have been made in this section. These changes reflect the author's effort to maintain consistency when comparing the real and theoretical work potential required for resource extraction. Since data on the actual work potential needed to transition from the dead state to the current mine ore grade state is unavailable, these adjustments are necessary :

- The initial state selected for concentration exergy evaluation is not the ore content of the mine, but a state with a concentration of 1, corresponding to the pure/metallic state of the resource (see Figure 4.3 for a representation of the change).
- The final state is adjusted to the mine state because it is not feasible to obtain data on the actual work potential required to extract a resource from the dead reference state (see Figure 4.3 for a representation of the change).

The ratio between the actual work required to extract the resource from current mine and the minimum theoretical exergy is calculated in Table 4.3 for different types of resources (calculation steps are available in the Online Resource 1 (Annexe A)). This ratio for mineral resources is higher than for fossil resources. Gold has the highest ratio at 6.59×10^5 , indicating it requires significantly more energy to extract than its concentration exergy would suggest. Other minerals such as copper have variable ratios, greater than 1000, which means that they require much more work to extract than the minimum amount of work corresponding to their exergy. For coal, the ratios range from 1.44 to 5, indicating that the energy required

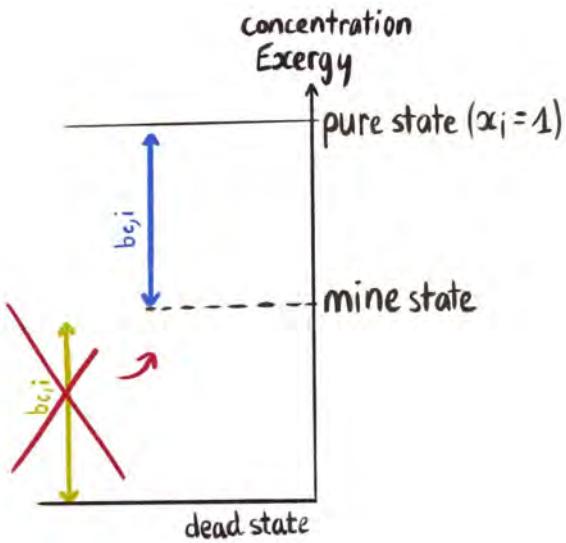


FIGURE 4.3 Illustration of the state change for calculating the concentration exergy

to extract fossil fuels is generally similar to the concentration exergy from mine state to pure state.

This significant difference is explained by the fact that the reversibility hypothesis, fundamental to the concept of exergy, is much more applicable for some resources than for others. Consequently, using exergy values for assessing the impact of resource use introduces a significant bias when estimating a resource's importance in preserving the AoP of work potential in a real-world situation. In this example, this bias tends to underestimate the importance of protecting mineral resources compared to fossil resources.

4.5 Discussion

4.5.1 Relevance of exergy

At first glance, exergy seems to be an excellent indicator, as it links resources with the capacity to perform work on a fundamental basis that is not influenced by assumptions of time-horizon or the evolution of extraction and processing technologies. With enough work, even highly dispersed resources could theoretically be extracted. However, this assumption relies on the ideal of reversibility inherent to exergy theory. In reality, all processes are non-reversible, meaning the actual work potential of a resource diverges from its theoretical exergy value. While some authors attempted to integrate the contribution of non-reversible extraction operations (such as ore comminution) into exergy indicators (see for example Valero et al. and Jose-Luis et al. [99,101]), these efforts ultimately leads to nothing more than the standard

Table 4.3 Ratio of concentration exergy compared to energy consumption requirements for the extraction and refinement of various mineral and fossil resources

Resource	Concentration exergy (MJ/kg) ¹	Energy consumption (MJ/kg)	Ratio
Mineral resources			
Gold	1.90×10^{-1}	1.25×10^5	6.59×10^5
Copper from copper sulfide	55.27×10^{-2}	73.00	1.32×10^3
Fossil resources			
Hard coal	$1.92 \times 10^{-1} - 6.67 \times 10^{-1}$	9.62×10^{-1}	1.44-5

¹ Exergy value for mineral resources is obtained with the equation (4.15) with $x_i = 1$ and $x_{i,\text{final state}} = \text{current mine concentration}$ from Valero et al. and Jose-Luis et al. [81, 99] for gold and copper. For hard coal, current mine concentration was calculated with a range stripping ratio of 1 :1–10 :1 (m³ of overburden rock to reach 1000 kg of coal) based on data from from Schissler and Scott et al. [96, 100].

evaluation of the total energy consumption and associated emissions ([47]). Moreover, this divergence varies by resource type because some processes are inherently more reversible than others, introducing a bias on which resource to protect. Combining both energetic and non-energetic resources into a single exergy measure fails to fully capture their distinct values to society.

Our findings corroborate with the previous work by Gaudreau [38, 51] through a different analytical approach focusing on the distance from reversibility. Ultimately, our results reinforce and provide empirical support for Gaudreau's [51] assertion that exergy is an unsuitable indicator for representing resource value in the context of resource protection.

4.5.2 Limitations and robustness

It is important to note that while uncertainties exist in the data used for impact assessment, particularly regarding mineral concentrations, these uncertainties are unlikely to significantly affect the overall impact assessment since the correct order of magnitude is maintained. Additionally, our study focused on just three resources, which represent a small sample of the existing resources. However, it is highly anticipated that our reasoning will lead to the same conclusions when applied to comparisons of both energy and non-energy resources.

In Section 4.4.3, we modified the initial and final — dead — states for exergy calculations, considering the transition from a state with current ore grade in the mine to a state of pure grade in the technosphere, rather than from a completely dissipated state to state with current mine ore grade. This modification, while altering the concentration exergy of gold by 65 kJ/kg,

maintains the ratio of 659,628.30 between theoretical and real work required to obtain a gold in its pure state. This adjustment was made to provide a more accurate interpretation of the calculated ratio within the context of our study, recognizing that determining the actual work required—i.e., the energy consumption for extracting a resource from the dead state to a pure state—is highly uncertain and challenging to assess. Ultimately, even with a narrower boundary for the calculation, the difference between the actual and theoretical work potential remains significant enough to lead to the same conclusions as if the reference dead state had been used.

4.5.3 Exergy model applicability

This study aimed to evaluate the potential of exergy-based approaches in assessing the impact of resource use. It revealed a significant disparity between theoretical exergy calculations and real-world material extraction processes, as evidenced by the high order of magnitude of the differences observed in the ratio of material resources. This discrepancy can be attributed to the substantial irreversibilities inherent in actual extraction processes, which stand in contrast to the idealized, reversible conditions assumed in theoretical exergy calculations. While thermodynamics, and by extension exergy, offer the advantage of being technology-independent, our results suggest that these approaches may not adequately capture the full complexity of resource use and dissipation impacts. The exergy methods employed in this study enabled an assessment of hampered resource accessibility by quantifying the dissipated work potential associated with resource use.

4.5.4 Recommendation on resource use in life cycle impact assessment

We must shift from a theoretical perspective where all processes are considered reversible, focusing instead on real-world conditions that include irreversibilities. In this context, exergy has become a recognized metric for assessing the quality of energy resources and has demonstrated its effectiveness in identifying material **or** energy irreversibilities in processes [38, 82, 102, 103]. However, it is not recommended to use it for evaluating all resource categories jointly in a comprehensive assessment of the impact of resource use and dissipation. These findings highlight the limitations of exergy as a sole measure for resource value assessment when it falls short in fully representing the accessibility and societal value of material resources. The utility of these resources to human society extends beyond their mere capacity to perform physical work. For material resources, factors such as technological properties related to their transformation and applications play critical roles in determining their value. These factors are not fully captured by exergy calculations alone. The resource quality eva-

luated through exergy does not accurately represent the quality at which the resource enters the economy. This is because the reduction in work potential fails to account for changes in the resource's functionality within the economy, such as the effects of alloys or other mixed substances. Tonini et al. [104] argue that 'quality' refers to specific technological attributes relevant to a given application, typically within the same life cycle stage or a subsequent one. Dewulf et al. [90] further highlight the lack of a methodology capable of fully capturing resource quality, as our paper demonstrates that exergy fails to adequately characterize this aspect. Verones et al. [12] and the LCA community suggest that the impact of resource use on accessibility should be characterized by the loss of instrumental value of resources caused by their dissipation. Creutzig et al. [1] also suggest broadening the resource use issue to encompass a broader shift toward a more sustainable world, where trade-offs between material and energy resources intersect with societal goals of ensuring well-being.

4.6 Conclusion

This study has critically evaluated the potential of exergy-based approaches in assessing the impact of resource use and dissipation. Our findings reveal a significant limitation in using exergy as a unified metric for both energetic and non-energetic resources. The observed discrepancies between theoretical exergy calculations and real-world extraction processes, particularly for mineral resources, underscore the complexity of resource valuation beyond thermodynamic principles. The main conclusion of this article is that theoretical work potential—exergy—does not accurately represent the actual work potential required or achievable with current processes. This discrepancy arises because our world operates within an inherently irreversible system, and resource extractions exhibit varying deviations from reversibility depending on the category of resource. As a result, exergy fails to serve as a reliable measure of lost work potential. Therefore, we do not recommend using exergy as a unified resource indicator for both material and energy resources.

Future research should focus on developing multidimensional approaches that can better capture the instrumental value of resources in terms of their loss of potential contribution to human development, especially for non-energetic materials. Further investigation into the role of technological advancements in mitigating resource dissipation and improving resource recovery efficiency is also warranted.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Funding

The authors would like to acknowledge the financial support of NSERC Discovery grant no. RGPIN-2019-04729.

Data Availability

All data supporting the findings of this study are available in the paper and its Supplementary Information.

CHAPITRE 5 DISCUSSION

Ce chapitre a pour objectif d'approfondir la discussion de l'article et de préciser en détail les limites de l'étude. Nous commencerons par évaluer la réalisation de l'objectif et de ses sous-objectifs mentionnés en introduction. Ensuite, les hypothèses limitantes de cette étude seront mises en lumière afin de proposer d'éventuelles pistes d'amélioration. Enfin, de nouvelles perspectives de recherche seront présentées.

5.1 Résultats et atteinte de l'objectif

Les résultats découlant de l'objectif de recherche suivant :

Évaluer le potentiel de l'exergie comme indicateur thermodynamique apte à représenter l'impact de l'utilisation des ressources.

apportent une réponse pragmatique quant à la pertinence de l'utilisation de l'exergie en l'EICV.

5.1.1 Sous-objectif 1 : Clarification du concept d'exergie

Dans le chapitre 2 ainsi que dans l'article (Chapitre 4), le concept d'exergie a été largement abordé. La complexité des calculs associés met en évidence la difficulté de le vulgariser. Les hypothèses et définitions relatives au calcul de l'exergie chimique ont été expliquées, facilitant ainsi la compréhension du concept d'exergie et de la notion de travail utile pour l'évaluation des impacts liés à l'utilisation des ressources, qu'elles soient énergétiques et non-énergétiques. Cette clarification permet, en parallèle avec le sous-objectif 2, de mieux définir le chemin d'impact fondé sur l'exergie et de mieux appréhender la signification d'une perte de travail utile due à la dissipation des ressources.

5.1.2 Sous-objectif 2 : Modélisation d'un chemin d'impact

L'article (Chapitre 4) présente le chemin d'impact selon les étapes de modélisation des facteurs de caractérisation en EICV. Ce sous-objectif vise à déterminer ce que l'on cherche à préserver en matière de ressources en s'appuyant sur le concept d'exergie. L'impact associé à ce chemin d'impact est le **potentiel de travail dissipé**, qui correspond à la quantité de travail utile devenue inaccessible en raison de la dissipation des ressources, et donc d'un

potentiel de travail perdu tout au long du cycle de vie d'un produit ou service. L'application de ce chemin d'impact à un exemple concret a permis d'identifier les premiers biais liés à l'évaluation conjointe de différents types de ressources avec l'exergie.

5.1.3 Sous-objectif 3 : Biais associés à l'utilisation de l'exergie

Comme souligné dans la discussion de l'article, l'exergie constitue un indicateur pertinent, notamment parce que la notion de travail potentiel qui lui est associée est essentielle à de nombreuses activités de notre société, y compris l'extraction des ressources. En théorie, avec une quantité suffisante de travail, il serait possible d'exploiter même des ressources extrêmement dispersées. Cependant, en pratique, l'irréversibilité des processus engendre un écart entre le travail réellement requis pour extraire une ressource et l'exergie, qui correspond au minimum de travail nécessaire (théorique). Cet écart varie selon le type de ressource, certains processus étant naturellement plus réversibles que d'autres. Par conséquent, cela peut introduire des biais dans l'évaluation des ressources à protéger en priorité, influençant ainsi les décisions en matière de gestion et de préservation des ressources.

5.1.4 Réalisation de l'objectif principal

Le potentiel de l'exergie est remis en question par les ratios présentés dans l'article. Le calcul du ratio entre le travail réel et le travail théorique a permis de quantifier empiriquement cet écart. Pour des ressources telles que l'**or** et le **cuivre**, les ratios observés sont respectivement de 659 628 et 1 320, tandis qu'une ressource énergétique comme le **charbon** affiche un ratio bien plus faible de 1,44 (à 5). Ces ratios particulièrement élevés pour les ressources minérales traduisent une irréversibilité accrue des procédés nécessaires à leur extraction.

Cette divergence souligne que les approches exergétiques actuelles ne parviennent pas à refléter fidèlement l'impact de l'utilisation des ressources naturelles, en raison des écarts de réversibilité entre les processus réels et ceux modélisés théoriquement. Bien que l'irréversibilité des procédés soit une réalité physique, la question centrale est de déterminer à quel point ces processus s'éloignent de la réversibilité. Dans le cas des ressources rares comme l'or, cet éloignement est extrêmement marqué, malgré une valeur exergétique relativement faible. À l'inverse, pour le charbon, cet écart est minime, car l'énergie nécessaire à son extraction est proche de sa valeur exergétique.

Ainsi, s'appuyer exclusivement sur la valeur exergétique pour comparer les ressources engendre un biais notable, pouvant mener à des décisions inadéquates concernant la préservation de certaines d'entre elles. De plus, regrouper les ressources énergétiques et non énergé-

tiques dans une seule métrique exergétique ne reflète pas correctement leurs contributions spécifiques à la société. De la même manière, l'exergie ne permet pas d'évaluer de manière appropriée l'impact de l'utilisation des ressources naturelles.

5.2 Limites de l'étude et pistes d'amélioration

La majorité des limites du projet de recherche ont déjà été introduite dans la discussion de l'article. Elles seront davantage développées dans cette section.

5.2.1 Caractérisation des flux élémentaires

Selon les différentes étapes de l'ACV, disposer d'un inventaire complet du cycle de vie est indispensable pour évaluer avec précision les impacts. Lorsqu'il s'agit d'analyser l'impact de l'utilisation des ressources, le chemin d'impact basé sur la chaîne de cause à effet prend en compte la dissipation des ressources. Il est donc crucial d'accéder à des inventaires des flux d'émissions associés à cette dissipation. Toutefois, la notion de dissipation ne bénéficie pas encore d'une définition précise ou d'un seuil clairement établi par la communauté d'experts en EICV. En d'autres termes, on considère qu'une ressource est dissipée en raison de «different constraints. These constraints prevent humans to make use of the function(s) that the resources could have in the technosphere. The distinction between dissipative and non-dissipative flows of resources may depend on technological and economic factors, which can change over time» [17]. Cette définition reste floue, notamment concernant le seuil à partir duquel une ressource est jugée dissipée.

Dans le cadre de la modélisation du chemin d'impact de ce projet de recherche, il a été nécessaire de concevoir une méthode d'évaluation de la dissipation basée sur l'exergie des ressources, sans recourir à un seuil limite prédéfini. Cette méthode repose sur l'idée que toute ressource émise dans l'environnement ou la technosphère perd de sa valeur exergétique en raison de sa dilution (voir section 4.2 de l'article). En effet, une diminution du potentiel de travail reflète une quantité de travail dissipée, soit une énergie devenue inaccessible ou nécessitant un effort supplémentaire pour être récupérée. Le modèle de dissipation proposé ici prend en compte le caractère non-réversible des émissions de ressources. Cette perspective rejette les travaux de Dewulf et al., qui définissent la dissipation comme un concept plus large, lié au résultat d'un processus irréversible et peut en principe concerter d'autres questions physiques que la matière [76].

Cependant, notre approche méthodologique présente certaines limites. Premièrement, nous faisons l'hypothèse que toute émission de ressource entraîne inévitablement sa dissipation.

Bien que cette hypothèse soit partiellement valide, elle reflète une vision pessimiste de la dissipation. Deuxièmement, des chercheurs, dont Dewulf et al. [90], ont récemment souligné l'importance des dimensions spatiales et surtout temporelles dans la définition de la dissipation. Il est essentiel de définir une échelle temporelle adaptée pour évaluer si une ressource peut être considérée comme dissipée. En fonction du compartiment dans lequel la ressource est émise, et donc de sa concentration dans ce milieu, le délai nécessaire pour récupérer cette ressource peut varier significativement. Ces délais, appelés «*Times To Accessibility*» (TTA, exprimés en années) [90], permettent de calculer des facteurs de caractérisation qui quantifient la contribution de la dissipation à l'inaccessibilité de la ressource.

En outre, ces travaux mettent en lumière l'importance de tenir compte des ressources dissipées qui subsistent sous forme de stocks au sein de la technosphère. Les caractéristiques de ces stocks, ainsi que les cadres socio-économiques et les avancées technologiques, influent sur le degré de dissipation des ressources et permettent d'estimer si elles pourront redevenir accessibles à l'avenir [76]. Cette notion de durée d'inaccessibilité n'a pas été intégrée dans notre étude.

Ce choix s'explique par notre volonté initiale de nous affranchir des paramètres économiques et technologiques, afin de tirer parti de l'un des principaux avantages de l'exergie : son caractère indépendant de ces facteurs. Ainsi, nous évaluons uniquement le potentiel de travail nécessaire pour récupérer une ressource dissipée dans un cadre théorique, sans inclure les dimensions technologiques et sociales. Pourtant, ces dimensions sont étroitement liées à la thermodynamique. En effet, l'efficacité des procédés de récupération des ressources dissipées dépend directement de leur degré d'irréversibilité. Au-delà de l'exergie des ressources, il est donc nécessaire de prendre en compte l'efficacité exergétique des procédés de récupération [102]. Selon Dewulf et al. [76], lorsque la thermodynamique est défavorable — par exemple en cas de dilution importante ou d'interactions fortes entre métaux dans des alliages —, la technologie peut devenir économiquement non viable pour rendre les ressources accessibles. L'inverse est également vrai, et il est pertinent d'évaluer jusqu'à quel niveau d'irréversibilité une ressource peut être récupérable.

Que ce soit sur les plans temporel ou thermodynamique, il est nécessaire de définir des seuils adaptés pour chaque ressource en fonction du compartiment dans lequel elle est émise. La littérature propose plusieurs travaux à ce sujet, notamment ceux de Dewulf et al. sur les seuils temporels d'accessibilité [90] ou de Blasenbauer et al. sur l'exploitation des stocks technosphériques [105].

Pour conclure sur les limites liées à la classification des flux, les variations en matière de dissipation des ressources, de nature du compartiment de dissipation, de développement

technologique et de contextes socio-économiques conduisent à des différences dans le degré d'inaccessibilité des ressources. Il demeure complexe de proposer des mesures quantitatives pour représenter le degré d'irréversibilité au-delà de l'exergie, laquelle ne parvient pas à capturer l'ensemble des facteurs d'inaccessibilité. De plus, aucun consensus n'a encore été atteint au sein de la communauté de l'analyse du cycle de vie (ACV) sur les seuils à adopter pour évaluer les impacts de la dissipation des ressources.

5.2.2 Définition de l'environnement de référence

Dans le premier chapitre de ce mémoire, la section 1.1.6 a présenté les limitations liées à la définition de l'environnement de référence pour l'évaluation exergétique. Dans cette sous-section, une analyse critique des choix méthodologiques de l'autrice concernant cet environnement de référence sera effectuée.

L'environnement de référence est défini comme étant dans un état thermodynamique stable, où aucune réaction chimique ne peut survenir entre ses composants. Il agit comme un système infini, servant de source de chaleur et de matériaux, et ne subit que des processus internes réversibles. Dans cet état, ses propriétés intensives (température, pression, et potentiels chimiques pour chaque composant) demeurent constantes [30, 56].

Dans la section 4.2 de l'article, la définition du chemin d'impact repose sur un environnement de référence conforme aux conditions décrites précédemment. Toutefois, dans la section 4.4, dédiée à l'évaluation quantitative des ratios entre le travail réel et théorique pour déterminer le potentiel de l'exergie en analyse d'impact, des ajustements ont été apportés à cet environnement de référence. Ces modifications étaient nécessaires pour garantir la cohérence dans la comparaison entre le travail réellement effectué et celui théoriquement requis pour l'extraction des ressources.

Ces ajustements impliquent un passage de l'environnement de référence, initialement défini comme thermodynamiquement mort (selon les critères mentionnés), à un état représentant un gisement plus ou moins concentré, désigné comme état minier. Cependant, cet état minier ne peut être considéré comme un environnement de référence valide, car ses composants, du fait de leur concentration, restent chimiquement réactifs.

Cette modification, bien qu'elle altère les valeurs de l'exergie de concentration des ressources (par exemple, une différence de 65 kJ/kg pour l'or), permet de maintenir un ratio cohérent entre le travail théorique et réel requis pour obtenir une ressource pure. Ce ratio passe ainsi de 490 796,57 avant modification à 660 107,26 après modification. Bien que cette approche ne respecte pas strictement la définition classique de l'environnement de référence, la différence

significative entre le potentiel de travail réel et théorique reste suffisante pour aboutir aux mêmes conclusions que si un environnement thermodynamiquement mort avait été utilisé.

5.2.3 Incertitude des données sur les ressources

Les données utilisées pour les calculs exergétiques présentent un niveau élevé d'incertitude et sont sujettes à évoluer à mesure que de nouvelles informations deviennent disponibles. L'emploi de valeurs moyennes ou d'estimations de concentration accroît cette incertitude [43]. Rudnick et al. fournissent la composition la plus récente et couramment utilisée de la croûte continentale [68]. Toutefois, ils soulignent les lacunes dans la connaissance de certains éléments, notamment les halogènes, le soufre, le germanium, l'arsenic, le sélénium, l'indium et les éléments du groupe du platine, dont les concentrations dans la croûte supérieure restent peu estimées [68]. Une part importante de cette incertitude repose sur l'estimation du stock ultime [19, 106], qui correspond à la quantité totale d'une ressource supposée présente dans la croûte terrestre.

Une autre source d'incertitude provient des limites des inventaires de ressources tels qu'ils sont généralement présentés dans les analyses de cycle de vie. Ces inventaires ont été initialement conçus pour capturer l'extraction des ressources lors des premières étapes du cycle de vie, et non pour évaluer les pertes de ressources tout au long du cycle de vie d'un produit [49]. En conséquence, il est difficile d'obtenir des données fiables concernant les flux élémentaires à l'intérieur de la technosphère ainsi que vers l'écosphère et la technosphère (flux d'émissions). Cela impose souvent le recours à des proxys pour adapter des ensembles de données existants qui, dans de nombreux cas, sont des choix subjectifs.

Dans le cadre de ce projet, ces données ont été utilisées malgré les incertitudes connues. Cependant, étant donné les valeurs minimales d'exergie associées aux ressources minérales, il est supposé que cette incertitude n'affectera pas la validité des résultats obtenus.

5.3 Perspectives de recherche sur l'impact de l'utilisation des ressources

5.3.1 Nouveau paradigme sur la valeur des ressources

La diversité des impacts liés à l'utilisation des ressources a été examinée par une partie de la communauté de l'analyse du cycle de vie (ACV), et ces impacts dépendent de la manière dont on évalue les ressources ainsi que de ce que l'on cherche à préserver. Verones et al. proposent une approche élargie de la valeur des ressources, englobant leur valeur instrumentale et intrinsèque [12]. Chacune des perspectives identifiées par ces auteurs ouvre la voie à dif-

férents chemins d'impact. Les limites précédemment établies soulignent la nécessité d'élargir ce cadre conceptuel dans la définition de la valeur des ressources. L'enjeu futur réside dans le développement d'approches plus holistiques, capables d'englober la majorité des mécanismes d'impact liés à l'utilisation de plusieurs catégories de ressources, tout en maintenant une clarté et une cohérence dans les résultats [29].

Intégration de la dissipation

Au-delà de la valeur instrumentale des ressources associée à leur épuisement, ce travail met en lumière l'importance de considérer la valeur des ressources pour la société et l'impact de leur inaccessibilité causée par leur dissipation. Des avancées méthodologiques récentes en évaluation d'impact du cycle de vie (EICV) ont insisté sur ce point [7, 9, 14, 24]. Pour que la dissipation soit reconnue comme une véritable catégorie d'impact dans l'utilisation des ressources, il est nécessaire de distinguer les émissions qui contribuent à la perte d'accessibilité d'une ressource de celles qui n'y participent pas sur une période donnée [78]. La classification des émissions dissipatives pourrait devenir une étape clé dans la réalisation d'une ACV, reliant ainsi la phase d'inventaire du cycle de vie à celle de caractérisation des impacts [78].

Élargissement à la valeur fonctionnelle des ressources

La majorité des ressources naturelles ont une valeur fonctionnelle pour l'humanité, dans la mesure où elles servent à atteindre d'autres objectifs qui ont une valeur intrinsèque, tels que le bien-être et la santé de l'homme [107]. La fonctionnalité d'une ressource peut être évaluée selon des critères tels que la qualité, l'accessibilité, la faisabilité économique et la possibilité de substitution [107]. Greffe et al. ont développé une première méthode d'impact qui permet d'analyser le déficit de la valeur instrumentale des ressources et ses conséquences sur le bien-être humain. Cette méthode repose sur l'évaluation des services rendus par les ressources pour l'homme. Selon eux, la dissipation des ressources contribue à aggraver ce déficit de services [108].

Définition de seuils temporelles et énergétiques

Les perspectives précédentes sont étroitement liées à la notion d'accessibilité de la valeur instrumentale des ressources. Comme mentionné en section 5.2.1, l'intégration d'une échelle d'accessibilité temporelle, telle que développée par Dewulf et al., permet de définir des seuils au-delà desquels une ressource devient inaccessible en raison de sa dissipation (voir la Figure 5.1) [90]. Ces seuils temporels pourraient être complétés par des seuils énergétiques. En effet,

plusieurs travaux, notamment ceux de Rötzer et al. et Magdalena et al., mettent en évidence les limites énergétiques liées à l'exploitation des ressources en fonction de la teneur des minerais dont elles sont extraites (voir la Figure 5.1) [98, 109, 110]. Ces recherches mettent en évidence une augmentation exponentielle des besoins énergétiques à mesure que l'extraction concerne des minerais de plus faible teneur [98, 109, 110].

Dans la suite des approches basées sur l'utilisation de seuils, les travaux relatifs au concept de limites planétaires constituent une piste pertinente pour évaluer les impacts liés à l'utilisation des ressources. Comme mentionné brièvement dans l'introduction (Section 1.1.3), les recherches menées sur l'ACV absolue permettent d'identifier un seuil temporel reflétant la capacité d'adaptation à l'utilisation d'une ressource [16]. Cependant, cette approche demeure peu explorée en ce qui concerne les ressources naturelles non renouvelables. L'étude menée par Baabou et al. [111] constitue l'une des rares tentatives d'évaluation de la durabilité environnementale absolue appliquée à la dissipation des matériaux. Toutefois, elle présente plusieurs limites méthodologiques, notamment en ce qui concerne l'évaluation de la « carrying capacity », qui correspond aux seuils. De plus, au sein de la communauté de recherche en ACV absolue, la définition des seuils pour les ressources non-renouvelable reste normative, ces critères étant influencés par le jugement humain [15]. Cette approche diverge ainsi de la logique initiale des limites planétaires, qui vise à déterminer à partir de quel niveau l'exploitation des ressources compromet le bon fonctionnement des systèmes naturels. À ce jour, seuls l'utilisation des ressources en eau douce et en terres ont démontré un impact observable sur l'équilibre du système Terre [112].

Les perspectives de recherche exposées dans cette section doivent être envisagées de manière complémentaire et développées conjointement. Une telle approche permettra de fournir une évaluation plus représentative des impacts de l'utilisation des ressources, en tenant compte d'une meilleure définition de ce que l'on cherche à protéger des ressources.

5.3.2 Résolution des inventaires de cycle de vie

Pour identifier les impacts liés à l'utilisation des ressources tout au long du cycle de vie évalué, il est essentiel de disposer d'un inventaire complet des flux entrants et sortants à chaque étape de ce cycle. De nombreux défis ont été soulignés concernant l'amélioration de la précision et de la résolution des inventaires de cycle de vie pour les ressources [29, 78, 90, 108, 113]. Actuellement, un manque significatif de données sur les ressources limite la possibilité d'intégrer pleinement les perspectives de recherche présentées en sous-section 5.3.

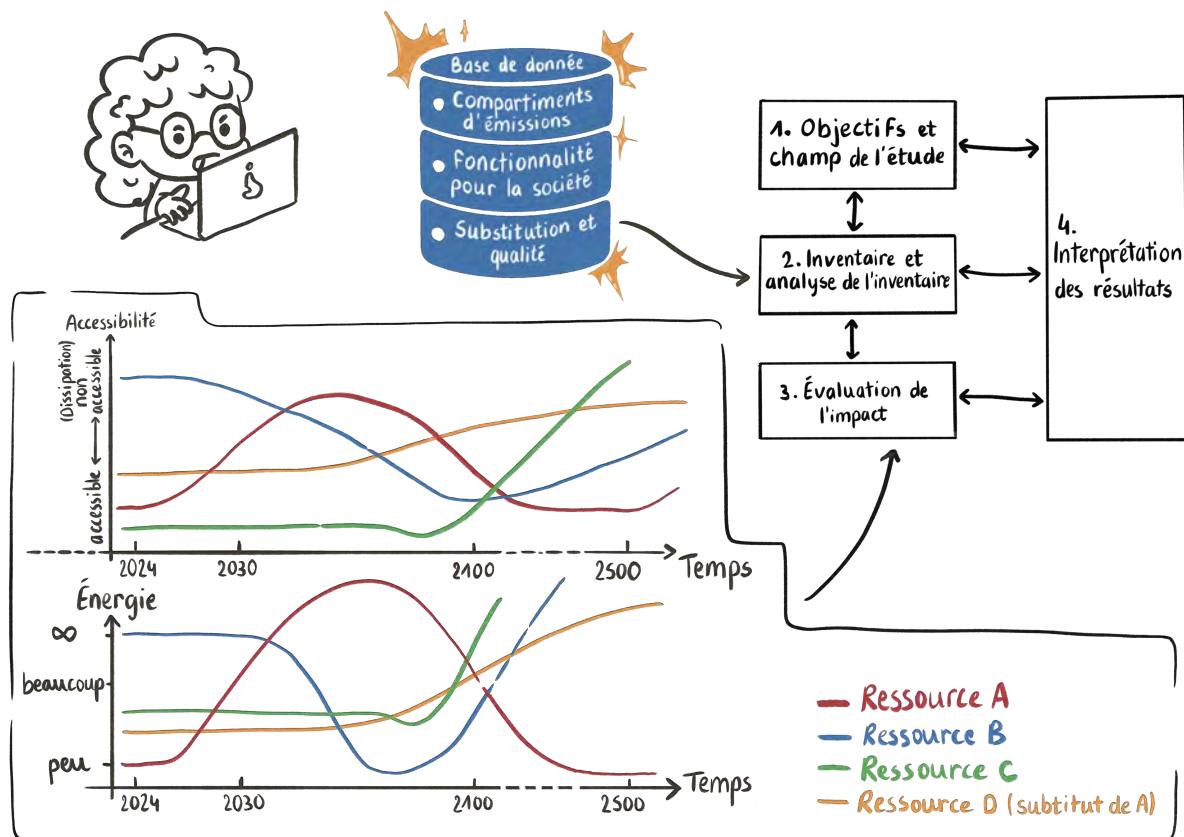


FIGURE 5.1 Représentation graphique des perspectives de recherche évoquées, en lien avec les étapes de l'ACV

Compartiments d'émission

Pour évaluer l'impact de la dissipation des ressources, il est nécessaire d'ajouter des informations sur les flux sortants des différentes phases du cycle de vie. Le principal défi réside dans l'intégration de données détaillées concernant la quantité de ressources émises dans chaque compartiment d'émission, à savoir si l'émission de la ressource a lieu «dans le sol», «dans une décharge», «dans des résidus miniers», et autres compartiments [29]. Idéalement, ces données devraient être régionalisées afin d'améliorer la précision de l'évaluation des impacts. De plus, d'autres compartiments d'émission, comme les sédiments marins et d'eau douce, devraient également être pris en compte, car ils constituent des voies d'émission importantes pour de nombreux métaux [113].

Fonction des ressources

Comme l'ont souligné Greffe et al., il est essentiel d'établir les relations entre les différentes ressources (ou matériaux) et leurs usages finaux [107, 108]. L'ajout d'informations complémentaires dans les inventaires de cycle de vie pourrait inclure :

- la caractérisation de la fonctionnalité des flux élémentaires et économiques des ressources au sein de la société ;
- les possibilités de substitution des ressources pour une fonction donnée, y compris la quantité de ressource substitutive nécessaire pour fournir un service ou une fonction équivalente à celle initiale [108] ;
- la caractérisation de la qualité limite d'une ressource préservant sa fonction initiale [107].

Des efforts de recherche supplémentaires sont indispensables pour combler ces lacunes dans les inventaires de cycle de vie. L'intégration de ces informations devra s'effectuer en collaboration étroite avec les gouvernements, ainsi qu'avec les industries d'extraction et de recyclage.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

6.1 Synthèse des travaux

En conclusion, ce projet de maîtrise explore la pertinence de l'exergie dans l'évaluation de l'impact de l'utilisation des ressources. En effet, il est possible de caractériser les ressources énergétiques et matérielles utilisées dans un procédé grâce au travail utile exprimé dans une unité commune en Joules. Les résultats révèlent une limite importante dans son utilisation comme métrique unifiée pour tous les types de ressources. Cette limite s'explique par les divergences constatées entre les calculs théoriques d'exergie et les processus réels d'extraction, particulièrement pour les ressources minérales. En théorie, une quantité suffisante de travail permettrait d'extraire même des ressources très dispersées. Cependant, dans la réalité, l'irréversibilité des processus engendre un écart entre le travail effectivement requis pour extraire une ressource et l'exergie, qui reste une valeur théorique correspondant au minimum de travail nécessaire. Ce projet souligne ainsi la complexité de la valorisation des ressources, qui dépasse le cadre des principes strictement thermodynamiques.

La principale conclusion de ce travail est que le potentiel de travail réel, requis ou réalisable avec les technologies actuelles, n'est pas fidèlement représenté par le potentiel théorique qu'est l'exergie, en raison de l'irréversibilité inhérente aux systèmes actuels. Cet écart entre le travail réel et théorique varie selon le type de ressource ; cela introduit des biais dans l'évaluation des ressources à protéger en priorité, influençant ainsi les décisions en matière de gestion et de préservation des ressources. Par conséquent, l'exergie présente une pertinence limitée pour cette application spécifique.

En outre, l'utilisation de l'exergie pour évaluer les effets de la dissipation des ressources peut être entravée par certains choix méthodologiques, tels que l'absence d'un horizon temporel pour mesurer les impacts de la dissipation sur plusieurs années. D'autres obstacles relèvent de problématiques plus complexes ou incompatibles avec le cadre d'utilisation de l'exergie, comme la définition de la valeur fonctionnelle des ressources pour la société, indépendamment de leur valeur physique (ici, le travail).

6.2 Recommendations

L'évaluation de l'impact de l'utilisation des ressources est une tâche complexe qui ne se réduit pas à une seule chaîne de causes à effet. Historiquement, l'analyse se concentrerait principalement sur l'impact lié à l'extraction des ressources. Cependant, l'impact de la dissipation

commence désormais à être pris en compte. L'exergie, en permettant d'évaluer le potentiel de travail dissipé et rendu inaccessible, constitue un outil intéressant, bien que, comme mentionné précédemment, elle ne soit pas un indicateur entièrement adéquat.

Ces dernières années, de nouvelles méthodes, telles que l'EDP [24], l'Abiotic Resource Project (ARP) [78], et les travaux de Dewulf et al. [76], ont émergé pour mieux évaluer les impacts liés à la dissipation. Malgré ces avancées, l'évaluation de l'impact des ressources reste multidimensionnelle, reposant sur de nombreux facteurs et effets. Ni l'exergie ni ces nouvelles méthodes ne permettent, à ce jour, de prendre en compte toutes les dimensions environnementales conjointement, comme la fonctionnalité des ressources pour la société, leur accessibilité, la temporalité des impacts, etc. Une approche plurielle apparaît donc nécessaire pour représenter l'ensemble de ces dimensions.

Par ailleurs, la majorité des méthodes existantes se focalisent sur une catégorie de ressources, souvent les ressources minérales. À l'origine, l'intérêt de l'exergie résidait dans sa capacité à évaluer conjointement diverses catégories de ressources, afin de mieux identifier des compromis permettant leur préservation globale et d'éviter les déplacements d'impact causés par un changement dans la consommation d'une catégorie au détriment d'une autre [114].

Il serait également pertinent d'étendre les analyses actuelles à l'impact de la revalorisation et de la réutilisation des ressources, en intégrant l'utilisation des ressources secondaires dans les catégories d'impact. Un élargissement du champ d'évaluation pourrait aider à mieux exploiter les ressources et à éviter de considérer la planète comme une "Grande Mine", capable de satisfaire indéfiniment la demande actuelle d'extraction de ressources primaires sans tenir compte des impacts futurs [114].

Enfin, la communauté travaillant sur l'ACV gagnerait à développer de meilleurs indicateurs permettant de quantifier ces impacts. Ces avancées pourraient nourrir les théories de la décroissance et de la soutenabilité, tout en contribuant à orienter les politiques publiques vers une gestion plus responsable des ressources.

Bien que cette recherche souligne le potentiel prometteur mais finalement limité, de l'exergie pour évaluer l'impact de l'utilisation des ressources, elle ouvre une réflexion plus large sur la valeur des ressources pour la société et les multiples dimensions environnementales qui y sont liées. Ces enjeux, encore largement débattus au sein de la communauté scientifique, devraient également occuper une place centrale dans les processus de décision politique.

RÉFÉRENCES

- [1] F. Creutzig, S. G. Simoes, S. Leipold, P. Berrill, I. Azevedo, O. Edelenbosch, T. Fishman, H. Haberl, E. Hertwich, V. Krey, A. T. Lima, T. Makov, A. Mastrucci, N. Milojevic-Dupont, F. Nachtigall, S. Pauliuk, M. Silva, E. Verdolini, D. van Vuuren, F. Wagner, D. Wiedenhofer et C. Wilson, "Demand-side strategies key for mitigating material impacts of energy transitions," *Nature Climate Change*, vol. 14, p. 561–572, 6 2024.
- [2] M. Fischer-Kowalski, M. Swilling et E. U. Von-Weizsäcker, "Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth," 2011. [En ligne]. Disponible : <https://www.resourcepanel.org/reports/decoupling-natural-resource-use-and-environmental-impacts-economic-growth>
- [3] I. S. 5, "Management environnemental— analyse du cycle de vie— principes et cadre," 7 2006. [En ligne]. Disponible : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:fr>
- [4] G. Finnveden, M. Z. Hauschild, T. Ekvall, J. Guinée, R. Heijungs, S. Hellweg, A. Koehler, D. Pennington et S. Suh, "Recent developments in life cycle assessment," *Journal of Environmental Management*, vol. 91, p. 1–21, 10 2009.
- [5] M. Goedkoop, R. Heijungs, A. D. Schryver, J. Struijs et R. V. Zelm, "Recipe 2008 a life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level i," 2013.
- [6] C. Bulle, M. Margni, L. Patouillard, A.-M. Boulay, G. Bourgault, V. D. Bruille, V. Cao, M. Hauschild, A. Henderson, S. Humbert, S. Kashef-Haghghi, A. Kounina, A. Laurent, A. Levasseur, G. Liard, R. K. Rosenbaum, P.-O. Roy, S. Shaked, P. Fantke et O. Jolliet, "Lcia of impacts on human health and ecosystems impact world+ : a globally regionalized life cycle impact assessment method," *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 24, p. 1653–1674, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01583-0>
- [7] R. Schulze, J. Guinée, L. V. Oers, R. Alvarenga, J. Dewulf et J. Drielsma, "Abiotic resource use in life cycle impact assessment-part ii-linking perspectives and modelling concepts," *Resources, Conservation and Recycling*, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104595>
- [8] J. Dewulf, L. Benini, L. Mancini, S. Sala, G. A. Blengini, F. Ardente, M. Recchioni, J. Maes, R. Pant et D. Pennington, "Rethinking the area of protection "natural resources" in life cycle assessment," *Environmental Science and Technology*, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1021/es504030u>

- ligne]. Disponible : <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>
- [9] A. BEYLOT, F. ARDENTE, D. S. M. A. PENEDO, F. MATHIEUX, R. PANT, S. SALA et L. ZAMPORI, *Abiotic and biotic resources impact categories in LCA : development of new approaches.* Publications Office of the European Union, 6 2020. [En ligne]. Disponible : <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC120170>
- [10] T. Sonderegger, J. Dewulf, P. Fantke, D. M. D. Souza, S. Pfister, F. Stoessel, F. Verones, M. Vieira, B. Weidema et S. Hellweg, “Towards harmonizing natural resources as an area of protection in life cycle impact assessment,” *Int J Life Cycle Assess*, vol. 22, p. 1912–1927, 2017.
- [11] I. R. P. United Nations Environment Programme, “Global resources outlook 2024 - bend the trend : Pathways to a liveable planet as resource use spikes,” 2024. [En ligne]. Disponible : <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44901>
- [12] F. Verones, J. Bare, C. Bulle, R. Frischknecht, M. Hauschild, S. Hellweg, A. Henderson, O. Jolliet, A. Laurent, X. Liao, J. P. Lindner, D. M. de Souza, O. Michelsen, L. Patouillard, S. Pfister, L. Posthuma, V. Prado, B. Ridoutt, R. K. Rosenbaum, S. Sala, C. Ugaya, M. Vieira et P. Fantke, “Lcia framework and cross-cutting issues guidance within the unep-setac life cycle initiative,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 161, p. 957–967, 9 2017.
- [13] J. Dewulf, L. Mancini, G. A. Blengini, S. Sala, C. Latunussa et D. Pennington, “Toward an overall analytical framework for the integrated sustainability assessment of the production and supply of raw materials and primary energy carriers,” *Journal of Industrial Ecology*, vol. 19, p. 963–977, 12 2015. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.12289>
- [14] R. Schulze, J. Guinée, L. van Oers, R. Alvarenga, J. Dewulf et J. Drielsma, “Abiotic resource use in life cycle impact assessment—part i- towards a common perspective,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 154, p. 104596, 3 2020. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344919305026>
- [15] A. Bjorn, C. Chandrakumar, A. M. Boulay, G. Doka, K. Fang, N. Gondran, M. Z. Hauschild, A. Kerkhof, H. King, M. Margni, S. McLaren, C. Mueller, M. Owsiania, G. Peters, S. Roos, S. Sala, G. Sandin, S. Sim, M. Vargas-Gonzalez et M. Ryberg, “Review of life-cycle based methods for absolute environmental sustainability assessment and their applications,” *Environmental Research Letters*, vol. 15, p. 083001, 7 2020. [En ligne]. Disponible : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab89d7>

- [16] M. Vargas-Gonzalez, F. Witte, P. Martz, L. Gilbert, S. Humbert, O. Jolliet, R. V. Zelm et J. L'haridon, "Operational life cycle impact assessment weighting factors based on planetary boundaries : Applied to cosmetic products," *Ecological Indicators*, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105498>
- [17] M. Berger, T. Sonderegger, R. Alvarenga, V. Bach, A. Cimprich, J. Dewulf, R. Frischknecht, J. Guinée, C. Helbig, T. Huppertz, O. Jolliet, M. Motoshita, S. Northey, C. A. Peña, B. Rugani, A. Sahnoune, D. Schrijvers, R. Schulze, G. Sonnemann, A. Valero, B. P. Weidema et S. B. Young, "Mineral resources in life cycle impact assessment : part ii – recommendations on application-dependent use of existing methods and on future method development needs," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, p. 798–813, 4 2020. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-020-01737-5>
- [18] L. van Oers, J. B. Guinée et R. Heijungs, "Abiotic resource depletion potentials (adps) for elements revisited—updating ultimate reserve estimates and introducing time series for production data," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, p. 294–308, 2 2020. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-019-01683-x>
- [19] J. B. Guinée et R. Heijungs, "A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment," *Environmental Toxicology and Chemistry*, vol. 14, p. 917–925, 1995.
- [20] M. Hauschild et J. Potting, "Guidelines from the danish environmental protection agency spatial differentiation in life cycle impact assessment the edip2003 methodology," 2004.
- [21] M. D. Vieira, T. C. Ponsioen, M. J. Goedkoop et M. A. Huijbregts, "Surplus ore potential as a scarcity indicator for resource extraction," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 21, p. 381–390, 4 2017. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.12444>
- [22] M. D. M. Vieira, T. C. Ponsioen, M. J. Goedkoop, M. A. J. Huijbregts et M. Schmidt, "Surplus cost potential as a life cycle impact indicator for metal extraction," *Resources*, 2016. [En ligne]. Disponible : www.mdpi.com/journal/resources
- [23] M. Goedkoop, P. Hofstetter, R. Müller-Wenk et R. Spiersma, "The eco-indicator 98 explained," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 3, p. 352–360, 1998. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02979347>
- [24] L. van Oers, J. B. Guinée, R. Heijungs, R. Schulze, R. A. Alvarenga, J. Dewulf, J. Drielsma, D. Sanjuan-Delmás, T. C. Kampmann, G. Bark, A. G. Uriarte,

- P. Menger, M. Lindblom, L. Alcon, M. S. Ramos et J. M. E. Torres, "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," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, p. 2255–2273, 11 2020. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-020-01819-4>
- [25] E. D. Gemechu, C. Helbig, G. Sonnemann, A. Thorenz et A. Tuma, "Import-based indicator for the geopolitical supply risk of raw materials in life cycle sustainability assessments," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 20, p. 154–165, 2 2016. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.12279>
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jiec.12279>
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.12279>
- [26] V. Bach, M. Berger, M. Henßler, M. Kirchner, S. Leiser, L. Mohr, E. Rother, K. Ruhland, L. Schneider, L. Tikana, W. Volkhausen, F. Walachowicz et M. Finkbeiner, "Integrated method to assess resource efficiency – essenz," *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, p. 118–130, 11 2016.
- [27] T. Sonderegger, M. Berger, R. Alvarenga, V. Bach, A. Cimprich, J. Dewulf, R. Frischknecht, J. Guinée, C. Helbig, T. Huppertz, O. Jolliet, M. Motoshita, S. Northey, B. Rugani, D. Schrijvers, R. Schulze, G. Sonnemann, A. Valero, B. P. Weidema et S. B. Young, "Mineral resources in life cycle impact assessment—part i : a critical review of existing methods," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, p. 784–797, 4 2020. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-020-01736-6>
- [28] M. Berger, "Dissipation-based life cycle impact assessment of mineral resource use—a review, case study, and implications for the product environmental footprint," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 29, p. 1177–1189, 7 2024. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-024-02318-6>
- [29] A. Beylot, F. Ardente, S. Sala et L. Zampori, "Accounting for the dissipation of abiotic resources in lca : Status, key challenges and potential way forward," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 157, p. 104748, 6 2020.
- [30] G. Wall, "Exergy-a useful concept within resource accounting," 1977. [En ligne]. Disponible : https://www.researchgate.net/publication/242530997_Exergy-a_useful_concept_within_resource_accounting
- [31] A. Valero et A. Valero, "Exergy evolution of the mineral capital on earth," Thèse de doctorat, University of Zaragoza, 2008.
- [32] J. Szargut, "Chemical exergies of the elements," *Applied Energy*, 1989.

- [33] M. A. Rosen, I. Dincer et M. Kanoglu, “Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact,” *Energy Policy*, vol. 36, p. 128–137, 1 2008.
- [34] I. Dincer et M. A. Rosen, *Exergy, Environment And Sustainable Development*, 2^e éd. Elsevier, 2013.
- [35] M. Gong et G. Wall, “On exergy and sustainable development—part 2 : Indicators and methods,” *Exergy, An International Journal*, vol. 1, p. 217–233, 1 2001.
- [36] A. G. Hernandez et J. M. Cullen, “Exergy : A universal metric for measuring resource efficiency to address industrial decarbonisation,” *Sustainable Production and Consumption*, vol. 20, p. 151–164, 10 2019. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352550919300879>
- [37] B. D. Meester, J. Dewulf, A. Janssens et A. Vanlangenhove, “An improved calculation of the exergy of natural resources for exergetic life cycle assessment (elca),” *Environmental Science and Technology*, 2006. [En ligne]. Disponible : <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>
- [38] K. Gaudreau, R. A. Fraser et S. Murphy, “The tenuous use of exergy as a measure of resource value or waste impact,” *Sustainability*, vol. 1, p. 1444–1463, 2009. [En ligne]. Disponible : https://www.researchgate.net/publication/40755331_The_Tenuous_Use_of_Exergy_as_a_Measure_of_Resource_Value_or_Waste_Impact
- [39] L. Stougie, “Exergy and sustainability insights into the value of exergy analysis in sustainability assessment of technological systems,” Thèse de doctorat, Technische Universiteit Delft, 2014.
- [40] J. Szargut et D. Morris, “Cumulative exergy consumption and cumulative degree of perfection of chemical processes,” *International Journal of Energy Research*, vol. 11, p. 245–261, 1987. [En ligne]. Disponible : <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1002/er.4440110207>
- [41] M. Lozano et A. Valero, “Theory of the exergetic cost,” *Energy*, vol. 18, p. 939–960, 9 1993. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/036054429390006Y>
- [42] M. E. Bösch, S. Hellweg, M. A. Huijbregts et R. Frischknecht, “Applying cumulative exergy demand (cexd) indicators to the ecoinvent database,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 12, p. 181–190, 11 2007. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1065/lca2006.11.282>
- [43] J. Dewulf, M. E. Bösch, B. D. Meester, G. V. D. Vorst, H. V. Langenhove, S. Hellweg et M. A. Huijbregts, “Cumulative exergy extraction from the natural

- environment (ceene) : A comprehensive life cycle impact assessment method for resource accounting,” *Environmental Science and Technology*, vol. 41, p. 8477–8483, 12 2007. [En ligne]. Disponible : <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es0711415>
- [44] R. L. Cornelissen, “Thermodynamics and sustainable development,” Thèse de doctorat, Universiteit Twente, 1997.
- [45] R. L. Cornelissen et G. G. Hirs, “The value of the exergetic life cycle assessment besides the lca,” *Energy Conversion and Management*, p. 1417–1424, 2002. [En ligne]. Disponible : www.elsevier.com/locate/enconman
- [46] A. Valero, A. Valero et W. Stanek, “Assessing the exergy degradation of the natural capital : From szargut’s updated reference environment to the new thermoeological-cost methodology,” *Energy*, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.091>
- [47] A. Valero, A. Valero et G. Calvo, *The Material Limits of Energy Transition : Thanatia*. Springer, 2021.
- [48] J. T. Rørbech, C. Vadenbo, S. Hellweg et T. F. Astrup, “Impact assessment of abiotic resources in lca : Quantitative comparison of selected characterization models,” *Environmental Science and Technology*, vol. 48, p. 11072–11081, 10 2014. [En ligne]. Disponible : <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/es5023976>
- [49] A. Beylot, J. Dewulf, T. Greffe, S. Muller et G. A. Blengini, “Mineral resources depletion, dissipation and accessibility in lca : a critical analysis,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 29, p. 890–908, 5 2024. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-023-02278-3>
- [50] M. A. R. Ibrahim Dincer, *Exergy*, 3^e éd. Elsevier, 2020.
- [51] K. Gaudreau, R. A. Fraser et S. Murphy, “The characteristics of the exergy reference environment and its implications for sustainability-based decision-making,” *Energies*, vol. 5, p. 2197–2213, 2012. [En ligne]. Disponible : https://www.researchgate.net/publication/267723602_The_Characteristics_of_the_Exergy_Reference_Environment_and_Its_Implications_for_Sustainability-Based_Decision-Making
- [52] Bakshi, Gutowski et Sekulic, “Thermodynamics and the destruction of resources,” 2011.
- [53] G. Finnveden et P. Östlund, “Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications,” *Energy*, vol. 22, p. 923–931, 9 1997.
- [54] E. Bernier, “Application de l’analyse du cycle de vie à l’optimisation thermoéconomique d’un système de procédés,” proposition de recherche.
- [55] J. Ahrendts, “Reference states,” *Energy*, vol. 5, p. 666–677, 8 1980.

- [56] J. Szargut, A. Valero, W. Stanek et A. Valero, "Towards an international reference environment of chemical exergy," *Environmental Science, Chemistry*, 2005.
- [57] J. Szargut, *Exergy Method Technical and Ecological Applications*. WIT Press, 2005.
- [58] C. Borgnakke et R. E. Sonntage, *Fundamentals of Thermodynamics*, 7^e éd. John Wiley and Sons, 2009.
- [59] T. Gundersen, "The concept of exergy and energy quality," 2011.
- [60] A. Valero, A. Valero et A. Martínez, "Exergy evaluation of the mineral capital on earth : Influence of the reference environment," *American Society of Mechanical Engineers, Advanced Energy Systems Division (Publication) AES*, vol. 45, p. 235–242, 2 2008. [En ligne]. Disponible : <https://dx.doi.org/10.1115/IMECE2005-79715>
- [61] J.-L. Palacios, A. Abadias, A. Valero, A. Valero et M. A. Reuter, "Producing metals from common rocks : The case of gold," *Resources, Conservation and Recycling*, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.026>
- [62] N. Eisenmenger, B. Warr et A. Magerl, "Trends in austrian resource efficiency : An exergy and useful work analysis in comparison to material use, co2 emissions, and land use," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 21, p. 1250–1261, 10 2017.
- [63] G. Calvo, A. Valero, A. Valero et O. Carpintero, "An exergoecological analysis of the mineral economy in spain," *Energy*, 2015. [En ligne]. Disponible : <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.083>
- [64] L. G. Carmona, K. Whiting, A. Valero et A. Valero, "Colombian mineral resources : An analysis from a thermodynamic second law perspective," *Resources Policy*, 2015. [En ligne]. Disponible : <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.03.005>
- [65] S. Ulgiati, H. Schnitzer, R. Santagata, S. Khedr, M. Casisi et M. Reini, "The thermoeconomic environment cost indicator (i ex-tee) as a one-dimensional measure of resource sustainability," *Energies*, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.3390/en15062260>
- [66] J. F. Peters, "Reinventing exergy as indicator for resource depletion impacts in lca," *Matériaux et Techniques*, vol. 108, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1051/matech/2021003>
- [67] I. Dincer, "Exergetic life cycle assessment," *Exergy*, 2021. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824372-5.00022-1>
- [68] R. Rudnick et S. Gao, "Composition of the continental crust. treatise on geochemistry," 2003. [En ligne]. Disponible : <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>

- [69] G. Calvo, A. Valero et A. Valero, "Thermodynamic approach to evaluate the criticality of raw materials and its application through a material flow analysis in europe," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 22, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.12624>
- [70] W. Stanek, *Thermodynamics for Sustainable Management of Natural Resources*. Springer, 2017.
- [71] F. Ardente, A. Beylot et L. Zampori, "A price-based life cycle impact assessment method to quantify the reduced accessibility to mineral resources value," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 28, p. 95–109, 1 2023. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-022-02102-4>
- [72] S. Pauliuk, T. Fishman, N. Heeren, P. Berrill, Q. Tu, P. Wolfram et E. G. Hertwich, "Linking service provision to material cycles : A new framework for studying the resource efficiency–climate change (recc) nexus," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 25, p. 260–273, 4 2021. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.13023>
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.13023>
- [73] J. Dewulf, L. Benini, L. Mancini, S. Sala, G. A. Blengini, F. Ardente, M. Recchioni, J. Maes, R. Pant et D. Pennington, "Rethinking the area of protection "natural resources" in life cycle assessment," *Environmental Science and Technology*, 2015. [En ligne]. Disponible : <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>
- [74] T. Sonderegger, M. Berger, R. Alvarenga, V. Bach, A. Cimprich, J. Dewulf, R. Frischknecht, J. Guinée, C. Helbig, T. Huppertz, O. Jolliet, M. Motoshita, S. Northey, B. Rugani, D. Schrijvers, R. Schulze, G. Sonnemann, A. Valero, B. P. Weidema et S. B. Young, "Mineral resources in life cycle impact assessment—part i : a critical review of existing methods," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 25, p. 784–797, 4 2020a. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-020-01736-6>
- [75] G. Sonnemann, E. D. Gemechu, N. Adibi, V. D. Bruille et C. Bulle, "From a critical review to a conceptual framework for integrating the criticality of resources into life cycle sustainability assessment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 94, p. 20–34, 5 2015.
- [76] J. Dewulf, S. Hellweg, S. Pfister, M. F. G. León, T. Sonderegger, C. T. de Matos, G. A. Blengini et F. Mathieu, "Towards sustainable resource management : identification and quantification of human actions that compromise the accessibility of metal resources," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 167, p. 105403, 4 2021.

- [77] L. van Oers, J. B. Guinée, R. Heijungs, R. Schulze, R. A. Alvarenga, J. Dewulf et J. Drielsma, "Top-down characterization of resource use in lca : from problem definition of resource use to operational characterization factors for resource inaccessibility of elements in a short-term time perspective," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 29, p. 1315–1338, 7 2024. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-024-02297-8>
- [78] M. Owsiania, L. van Oers, J. Drielsma, A. Laurent et M. Z. Hauschild, "Identification of dissipative emissions for improved assessment of metal resources in life cycle assessment," *Journal of Industrial Ecology*, vol. 26, p. 406–420, 4 2022. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.13209>
- [79] J. A. Drielsma, A. J. Russell-Vaccari, T. Drnek, T. Brady, P. Weihs, M. Mistry et L. P. Simbor, "Mineral resources in life cycle impact assessment—defining the path forward," *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, p. 85–105, 1 2016. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-015-0991-7>
- [80] L. Connally et C. P. Koshland, "Exergy and industrial ecology—part 1 : An exergy-based definition of consumption and a thermodynamic interpretation of ecosystem evolution," *Exergy, An International Journal*, vol. 1, p. 146–165, 1 2001. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1164023501000218>
- [81] A. Valero et A. Valero, "Exergy evolution of the mineral capital on earth," Thèse de doctorat, University of Zaragoza, 2008.
- [82] E. Sciubba, "A thermodynamic measure of sustainability," *Frontiers in Sustainability*, vol. 2, 2021.
- [83] T. K. Ibrahim, M. K. Mohammed, O. I. Awad, A. N. Abdalla, F. Basrawi, M. N. Mohammed, G. Najafi et R. Mamat, "A comprehensive review on the exergy analysis of combined cycle power plants," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, p. 835–850, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211830159X>
- [84] E. Sciubba, "Extended exergy accounting applied to energy recovery from waste : The concept of total recycling," *Energy*, vol. 28, n°. 13, p. 1315–1334, 2003, strategies of Waste Energy Usage : Belin-Brandenburg Academy of Sciences Conference Dec 1999. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544203001117>
- [85] B. K. Reck et T. E. Graedel, "Challenges in metal recycling," p. 690–695, 8 2012.
- [86] O. Ignatenko, A. van Schaik et M. Reuter, "Exergy as a tool for evaluation of the resource efficiency of recycling systems," *Minerals Engineering*, vol. 20, n°. 9, p. 862–874, 2007, selected papers from Material, Minerals and Metal

- Ecology '06, Cape Town, South Africa, November 2006. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687507000854>
- [87] P. H. Brunner et H. Rechberger, *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. Lewis, 2004.
- [88] N. Lior et N. Zhang, "Energy, exergy, and second law performance criteria," *Energy*, vol. 32, p. 281–296, 2007. [En ligne]. Disponible : www.elsevier.com/locate/energy
- [89] J. Szargut, *Exergy Method Technical and Ecological Applications*. WIT Press, 2005.
- [90] J. Dewulf, A. Beylot, D. Monfort, F. Lai, J. S. Saldivar, S. Muller et F. Mathieu, "Contribution to inaccessibility as resource impact method : A base for sustainable resource management along the life cycle," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 202, p. 107363, 3 2024.
- [91] A. Beylot, F. Ardente, S. Sala et L. Zampori, "Accounting for the dissipation of abiotic resources in lca : Status, key challenges and potential way forward," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 157, p. 104748, 6 2020.
- [92] Z.-K. Liu, "Thermodynamics and its prediction and calphad modeling : Review, state of the art, and perspectives," *Calphad*, vol. 82, p. 102580, 2023. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0364591623000524>
- [93] M. A. Reuter, R. Degel, N. Borowski, D. Apushkin, Ł. Szwancyber, D. Chwaleba, K. Rogóż, D. Głowacki et K. P. M. SA, "Digital twin for kghm-legnica : Simulation-based footprinting & exergy allocation of impacts," dans *Proceedings of EMC*, 2023, p. 1.
- [94] C. Bale, E. Bélisle, P. Chartrand, S. Dechterov, G. Eriksson, A. Gheribi, K. Hack, I.-H. Jung, Y.-B. Kang, J. Melançon, A. Pelton, S. Petersen, C. Robelin, J. Sangster, P. Spencer et M.-A. Van Ende, "Reprint of : Factsage thermochemical software and databases, 2010–2016," *Calphad*, vol. 55, p. 1–19, 2016, christopher W. Bale Symposium - Thermodynamic Applications, Optimizations and Simulations in High Temperature Processes. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0364591616300980>
- [95] G. Calvo, J.-L. Palacios et A. Valero, "The influence of ore grade decline on energy consumption and ghg emissions : The case of gold," *Environmental Development*, vol. 41, p. 100683, 3 2022. [En ligne]. Disponible : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211464521000889>
- [96] D. Scott, J. Haacke, L. Osmonson, J. Luppens, P. Pierce et T. Rohrbacher, "Assessment of coal geology, resources, and reserves in the northern wyoming powder river basin," 2011. [En ligne]. Disponible : <https://pubs.usgs.gov/of/2010/1294/>

- [97] Ecoinvent, “Ecoinvent database v3.10,” 2023, accessed : 20-09-2024.
- [98] N. Rötzer et M. Schmidt, “Historical, current, and future energy demand from global copper production and its impact on climate change,” *Resources 2020, Vol. 9, Page 44*, vol. 9, p. 44, 4 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.mdpi.com/2079-9276/9/4/44>
- [99] P. Jose-Luis, A. Abadias, A. Valero, A. Valero et M. Reuter, “The energy needed to concentrate minerals from common rocks : The case of copper ore,” *Energy*, vol. 181, p. 494–503, 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219310278>
- [100] A. P. Schissler, *Coal Mining, Design and Methods of*. Elsevier, 2004, vol. 1, p. 485–494. [En ligne]. Disponible : <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00284-9>
- [101] A. Valero et A. Valero, “Exergy of comminution and the thanatia earth’s model,” *Energy*, vol. 44, n°. 1, p. 1085–1093, 2012, integration and Energy System Engineering, European Symposium on Computer-Aided Process Engineering 2011. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212003015>
- [102] M. B. Castro, J. A. Remmerswaal, J. C. Brezet et M. A. Reuter, “Exergy losses during recycling and the resource efficiency of product systems,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 52, p. 219–233, 12 2007.
- [103] H. Oterdoom, M. Reuter et J. Zietsman, “Dc ferrochrome smelting : The arcing zone and its influence on energy transport and exergy dissipation,” *Metallurgical and Materials Transactions B : Process Metallurgy and Materials Processing Science*, p. 1–23, 12 2024. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11663-024-03365-y>
- [104] D. Tonini, P. F. Albizzati, D. Caro, S. D. Meester, E. Garbarino et G. A. Blengini, “Quality of recycling : Urgent and undefined,” *Waste Management*, vol. 146, p. 11–19, 6 2022.
- [105] D. Blasenbauer, A. Bogush, T. Carvalho, P. Cleall, C. Cormio, D. Guglietta, J. Fellner, M. Fernández-Alonso, S. Heuss-Aßbichler, F. Huber, U. Kral, M. Kriipsalu, J. Krook, D. Laner, J. Lederer, B. Lemière, G. Liu, R. Mao, S. Mueller, M. Quina, D. Sinnott, J. Stegemann, M. Šyc, K. Szabó, T. T. Werner, E. Wille, A. Winterstetter et G. Žibret, “Knowledge base to facilitate Anthropogenic Resource Assessment,” avr. 2020. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.5281/zenodo.3739164>
- [106] L. Schneider, M. Berger et M. Finkbeiner, “Abiotic resource depletion in lca—background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (aadp) model,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 20, p.

- 709–721, 5 2015. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-015-0864-0>
- [107] M. Stewart et B. Weidema, “A consistent framework for assessing the impacts from resource use : A focus on resource functionality,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 10, p. 240–247, 7 2005. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1065/lca2004.10.184>
- [108] T. Greffe, M. Margni et C. Bulle, “An instrumental value-based framework for assessing the damages of abiotic resources use in life cycle assessment,” *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 28, p. 53–69, 1 2023. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/10.1007/s11367-022-02107-z>
- [109] G. Calvo, G. Mudd, A. Valero et A. Valero, “Decreasing ore grades in global metallic mining : A theoretical issue or a global reality ?” *Resources*, vol. 5, 12 2016. [En ligne]. Disponible : https://www.researchgate.net/publication/309731859_Diminishing_Ore_Grades_in_Global_Metallic_Mining_A_Theoretical_Issue_or_a_Global_Reality
- [110] R. Magdalena, A. Valero, J. L. Palacios et A. Valero, “Mining energy consumption as a function of ore grade decline : the case of lead and zinc,” *Journal of Sustainable Mining*, vol. 20, p. 109–121, 6 2021. [En ligne]. Disponible : <https://jsm.gig.eu/journal-of-sustainable-mining/vol20/iss2/5>
- [111] W. Baabou, A. Bjørn et C. Bulle, “Absolute environmental sustainability of materials dissipation : Application for construction sector,” *Resources*, 2022. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.3390/resources11080076>
- [112] K. Richardson, W. Steffen, W. Lucht, J. Bendtsen, S. E. Cornell, J. F. Donges, M. Drüke, I. Fetzer, G. Bala, W. von Bloh, G. Feulner, S. Fiedler, D. Gerten, T. Gleeson, M. Hofmann, W. Huiskamp, M. Kummu, C. Mohan, D. Nogués-Bravo, S. Petri, M. Porkka, S. Rahmstorf, S. Schaphoff, K. Thonicke, A. Tobian, V. Virkki, L. Wang-Erlandsson, L. Weber et J. Rockström, “Earth beyond six of nine planetary boundaries,” *Science Advances*, vol. 9, 2023. [En ligne]. Disponible : <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adh2458>
- [113] J. Santillán-Saldivar, A. Beylot, E. Cor, E. Monnier et S. Muller, “Economic value dissipation potential (evdp) : an improved method to estimate the potential economic value loss due to resource dissipation in life cycle assessment,” *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 28, p. 1400–1418, 10 2023. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-023-02204-7>
- [114] J. Hickel, G. Kallis, T. Jackson, D. W. O’Neill, J. B. Schor, J. K. Steinberger, P. A. Victor et D. Ürge Vorsatz, “Degrowth can work — here’s how science can

help,” *Nature* 2022 612 :7940, vol. 612, p. 400–403, 12 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.nature.com/articles/d41586-022-04412-x>

**ANNEXE A DONNÉES UTILISÉES POUR LA RÉALISATION DE
L'ARTICLE**

Assessing the potential of exergy as a thermodynamic resource-use impact indicator

SUPPLEMENTARY MATERIAL 1

Content	Description
value_chemical_exergy_Valero	Table of standard chemical exergy of elements calculated by Valero et al. (2021)
value_chemical_exergy_Szargut	Table of standard chemical exergy of elements calculated by Szargut (2005)
chemical_exergy_value	Table of the difference in chemical exergy value between Szargut and Valero calculations
exergy_energy_carriers	Energy carrier exergy table with HHV and LHV
value_concentration_ex_valero	Table of concentration exergy calculations based on the value from Valero et al. (2021)
coal_concentration	Table of the concentration in average coal mines with 2 different stripping ratios of 1:1 and 10:1
molar_mass_substance	Table with a list of substances in which the element is most commonly found, along with their respective molar masses
total_exergy	Table with the total exergy of each element adding up their concentration and their chemical exergy component
energy_cons_mining	Table of energetic value for extraction activity for each element + the reference where the data was found
ratio_real-theoretical_work	Table showing the ratio between the total exergy of the element and the energy consumed in extracting that element
result_host_metal	Table of ratio for the host metal according to Nassar et al. (2015) + ratio for energy carriers
value_impact_pathway_ex	Calculation of the Dissipated Work Potential for gold, coal and copper referring to the section 3.3 of the article
value_concentration_ordremag	Calculation of the order of magnitude (ratio) following a change of state as explained in section 4.3 of the article
reference	Reference used in the excel sheets
nomenclature	Nomenclature used in the excel sheets

Element	Standard chemical exergy (kJ/mol)	Source
Ag	69.7	From Valero et al (2021)
Al	794.3	Table 4.2
Ar	11.7	page 87
As	494.1	
Au	51.5	
B	628.6	
Ba	765.5	
Be	602.6	
Bi	274.8	
Br_{2}	101.1	
C	410.3	
Ca	723.8	
Cd	293.2	
Ce	1054.2	
Cl_{2}	124.2	
Co	308.9	
Cr	584.4	
Cs	404.5	
Cu	134	
Dy	974.9	
Er	973	
Eu	1003.9	
F_{2}	556.1	
Fe	376.8	
Ga	514.6	
Gd	969.9	
Ge	556.5	
H_{2}	236.1	
He	30.4	
Hf	1061.3	

Hg	114.8
Ho	979.3
I_{2}	175
In	437.4
Ir	256.1
K	366.5
Kr	34.4
La	994.3
Li	392.9
Lu	946.6
Mg	629.6
Mn	484.6
Mo	730.5
N_{2}	0.7
Na	336.6
Nb	900.2
Nd	969.8
Ne	27.2
Ni	232.5
O_{2}	4
Os	370.8
P	861.6
Pb	232.2
Pd	145.7
Pr	963.8
Pt	146.5
Pu	1099.7
Ra	825.8
Rb	388.8
Re	561.3
Rh	183
Ru	315.2
S	607.3
Sb	437.1

Sc	923.8
Se	346.7
Si	854.2
Sm	993.9
Sn	547.6
Sr	758.5
Ta	974.8
Tb	999
Te	326.4
Th	1214.5
Ti	904.4
Tl	193.8
Tm	952.5
U	1196.1
V	721.5
W	827.7
Xe	40.3
Y	966.3
Yb	944.9
Zn	339
Zr	1077.4

Order no	Chem symbol	Concentration in Earth's crust (kmol/kg)	Chemical formula	State	c, J	U, m, x	Standard chem exergy (kJ/mol)	Free energy of formation (kJ/mol)	State2	Standard chem exergy (kJ/mol)
1	Ag	3.70E-10	AgCl _{2} ⁻	aq	J=0.6	m=2.7u10 ^{-9}	-	-215.50	s	70.2
2	Al	3.05E-03	AlSiO _{5}	s	c=0.01	x=2.1u10 ^{-3}	15.3	-2441.00	s	795.7
3	Ar	-	Ar	g	-	p=0.906	11.69	0.00	g	11.69
4	As	2.40E-08	HasO _{4} ²⁻	aq	J=0.1	m=2.1u10 ^{-8}	-	-714.70	s	494.6
5	Au	2.00E-11	Au	s	c=0.5	x=1.4u10 ^{-9}	50.5	0.00	s	50.5
6	B	9.30E-07	B(OH) _{3}	aq	J=1.0	m=3.4u10 ^{-4}	-	-968.80	s	628.5
7	Ba	3.10E-06	BaSO _{4}	s	c=0.01	x=4.2u10 ^{-6}	30.7	-1361.90	s	775.1
8	Be	3.10E-07	Be _{2} SiO _{4}	s	c=0.01	x=2.1u10 ^{-7}	38.1	-2033.30	s	604.4
9	Bi	8.10E-10	BiO ⁺	aq	J=0.6	m=8.7u10 ^{-10}	-	-146.40	s	274.5
10	Br	3.10E-08	Br ⁻	aq	J=0.68	m=8.7u10 ^{-4}	-	-104.00	Br _{2} l	101.2
11	C	1.70E-05	CO _{2}	g	-	p=0.0335	19.87	-394.36	s,gr	410.26
12	Ca	1.03E-03	CaCO _{3} calcite	s	c=0.01	x=1.4u10 ^{-5}	16.3	-1129.00	s	729.1
13	Cd	1.80E-09	CdCl _{2}	aq	J=1.0	m=6.9u10 ^{-11}	-	-359.40	s	293.8
14	Ce	4.30E-07	CeO _{2}	s	c=0.02	x=1.2u10 ^{-6}	33.8	-1024.80	s,J	1054.6
15	Cl	3.70E-06	Cl ⁻	aq	J=0.68	m=0.5657	-	-131.26	Cl _{2} g	123.6
16	Co	3.50E-07	CoFe _{2} SiO _{4}	s	c=0.002	x=9.5u10 ^{-8}	40.1	-1032.60	s,III	312.0
17	Cr	1.50E-06	K _{2} Cr _{2} O _{7}	s	c=0.01	x=1u10 ^{-6}	34.3	-1882.30	s	584.7
18	Cs	2.20E-05	Cs ⁺	aq	J=0.6	m=2.3u10 ^{-9}	-	-282.20	s	404.4
19	Cu	8.70E-07	Cu ²⁺	aq	J=0.2	m=7.3u10 ^{-10}	-	+65.5	s	134.2
20	D	-	D _{2} O	g	-	p=3.42u10 ^{-4}	31.2	-234.55	D _{2} g	263.8
21	Dy	1.80E-08	Dy(OH) _{3}	s	c=0.02	x=4.9u10 ^{-8}	41.7	-1294.30	s,D	975.9
22	Er	1.70E-08	Er(OH) _{3}	s	c=0.02	x=4.6u10 ^{-8}	41.9	-1291.00	s	972.8
23	Eu	7.90E-09	Eu(OH) _{3}	s	c=0.02	x=2.1u10 ^{-8}	43.8	-1320.10	s	1003.8
24	F	3.30E-03	a _{3} (PO _{4}) _{2}	s	c=0.01	x=2.2u10 ^{-5}	26.6	-12985.30	F _{2} g	504.9
25	Fe	1.00E-03	Fe _{2} O _{3}	s	c=0.1	x=6.8u10 ^{-3}	12.4	-742.20	s,D	374.3
26	Ga	2.20E-07	Ga _{2} O _{3}	s	c=0.02	x=3.0u10 ^{-7}	37.2	-998.60	s	514.9
27	Gd	3.40E-08	Gd(OH) _{3}	s	c=0.02	x=9.2u10 ^{-9}	40.2	-1288.90	s,D	969.0
28	Ge	1.40E-08	GeO _{2}	s	c=0.05	x=9.5u10 ^{-8}	40.1	-521.50	s	557.6
29	H	-	H _{2} O	g	-	p=2.2	9.49	-228.59	H _{2} g	236.09
30	He	-	He	g	-	p=4.85u10 ^{-4}	30.37	0.00	g	30.37
31	Hf	1.70E-08	HfO _{2}	s	c=0.05	x=1.2u10 ^{-7}	39.5	-1027.40	s,D	1062.9
32	Hg	4.00E-10	HgCl _{4} ²⁻	aq	J=0.1	m=3.4u10 ^{-10}	-	-446.90	1	115.9
33	Ho	7.20E-09	Ho(OH) _{3}	s	c=0.02	x=1.0u10 ^{-8}	43.9	-1294.80	s,D	978.6
34	I	3.90E-09	IO _{3} ⁻	aq	J=0.6	m=5.2u10 ^{-7}	-	-128.00	I _{2} s	174.7
35	In	8.70E-10	In _{2} O _{3}	s	c=0.05	x=2.9u10 ^{-9}	48.7	-830.90	s	436.8
36	Ir	1.04E-13	IrO _{2}	s	c=0.005	x=3.6u10 ^{-12}	75.1	-185.60	s	256.7
37	K	5.40E-04	K ⁺	aq	J=0.64	m=1.04u10 ^{-2}	-	-282.44	s	366.6
38	Kr	-	Kr	g	-	p=9.7u10	34.36	0.00	g	34.36
39	La	2.20E-07	La(OH) _{3}	s	c=0.02	x=6.0u10 ^{-7}	35.5	-1319.20	s,D	994.6
40	Li	2.90E-06	Li ⁺	aq	J=0.68	m=2.5u10 ^{-5}	-	-294.00	s	393.0
41	Lu	2.90E-09	Lu(OH) _{3}	s	c=0.02	x=7.9u10 ^{-9}	46.2	-1259.60	s	945.7
42	Mg	9.60E-04	SiO _{10} (OH) _{2}	s	c=0.06	x=2.6u10 ^{-3}	14.8	-5543.00	s	626.1
43	Mn	1.70E-05	MnO _{2}	s	c=0.01	x=2.3u10 ^{-5}	26.5	-465.20	s	487.7
44	Mo	1.60E-08	MoO _{4} ²⁻	aq	J=0.1	m=1.1u10 ^{-7}	-	-836.40	s	730.3
45	N	-	N _{2}	g	-	p=75.78	0.72	0.00	N _{2} g	0.72
50	N _{1}	1.30E-06	NH _{2} ⁺	aq	J=0.2	m=1.2u10 ^{-7}	-	-45.60	s	232.7
46	Na	1.03E-03	Na ⁺	aq	J=0.68	m=0.474	-	-262.05	s	336.6
47	Nb	2.20E-07	Nb _{2} O _{3}	s	c=0.01	x=1.5u10 ^{-7}	39.0	-1766.40	s	899.7
48	Nd	1.90E-07	Nd(OH) _{3}	s	c=0.02	x=5.1u10 ^{-7}	35.9	-1294.30	s,D	970.1
49	Ne	-	Ne	g	-	p=1.77u10 ^{-3}	27.19	0.00	g	27.19
51	O _{2}	-	O _{2}	g	-	p=20.39	3.97	0.00	O _{2} g	3.97
52	Os	5.00E-13	OsO _{4}	s	c=0.005	x=3.4u10 ^{-13}	71.62	-305.10	s	368.1
53	P	3.40E-05	HPO _{4} ²⁻	aq	J=0.1	m=4.9u10 ^{-7}	-	-1089.30	s,W	861.4
54	Pb	7.70E-08	PbCl _{2}	aq	J=1.0	m=4.2u10 ^{-11}	-	-297.20	s	232.8
55	Pd	4.70E-12	PdO	s	c=0.005	x=3.2u10 ^{-12}	65.6	-82.50	s	146.1
56	Pr	5.80E-08	Pr(OH) ₃	s	c=0.02	x=1.6u10 ^{-7}	38.8	-1285.10	s,D	963.8

Source
From Szargut (2005)
Table 2.2
page 29

57	Pt	2.60E-11	PtO_{2}	s	c=0.005	x=1.8u10^{\{-11\}}	61.3	-83.70	s	141.0	
58	Pu	6.20E-20	PuO_{2}	s	c=0.01	x=8.4u10^{\{-20\}}	108.9	-995.10	s	1100.0	
59	Ra	4.40E-15	RaSO_{4}	s	c=0.05	x=3.0u10^{\{-14\}}	77.2	-1364.20	s	823.9	
60	Rb	1.05E-06	Rb^{+4+}	aq	J=0.6	m=1.4u10^{\{-6\}}	-	-282.40	s	388.6	
61	Re	5.40E-12	Re_{2}O_{7}	s	c=0.01	x=3.6u10^{\{-12\}}	65.3	-1067.60	s	559.5	
62	Rh	9.70E-12	Rh_{2}O_{3}	s	c=0.005	x=3.3u10^{\{-12\}}	65.5	-299.80	s	179.7	
63	Ru	1.00E-12	RuO_{2}	s	c=0.005	x=6.08u10^{\{-13\}}	69.5	-253.10	s	318.6	
64	S	8.10E-06	SO_{4}^{2-}	aq	J=0.11	m=1.17u10^{\{-2\}}	-	-744.60	s,rh	609.6	
65	Sb	1.60E-09	Sb_{2}O_{5}	s	c=0.001	x=1.1u10^{\{-10\}}	56.8	-829.30	s,III	438.1	
66	Sc	1.10E-07	Sc_{2}O_{3}	s	c=0.05	x=3.7u10^{\{-7\}}	36.7	-1819.70	s,D	925.2	
67	Se	6.30E-10	SeO_{4}^{2-}	aq	J=0.1	m=1.2u10^{\{-9\}}	-	-441.40	s	346.5	
68	Si	1.00E-02	SiO_{2}	d quartz	s	c=0.3	x=0.407	2.2	-856.70	s	854.9
69	Sm	4.00E-08	Sm(OH)_{3}	s	c=0.02	x=1.1u10^{\{-7\}}	39.7	-1314.00	s,D	993.6	
70	Sn	1.70E-08	SnO_{2}	s	c=0.2	x=4.6u10^{\{-7\}}	36.2	-519.60	s,w	551.9	
71	Sr	4.30E-06	SrCO_{3}II	s	c=0.05	x=2.9u10^{\{-5\}}	25.9	-1140.10	s	749.8	
72	Ta	1.10E-08	Ta_{2}O_{5}	s	c=0.01	x=7.5u10^{\{-9\}}	46.4	-1911.60	s	974.0	
73	Tb	6.30E-09	Tb(OH)_{3}	s	c=0.02	x=1.7u10^{\{-8\}}	44.9	-1314.20	s,D	998.4	
74	Te	1.40E-11	TeO_{2}	s	c=0.005	x=9.5u10^{\{-12\}}	62.9	-270.30	s	329.2	
75	Th	4.00E-08	ThO_{2}	s	c=0.05	x=2.7u10^{\{-7\}}	37.5	-1169.10	s,D	1202.6	
76	Ti	5.90E-05	TiO_{2}	s	c=0.02	x=1.6u10^{\{-4\}}	21.7	-889.50	s,II	907.2	
77	Tl	2.20E-09	Tl_{2}O_{4}	s	c=0.01	x=1.5u10^{\{-9\}}	60.4	-374.30	s,D	194.9	
78	Tm	2.80E-09	Tm(OH)_{3}	s	c=0.02	x=7.6u10^{\{-9\}}	46.3	-1265.50	s	951.7	
79	U	1.10E-08	UO_{3}H_{2}O	s	c=0.01	x=1.5u10^{\{-8\}}	44.7	-1395.90	s,III	1196.6	
80	V	2.70E-06	V_{2}O_{5}	s	c=0.02	x=3.7u10^{\{-6\}}	31.0	-1419.60	s	720.4	
81	W	8.20E-09	WO_{4}^{2-}	s	J=0.1	m=5.6u10^{\{-10\}}	-	-920.50	s	827.5	
82	Xe	-	Xe	g	-	p=8.7u10^{\{-6\}}	40.33	0.00	g	40.33	
83	Y	3.70E-07	Y(OH)_{3}	s	c=0.02	X=1.0u10^{\{-6\}}	34.2	-1291.40	s,D	965.5	
84	Yb	1.70E-08	Yb(OH)_{3}	s	c=0.02	x=4.6u10^{\{-8\}}	41.9	-1262.50	s,D	944.3	
85	Zn	1.10E-06	Zn^{2+}	aq	J=0.2	m=1.7u10^{\{-8\}}	-	-147.30	s	339.2	
86	Zr	1.80E-06	ZrSiO_{4}	s	c=0.1	x=2.4u10^{\{-5\}}	26.4	-1919.50	s,D	1083.4	

Szargut (kJ/mol)	Valero (kJ/mol)	difference	Molar mass (kg/mol)	bch(kJ/kg)
70.2	69.7	0.5	0.10787	646.15
795.7	794.3	1.4	0.02698	29440.33
494.6	494.1	0.5	0.07492	6595.03
50.5	51.5	-1	0.19697	261.46
628.5	628.6	-0.1	0.01081	58149.86
274.5	274.8	-0.3	0.20898	1314.96
293.8	293.2	0.6	0.11241	2608.31
1054.6	1054.2	0.4	0.14012	7523.55
584.7	584.4	0.3	0.051996	11239.33
134.2	134	0.2	0.06355	2108.58
975.9	974.9	1	0.1625	5999.38
972.8	973	-0.2	0.16726	5817.29
1003.8	1003.9	-0.1	0.15196	6606.34
374.3	376.8	-2.5	0.05585	6746.64
514.9	514.6	0.3	0.06972	7380.95
557.6	556.5	1.1	0.07263	7662.12
978.6	979.3	-0.7	0.16493	5937.67
436.8	437.4	-0.6	0.11482	3809.44
366.6	366.5	0.1	0.0391	9373.40
994.6	994.3	0.3	0.13891	7157.87
393.0	392.9	0.1	0.00694	56613.83
945.7	946.6	-0.9	0.17497	5410.07
626.1	629.6	-3.5	0.02431	25898.81
487.7	484.6	3.1	0.05494	8820.53
730.3	730.5	-0.2	0.09595	7613.34
899.7	900.2	-0.5	0.09291	9688.95
970.1	969.8	0.3	0.14424	6723.52
232.8	232.2	0.6	0.2072	1120.66
146.1	145.7	0.4	0.10642	1369.10
141.0	146.5	-5.5	0.19508	750.97
559.5	561.3	-1.8	0.18621	3014.34
179.7	183	-3.3	0.10291	1778.25
318.6	315.2	3.4	0.10107	3118.63
925.2	923.8	1.4	0.04496	20547.15
346.5	346.7	-0.2	0.07896	4390.83
993.6	993.9	-0.3	0.15036	6610.14
551.9	547.6	4.3	0.11871	4612.92
974.0	974.8	-0.8	0.18095	5387.12
998.4	999	-0.6	0.15893	6285.79
907.2	904.4	2.8	0.04787	18892.83
720.4	721.5	-1.1	0.05094	14163.72
827.5	827.7	-0.2	0.18384	4502.28
965.5	966.3	-0.8	0.08891	10868.29
944.3	944.9	-0.6	0.17304	5460.59
339.2	339	0.2	0.06538	5185.07

for gold a new calculation has been made and used in the tab "total exergy" since with the concentration exergy from Valero et al., a double counting happened.

1083.4	1077.4	6	0.09122	11811.01
101.2	101.1	0.1	0.159808	632.63
236.09	236.1	-0.01	0.002	1.18E+05
174.7	175	-0.3	0.127	1377.95
0.7	0.7	0	0.028	25.00
3.97	4	-0.03	0.032	125.00

Fuel	bch/HL	bch/HH	LHV (MJ/kg)	HHV(MJ/kg)	Assumptions	bch(from LHV) en MJ/kg	bch(from HHV) en MJ/kg	Source
from [9] and Ecoinvent data for coal extraction :								
Hard coal	1.09	1.03	21.60		min value : 19.2 max value : 24 [5] table 3, line 25	23.54	22.2480	From Szargut (2005)
Lignite	1.17	1.04	25.1			29.37	26.10	Table 2.4
Coke	1.06	1.04	26.00			27.56	27.04	page 37
Wood	1.15	1.05	15.40	16.20		17.71	17.01	
Liquid HC-fuels	1.07	0.99	45.3	49.1		48.47	48.61	
Natural gas (high CH4)	1.04	0.94	50	55.5		52.00	52.17	[2];[3];[5];[9]

Element	lement symbol	Substance where the element is found	substance molar mass (kg/kmol)	km [g/g]	kc [g/g]	bcl [kg/kmol]	bcl [kg/kg]	bcl [kg/mol]
Argentite								
			247.81					
Silver	Ag	Gibbsite	78.01	4.60E-01	8.15E-02	1.10E+04	44.20	10.95
Aluminum	Al	Arsenopyrite	162.46	1.00E-01	4.80E-02	4.29E+03	54.99	4.29
Arsenic	As	Gold	196.97	2.72E-07	1.50E-09	1.29E+04	65.44	18.94
Gold	Au	Boron oxide	69.62	2.00E-01	1.70E-05	2.32E+04	333.72	23.23
Boron oxide	B2O3	Barite	232.39	8.20E-01	4.14E-06	3.03E+04	120.67	30.36
Barite	BaSO4	Beryl	537.5	1.00E-02	2.10E-06	2.10E+04	39.05	20.99
Beryllium	Be	Bismuthinite	514.36	9.00E-03	1.60E-07	2.71E+04	52.71	27.11
Bismuth	Bi	Bromine	79.9	5.00E-03	5.00E-08	2.85E+04	357.18	28.54
Bromine	Br	Graphite	12.01	5.00E-01	1.99E-03	1.37E+04	1 140.64	13.70
Graphite	C	Fluorite	78.08	2.50E-01	1.32E-06	3.01E+04	385.78	30.12
Fluorite	CaF2	Gypsum	172.17	8.00E-01	1.08E-04	2.21E+04	128.29	22.09
Gypsum	CaSO4·2H2O	Cadmium	144.48	1.00E-04	9.00E-08	1.74E+04	120.32	17.38
Cadmium	Cd	Cobalt	406.95	1.08E-03	1.73E-05	1.02E+04	25.18	10.25
Cobalt	Co	Chromite	223.84	4.35E-01	9.20E-05	2.10E+04	93.70	20.97
Chromium	Cr	Cesium	133.27	4.33E-01	4.90E-06	2.67E+04	26.70	
Cesium	Cs	Chalcopyrite	183.54	1.67E-02	6.40E-05	13 792.85	75.15	13.79
Copper	Cu	Chalcocite	159.7	5.30E-01	1.10E-07	8.13E+03	50.93	8.13
Iron	Fe	Garnet	187.44	2.30E-05	1.75E-05	4.77E+02	3.61	0.68
Garnet	Fe	Germanium	104.63	5.00E-05	1.40E-06	8.86E+03	84.71	8.86
Germanium	Ge	Zinc	4.50E-01	1.45E-01		2.81E+03	2.81	
Feldspar Group of minerals containing K, Na, Ca								
Helium	He	He	4	7.00E-02	7.00E-02	0.00E+00	-	
Hafnium	Hf	Hafnium	178.49	6.00E-05	5.30E-06	6.02E+03	33.70	6.02
Mercury	Hg	Cinnabar	232.66	3.83E-03	5.00E-07	2.22E+04	95.29	22.17
Iodine	I	Iodine	126.9	1.60E-04	7.00E-08	1.92E+04	151.08	19.17
Indium	In	Potash	277.64	4.00E-04	5.60E-08	2.20E+04	79.23	22.00
Potash	K2O	K	94.2	2.50E-01	2.32E-01	1.85E+02	1.97	0.19
Lithium	Li	Spodumene	186.1	4.00E-04	2.40E-05	6.97E+03	37.47	6.97
Magnesium	Mg	Magnesite	84.32	4.50E-01	1.50E-01	2.72E+03	32.30	2.72
Manganese	Mn	Pyrolusite	86.94	3.15E-01	7.74E-04	1.49E+04	171.32	14.89
Molybdenum	Mo	Molybdenite	160.09	1.30E-04	1.10E-06	1.18E+04	73.89	11.83
Niobium	Nb	Niobium	63.84	1.20E-01	1.20E-05	1.56E+04	49.00	15.56
Nickel	Ni	Nickeliferous laterites	868.16	1.30E-02	2.40E-05	1.56E+04	180.01	15.60
Lead	Pb	Galena	239.27	2.05E-01	7.05E-05	1.98E+04	82.62	19.77
Palladium	Pd	Palladium	106.42	8.02E-07	3.95E-10	1.80E+04	177.40	18.88
Platinum	Pt	Platinum	195.08	8.02E-07	3.95E-10	1.89E+04	96.77	18.88
Rhenium	Re	Rhenium	186.21	2.23E-04	1.98E-04	2.95E+02	1.58	0.29
REE (as Ce2O3)	REE	REE	328.23	9.70E-04	6.30E-05	6.78E+03	20.65	6.78
Antimony	Sb	Stibnite	339.68	3.78E-02	4.00E-07	2.84E+04	83.60	28.40
Selenium	Se	Selenium	78.96	2.50E-02	9.00E-08	3.11E+03	393.50	31.07
Tin	Tin	Cassiterite	150.71	4.80E-03	2.10E-06	1.92E+04	127.21	19.17
Strontrium	Sr	Strontrium	87.62	3.40E-01	3.20E-04	1.73E+04	197.14	17.27
Tantalum	Ta	Tantalite	560.7	6.50E-03	9.00E-07	2.20E+04	39.28	22.02
Tellurium	Te	Tetradymite	711.23	1.00E-06	5.00E-09	1.31E+04	18.47	13.13
Thorium	Th	Thorium	232.04	3.00E-02	1.05E-05	1.97E+04	85.01	19.73
Titanium	TiO2	Ilmenite	151.71	6.90E-03	3.84E-03	1.45E+03	9.58	1.45
Vanadium	V	Vanadium	50.94	2.00E-01	9.70E-05	1.32E+04	259.44	13.21
Wolfram	W	Wolframite	183.84	7.17E-03	1.30E-06	2.04E+04	111.05	20.42
Zinc	Zn	Sphalerite	97.45	4.66E-03	6.30E-05	1.59E+04	163.97	15.68
Zircon	ZrO2	Zircon	181.33	2.69E-03	1.93E-04	6.53E+03	35.62	6.53
Phosphate rock (as fosforite)			504.3	1.10E-03	4.03E-04	2.49E+03	4.94	2.49

Source

From Valero, EXERGY EVOLUTION OF THE MINERAL CAPITAL ON EARTH

and Jose Luis et al. (2019), The energy needed to concentrate minerals from common rocks: the case of copper ore

Table A.21

page 400

Table 1

informations add from [1]

Element	"Concentration" of coal mine (kg/kg) with stripping ratio of 10:1	"Concentration" of coal mine (kg/kg) with stripping ratio of 1:1
Coal	3.94E-02	3.94E-01

Stripping ratio (m ³ overburden /tonne product)	Source
coal	1:1 à 10:1
	[6,7,8]

Weight of overburden	Source
This value is derived from an assumed weight of sedimentary rock that overlays coal seams of 158.4 lb per ft ³	[7]

Element	chem symbol	Substance	Symbol	Molar Mass (g/mol)	Source
Aluminium	Al	Gibbsite	Al(OH) ₃	78.01	
Antimony	Sb	Stibnite	Sb ₂ S ₃	339.68	
Arsenic	As	Arsenopyrite	FeAsS	162.84	
Barite	BaSO ₄	Barite	BaSO ₄	233.39	
Beryllium	Be	Beryl	Be ₃ Al ₂ Si ₆ O ₁₈	537.5	
Bismuth	Bi	Bismuthinite	Bi ₂ S ₃	514.36	
Cadmium	Cd	Greenockite	CdS	144.48	
Chromium	Cr	Chromite	FeCr ₂ O ₄	223.84	
Cobalt	Co	Linnaeite	Co ₃ S ₄	406.95	
Copper	Cu	Chalcopyrite	CuFeS ₂	183.54	
Fluorite	CaF ₂	Fluorite	CaF ₂	78.08	
Gallium	Ga	in Bauxite	Ga ₂ O ₃	187.44	
Germanium	Ge	in Zinc	GeO ₂	104.63	
Gold	Au	Gold	Au	196.97	
Graphite	C	Graphite	C	12.01	
Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	172.17	
Indium	In	in Zinc	In ₂ O ₃	277.64	
Iron ore	Fe	Hematite	Fe ₂ O ₃	159.7	
Lead	Pb	Galena	PbS	239.27	
Lime	CaO	Lime	CaO	56.08	
Lithium	Li	Spodumene	LiAl(SiO ₃) ₂	186.1	
Magnesite	MgCO ₃	Magnesite	MgCO ₃	84.32	
Manganese	Mn	Pyrolusite	MnO ₂	86.94	
Mercury	Hg	Cinnabar	HgS	232.66	
Molybdenum	Mo	Molybdenite	MoS ₂	160.09	
Nickel (laterites)	Ni	Garnierite	(Ni,Mg) ₆ (Si ₄ O ₁₀)(OH) ₈	~866.16	
Nickel (sulphides)	Ni	Pentlandite	(Fe,Ni ₉)S ₈	~1234.42	
Niobium	Nb	Ferrocolumbite	(Fe,Mn)(Nb,Ta) ₂ O ₆	~386.67	

Palladium	Pd	Palladium	Pd	106.42
Phosphate rock	PO ₄	Apatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ F	504.3
Platinum	Pt	Platinum	Pt	195.08
Potassium	K	Sylvite	KCl	74.55
REE	(Various)	Bastnaesite	(Ce,La)CO ₃ F	~297.13
Rhenium	Re	Rhenium	Re	186.21
Silver	Ag	Argentite	Ag ₂ S	247.81
Sodium	Na	Halite	NaCl	58.44
Tantalum	Ta	Tantalite	(Fe,Mn)(Ta,Nb) ₂ O ₆	~560.70
Tellurium	Te	Tetradymite	Bi ₂ Te ₂ S	711.23
Tin	Sn	Cassiterite	SnO ₂	150.71
Titanium (Ilmenite)	Ti	Ilmenite	FeTiO ₃	151.71
Titanium (Rutile)	Ti	Rutile	TiO ₂	79.87
Tungsten	W	Scheelite	CaWO ₄	287.92
Uranium	U	Uraninite	UO ₂	270.03
Vanadium	V	Vanadium	V	50.94
Yttrium	Y	Monazite	(Ce,La,Th,Nd,Y)PO ₄	~248.10
Zinc	Zn	Sphalerite	ZnS	97.45
Zirconium	Zr	Zircon	ZrSiO ₄	183.33

Minerals (chemical exergy + exergy of concentration from Dead state to mine ore grade)					
Name	Element	bch(kJ/kg)	bc(kJ/kg) xm	Total exergy (kJ/kg)	Total exergy (MJ/kg)
Silver	Ag	646.15	44.20	690.35	0.690
Aluminum	Al	29440.33	54.99	29495.32	29.495
Arsenic	As	6595.03	116.33	6711.36	6.711
Gold	Au	190.25	65.44	255.69	0.256
Bismuth	Bi	1314.96	52.71	1367.67	1.368
Cadmium	Cd	2608.31	120.32	2728.63	2.729
Chromium	Cr	11239.33	93.70	11333.03	11.333
Copper	Cu	2108.58	75.15	2183.72	2.184
Iron	Fe	6746.64	50.93	6797.58	6.798
Gallium	Ga	7380.95	3.61	7384.57	7.385
Germanium	Ge	7662.12	84.71	7746.83	7.747
Indium	In	3809.44	79.23	3888.67	3.889
Potassium	K	9373.40	1.97	9375.37	9.375
Lithium	Li	56613.83	37.47	56651.31	56.651
Magnesium	Mg	25898.81	32.30	25931.10	25.931
Manganese	Mn	8820.53	171.32	8991.85	8.992
Molybdenum	Mo	7613.34	73.89	7687.23	7.687
Niobium	Nb	9688.95	40.23	9729.18	9.729
Nickel	Ni	6723.52	18.01	6741.53	6.742
Lead	Pb	1120.66	82.62	1203.28	1.203
Palladium	Pd	1369.10	177.40	1546.50	1.547
Platinum	Pt	750.97	96.77	847.75	0.848
Rhenium	Re	3014.34	1.58	3015.92	3.016
Antimony	Sb	3118.63	83.60	3202.23	3.202
Selenium	Se	4390.83	393.50	4784.33	4.784
Tin	Sn	4612.92	127.21	4740.14	4.740
Tantalum	Ta	5387.12	39.28	5426.40	5.426
Titanium	Ti	18892.83	9.58	18902.41	18.902
Thorium	Th	6285.79	85.01	6370.79	6.371
Vanadium	V	14163.72	259.31	14423.03	14.423
Tungsten	W	4502.28	111.05	4613.33	4.613
Zinc	Zn	5185.07	162.97	5348.04	5.348

Element	Energy consumption in MJ/kg	Reference
Ag	58895	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Al	31	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
As	2.2	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Br	12.04	Caro R, Valero JL, Valero A (2021) The influence of ore grade decline on energy consumption and GHG emissions: The case of gold. <i>Environ Dev</i> 41:1–11. https://doi.org/10.1016/j.enodev.2021.100941
B	8.2	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Bi	38.3	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Cd	16	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Ce	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
Cr	5.4	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Cu	73	Rötzer N, Schmitz M (2020) Historical, current, and future energy demand from global copper production and its impact on climate change. <i>Resources</i> 9. https://doi.org/10.3390/RESOURCES0904044
Dy	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
Er	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
Eu	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
Fe	0.13	Harvey LDO (2024) A bottom-up assessment of recent (2016–20) energy use by the global iron and steel industry constrained to match a top-down (International Energy Agency) assessment. <i>Energy</i> 293:130675. https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130675
Ge	0.015022534	Nuss P, Eckelman MJ (2014) Life cycle assessment of metals: A scientific synthesis. <i>PLoS One</i> 9:1–12. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010298
Ge	0.015022534	Nuss P, Eckelman MJ (2014) Life cycle assessment of metals: A scientific synthesis. <i>PLoS One</i> 9:1–12. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010298
Ho	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
In	238	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
K	4.928	Kumar Katta, A., Datta, M., Kumar, A. Assessment of Greenhouse Gas Mitigation Options for the Iron, Gold, and Potash Mining Sectors. <i>J. Clean. Prod.</i> 2020, 245, 118718. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118718
La	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
Li	23	Kelly JC, Wang M, Diao Q, Vining D (2023) Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries. <i>Resour Conserv Recycl</i> 174:105762. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.105762
Lu	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
Mg	313	Norgate T, Jahanshahi S (2010) Low grade ores - Smelt, leach or concentrate? <i>Miner Eng</i> 23:65–73. https://doi.org/10.1016/j.mineeng.2009.10.002
Mn	1	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Mo	193	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Nb	37.5	Giacci L, Harper EM, Nasser NT, et al (2016) Metal Disruption and Inefficient Recycling Intensify Climate Forcing. <i>Environ Sci Technol</i> 50:1394–1402. https://doi.org/10.1021/es5020714
Nd	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
Pb	6	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Pt	13.1400	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Pt	175000	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Re	7350	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Rh	17500	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Ru	175000	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Sc	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
Se	9.6	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Sm	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
Sn	13.14	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Ta	2305	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Tb	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
Ti	381	Norgate T, Jahanshahi S (2010) Low grade ores - Smelt, leach or concentrate? <i>Miner Eng</i> 23:65–73. https://doi.org/10.1016/j.mineeng.2009.10.002
V	135.284	Zhang, G., Wang, Y., Meng, X., Zhang, D., Ding, N., Ren, Z., Gao, W., Sun, Z. Life Cycle Assessment on the Vanadium Production Process: A Multi-Objective Assessment under Environmental and Economic Perspectives. <i>Resour. Conserv. Recycl.</i> 2023, 192 (February), 106926. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106926
W	40	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745
Y	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
Yb	13.14	Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P. Life Cycle Assessment Studies of Rare Earths Production - Findings from a Systematic Review. <i>Sci. Total Environ.</i> 2021, 791. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257
Zn	50	Magdaleno R, Valero A, Palacio JL, Valero A (2021) Mineral energy consumption as a function of ore grade decline: The case of lead and zinc. <i>J Sustain Min</i> 20:109–121. https://doi.org/10.4687/2300-3960.1060
Zr	6.8	Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023) Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060. <i>Glob Environ Chang</i> 83:102745. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102745

Name	Element	Minerals (chemical energy + exergy of concentration from Dead state to mine ore grade)		Energy extraction from mine to pure state	Ratio
		Total exergy (MJ/kg)	energy mining (MJ/kg)		
Silver	Ag	6.90E-01	5.89E+04		85 311.60
Aluminum	Al	2.95E+01	3.10E+01		1.05
Arsenic	As	6.71E+00	2.20E+00		0.33
Gold	Au	2.56E-01	1.25E+05		490 796.57
Bismuth	Bi	1.37E+00	3.83E+01		28.00
Cadmium	Cd	2.73E+00	1.60E+01		5.86
Chromium	Cr	1.13E+01	5.40E+00		0.48
Copper	Cu	2.18E+00	7.30E+01		33.43
Iron	Fe	6.80E+00	1.30E-01		0.02
Gallium	Ga	7.38E+00	1.50E-02		0.00
Germanium	Ge	7.75E+00	1.50E-02		0.00
Indium	In	3.89E+00	2.38E+02		61.20
Potassium	K	9.38E+00	4.93E+00		0.53
Lithium	Li	5.67E+01	2.30E+01		0.41
Magnesium	Mg	2.59E+01	3.13E+02		12.07
Manganese	Mn	8.99E+00	1.00E+00		0.11
Molybdenum	Mo	7.69E+00	1.93E+02		25.11
Niobium	Nb	9.73E+00	3.75E+01		3.85
Nickel	Ni	6.74E+00	1.31E+01		1.95
Lead	Pb	1.20E+00	6.00E+00		4.99
Palladium	Pd	1.55E+00	1.75E+05		113 158.68
Platinum	Pt	8.48E-01	1.75E+05		206 429.33
Rhenium	Re	3.02E+00	7.35E+03		2 437.07
Antimony	Sb	3.20E+00	1.75E+05		54 649.36
Selenium	Se	4.78E+00	9.60E+00		2.01
Tin	Sn	4.74E+00	9.60E+01		20.25
Titanium	Ti	1.89E+01	3.81E+02		20.16
Tantalum	Ta	5.43E+00	1.31E+03		241.04
Thorium	Th	5.43E+00	1.31E+01		2.42
Vanadium	V	1.44E+01	1.35E+02		9.38
Tungsten	W	4.61E+00	4.00E+01		8.67
Zinc	Zn	5.35E+00	5.00E+01		9.35

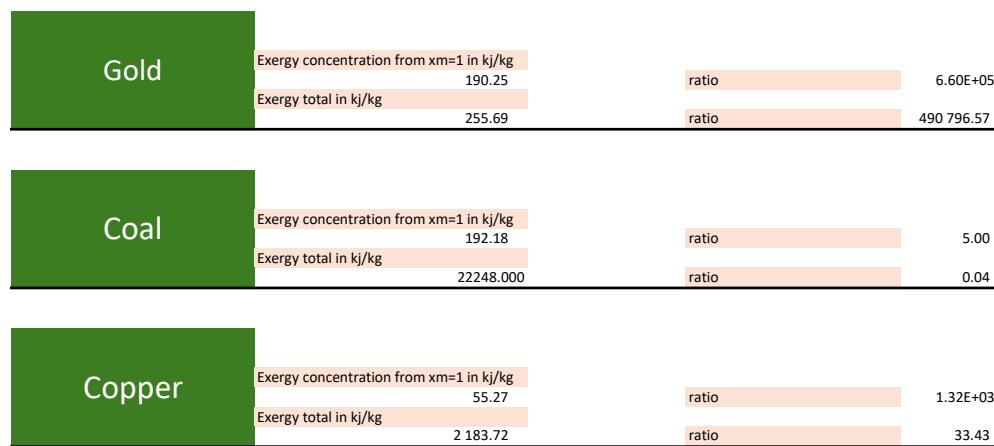
Minerals (chemical exergy + exergy of concentration from Dead state to mine ore grade)			
Name	Element	Exergy content (MJ/kg)	Ratio
Aluminum	Al	2.95E+01	3.10E+01
Gold	Au	2.56E-01	1.25E+05
Copper	Cu	2.18E+00	7.98E+01
Iron	Fe	1.81E+00	1.30E-01
Nickel	Ni	6.74E+00	1.31E+01
Lead	Pb	1.20E+00	6.00E+00
Palladium	Pd	1.05E+00	1.35E+00
Platinum	Pt	8.48E-01	1.75E+05
Tin	Sn	4.74E+00	9.40E+01
Titanium	Ti	1.01E+01	3.11E+02
Zinc	Zn	5.35E+00	5.00E+01
Fossil resources			
Energy extraction from mine to pure state			
Type	Exergy content (MJ/tWt)	Exergy extraction (MJ/tWt)	Ratio
Hard coal	3.20E+01	0.962	33.00
Natural gas (high CH4)	5.20E+01	2.60	20.30

The wheel of metal companionality [4]



Element	element symbol	substance where the element is found	substance molar mass [kg/kmol]	xm [g/g]	xc [g/g]	bc1 [kJ/kmol]	bc2 [kJ/kg]	bc3 [kJ/mol]	x_lower1 [g/g]	xc [g/g]2	bc4 [kJ/kmol]4	bc5 [kJ/kg]5	bc6 [kJ/mol]6	x_lower2 [g/g]	xc [g/g]4	bc7 [kJ/kmol]7	bc8 [kJ/kg]8	
Gold	Au	Gold	196.97	2.72E-07	1.50E-09	1.29E+04	65.44	12.89	7.51E-08	1.50E-09	9.70E+03	49.25	9.70	5.76E-09	1.50E-09	3.34E+03	16.93	3.34
Graphite	C	Graphite	12.01	3.94E-01	6.07E-03	1.03E+04	861.35	10.34	3.00E-02	6.07E-03	3.95E+03	329.79	3.96	8.00E-03	6.07E-03	6.84E+02	56.98	0.68
Copper	Cu	Chalcopyrite	183.54	1.67E-02	6.40E-05	1.38E+04	75.15	13.79	6.20E-04	6.40E-05	5.63E+03	30.67	5.63	2.60E-04	6.40E-05	3.47E+03	18.93	3.47

Element	element symbol	Substance where the element is found	substance molar mass (kg/kmol)	xm [g/g]	xc [g/g]	bci [kj/kmol]	bci [kj/kg]	bci [kj/mol]
Gold	Au	Gold	196.97	1.00E+00	2.72E-07	37 473.46	190.25	37.47
Graphite	C	Graphite	12.01	1.00E+00	3.94E-01	2.31E+03	192.18	2.31
Copper	Cu	Chalcopyrite	183.54	1.00E+00	1.67E-02	1.01E+04	55.27	10.14



Reference	Number
Calvo et al, Thermodynamic Approach to Evaluate the Criticality of Raw Materials and Its Application through a Material Flow Analysis in Europe, https://doi.org/10.1111/jiec.12624	[1]
Heat of combustion CRC Handbook of chemistry and physics https://hbcp.chemnetbase.com/documents/05_05/05_05_0001.xhtml?dswid=8056	[2]
https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html	[3]
N. T. Nassar et al., By-product metals are technologically essential but have problematic supply. <i>Sci. Adv.</i> 1, e1400180 (2015). DOI:10.1126/sciadv.1400180	[4]
S.A. Channiwala et al., A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. 2002 https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4	[5]
https://www.weare121.com/121mininginvestment-london/wp-content/uploads/sites/6/2020/05/Colonial-Corporate-Presentation-2020-04-14.pdf	[6]
Schissler, A. P. (2004). Coal mining, design and methods of. Elsevier. https://doi.org/10.1016/b0-12-664176480-x/00284-9	[7]
Scott, D., Haacke, J., Osmonson, L., Luppens, J., Pierce, P., & Rohrbacher, T. (2011). Assessment 674 of coal geology, resources, and reserves in the northern wyoming powder river basin. https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/sec12_6.pdf	[8]
	[9]

abreviation	signification	value
bch	chemical exergy	
HL	lower heating value (J/kg)	
HH	higher heating value (J/kg)	
R	universal gas constant	8.314 J/mol.K
To	standard ambient temperature	298.15 K
bci	concentration exergy of i	