

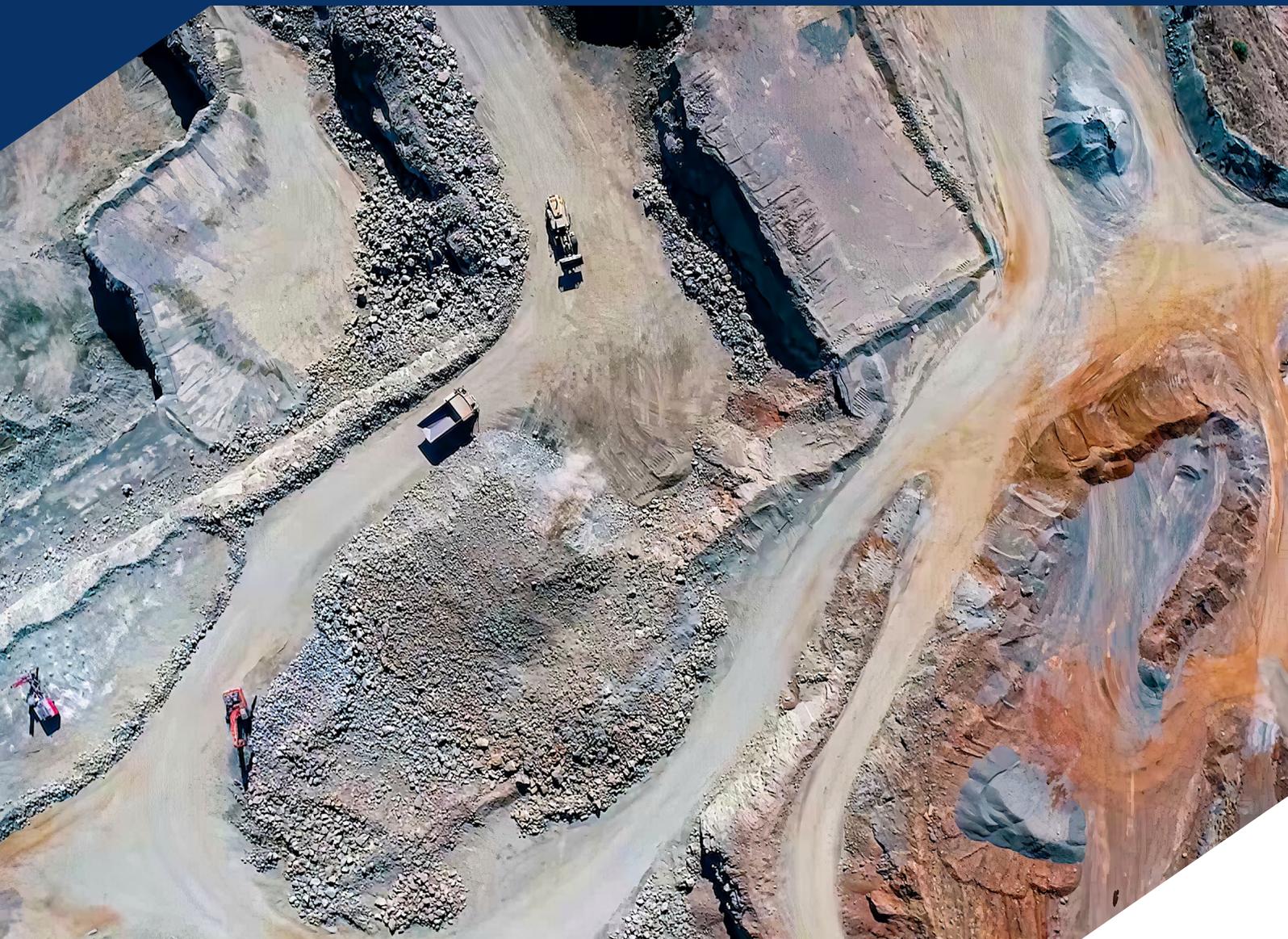


IGF

INTERGOVERNMENTAL FORUM
on Mining, Minerals, Metals and
Sustainable Development

À la recherche de minéraux critiques ?

Comment les métaux sont produits
et naturellement associés



Secrétariat hébergé par



Secrétariat financé par



Kingdom of the Netherlands

© 2023 International Institute for Sustainable Development
Publié par l'Institut international du développement durable

Cette publication est sous licence [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

L'Institut international du développement durable (IISD) est un laboratoire d'idées indépendant et primé qui vise à accélérer le développement de solutions pour parvenir à un climat stable, à la gestion durable des ressources et à des économies équitables. Nos travaux inspirent de meilleures décisions et suscitent la prise de mesures concrètes pour aider les gens et la planète à prospérer. Nous mettons en lumière ce qui peut être réalisé grâce à la collaboration entre les gouvernements, les entreprises, les organismes sans but lucratif et les communautés. Le personnel de l'IISD fort de plus de 200 membres, et ses quelque 150 associé(e)s et consultant(e)s viennent du monde entier et leur formation couvre maintes disciplines. Avec des bureaux à Winnipeg, Genève, Ottawa et Toronto, notre travail touche des vies dans près de 100 pays.

L'IISD est un organisme de bienfaisance enregistré au Canada, et visé par l'alinéa 501(c)(3) de l'Internal Revenue Code des États-Unis. Il bénéficie de subventions de fonctionnement de base de la province du Manitoba. En outre, des fonds de projets lui sont accordés par divers gouvernements, tant au Canada qu'à l'étranger, des organismes des Nations Unies, des fondations, le secteur privé et des particuliers.

Le Forum intergouvernemental sur l'exploitation minière, les minéraux, les métaux et le développement durable (IGF) soutient ses 80 pays membres dans la réalisation de leurs objectifs de développement durable au moyen de lois, de politiques et de réglementations efficaces relatives au secteur minier. Nous aidons les gouvernements à adopter des mesures pour le développement de pratiques inclusives et soucieuses de l'égalité des sexes, l'optimisation des avantages financiers, le soutien des moyens de subsistance et la préservation de l'environnement. Notre travail porte sur l'ensemble du cycle de vie d'une mine, depuis l'exploration jusqu'à la fermeture de la mine, et sur des projets de toute taille, de l'exploitation artisanale aux opérations à grande échelle. Guidés par les besoins de nos membres, nous réalisons des évaluations au plan national, des activités de renforcement des capacités et de formation technique, et organisons des publications et des événements dans le but de promouvoir les pratiques optimales, l'apprentissage entre pairs, et d'impliquer l'industrie et la société civile.

L'Institut international du développement durable assure le secrétariat de l'IGF depuis octobre 2015. L'IGF est principalement financé par les gouvernements du Canada et des Pays-Bas.

À la recherche de minéraux critiques ? Comment les métaux sont produits et naturellement associés

Avril 2023

Document préparé par Grégoire Bellois et Isabelle Ramdoo

SIÈGE DE L'IISD

111 Lombard Avenue
Suite 325
Winnipeg, Manitoba
Canada R3B 0T4

[IISD.org](https://www.iisd.org)

 [@IISD_news](https://twitter.com/IISD_news)

[IGFMining.org](https://www.igfmining.org)

   [@IGFMining](https://www.facebook.com/IGFMining)



TABLE DES MATIÈRES

1.0 Utilisation des métaux et développement des sociétés humaines	1
2.0 Comment les métaux sont-ils extraits?	3
3.0 Comprendre la notion de « compagnonnage » des métaux : la roue des métaux	7
4.0 Risques et difficultés liés au compagnonnage des métaux.....	10
4.1 Considérations économiques.....	10
4.2 Risques environnementaux.....	15
4.3 Défis liés au recyclage.....	16
5.0 Comment la compréhension du compagnonnage peut aider à identifier de nouvelles sources de métaux.....	17
5.1 Opportunités de valorisation supplémentaire de la production métallique.....	17
5.2 Haldes à stériles et parcs à résidus miniers, sources potentielles de minéraux critiques.....	18
5.3 Possibilité d'inscrire la production minière dans la stratégie nationale de développement.....	20
6.0 Conclusion	21
Références	23



Avant-propos

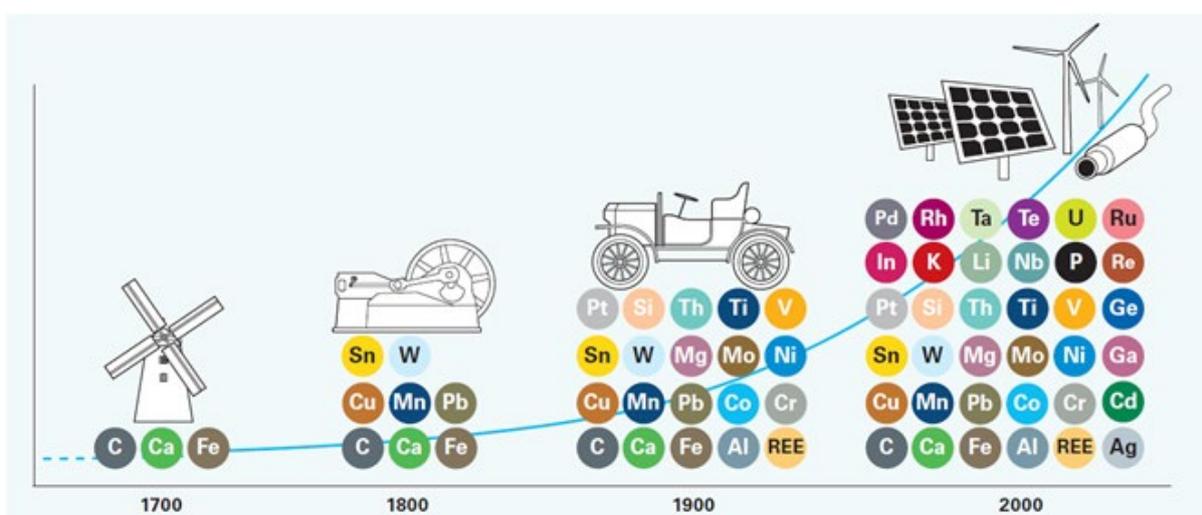
Ce document de travail de l'IGF est une brève étude technique qui vise à expliquer de quelle manière les métaux sont produits et associés dans les gisements minéraux et les sites miniers. Le but est de mettre en lumière les difficultés qui peuvent exister dans la recherche de minéraux et métaux qui sont essentiels pour la transition énergétique. Cette étude s'insère dans une série plus large de produits de connaissance cherchant à mieux faire comprendre les défis et les opportunités associés à la demande croissante de minéraux et de métaux et, de ce fait, n'offre pas de recommandations particulières en termes de politiques. Celles-ci seront élaborées une fois publiée la série complète de documents de travail.



1.0 Utilisation des métaux et développement des sociétés humaines

Depuis l'émergence des sociétés organisées, les humains font usage des métaux et ont peu à peu développé les activités minières. Les civilisations ont toujours été fortement tributaires des métaux et des alliages, depuis l'utilisation du cuivre dans l'Antiquité, puis l'étain (à l'âge du bronze), le fer et le plomb (à l'âge du fer) – sans même mentionner les métaux précieux tels que l'or et l'argent – jusqu'à la vaste gamme de métaux requis par notre monde moderne. Comme cela est illustré dans la Figure 1, l'utilisation des métaux dans la production industrielle s'est intensifiée de façon exponentielle au fil du temps. Même si nos sociétés sont déjà relativement sophistiquées et complexes, il faut s'attendre à ce que l'avenir soit encore plus gourmand en minéraux, ce qui entraînera une énorme croissance de la demande en métaux et l'utilisation de nouveaux métaux.

FIGURE 1. Principaux éléments nécessaires à la production d'énergie au fil du temps



Source : Zepf et al., 2014.

Remarque : La position sur l'axe du temps n'est qu'indicative.



Historiquement parlant, les six métaux mentionnés précédemment (cuivre, étain, fer, plomb, or, et argent) étaient essentiellement les seuls utilisés jusqu'aux percées technologiques majeures de l'ère métallurgique au XIXe siècle (ASM International, 2011). Les innovations de la Révolution industrielle ont permis de découvrir et d'identifier un nouvel ensemble de métaux qui depuis sont devenus essentiels à la production de machines et de biens de consommation.

ENCADRÉ 1. SAVEZ-VOUS QUAND A ÉTÉ DÉCOUVERT L'ALUMINIUM ?

La croûte terrestre est composée de silicium (28 %) et d'aluminium (8 %), ce dernier y étant pourtant le métal le plus abondant, par exemple 1 200 fois plus que le cuivre¹ (Desjardins, 2014). Mais ce n'est qu'au XIXe siècle que le silicium et l'aluminium ont été découverts.

Cette découverte, relativement récente, montre que l'identification des éléments ne dépend pas seulement de leur rareté dans la croûte terrestre, mais aussi de leurs propriétés métallurgiques, et notamment les relations entre les différents éléments naturellement présents dans la croûte terrestre.

Aujourd'hui, alors que le monde est confronté au dilemme de soutenir le progrès tout en encourageant un changement dans nos modes de consommation afin de réduire et d'atténuer les impacts sur la planète, le rôle des minéraux et des métaux n'en revêt que plus d'importance. Deux tendances prépondérantes – la transformation numérique et la transition énergétique – appellent à la consommation de plus de métaux que jamais, tant en quantités qu'en variétés (Agence internationale de l'énergie [AIE], 2021). Il faudra du temps pour que l'offre s'adapte à la montée en flèche de la demande. Certains minéraux et métaux sont particulièrement en proie aux pénuries d'approvisionnement et ont ainsi été identifiés comme « critiques » en raison des risques liés à leur disponibilité et à leur accessibilité.

¹ La concentration moyenne de l'aluminium dans la croûte terrestre est de 8,2 %, tandis que la concentration moyenne du cuivre est de 0,006 %.



2.0 Comment les métaux sont-ils extraits ?

Les métaux sont très rarement trouvés à l'état pur dans le sol ou le sous-sol. Ils sont en général mélangés à d'autres éléments, comme l'oxygène, le soufre ou le carbone, pour former divers minéraux.

ENCADRÉ 2. QUELQUES DÉFINITIONS IMPORTANTES : QUE SONT LES ÉLÉMENTS, LES MÉTAUX ET LES MINÉRAUX ? ET COMMENT LES GISEMENTS DE MINÉRAI SONT-ILS DÉCOUVERTS ?

Éléments

Les éléments sont des atomes, qui sont les particules essentielles constitutives de l'univers. Ils sont caractérisés par un nombre spécifique de protons et de neutrons dans leur noyau et possèdent chacun leurs propres propriétés physiques et chimiques. Le nombre de protons (également appelé **numéro atomique**, généralement représenté par la lettre «Z») définit leur position dans le tableau périodique reproduit à la Figure 2. L'hydrogène ($Z = 1$), le carbone ($Z = 6$), l'oxygène ($Z = 8$), le fer ($Z = 26$), le cuivre ($Z = 29$) et l'or ($Z = 79$) sont des éléments.

Minéraux

Un minéral est un solide inorganique naturel composé d'un ou de plusieurs **éléments** chimiques qui ont une structure cristalline interne ordonnée de manière spécifique. Les minéraux sont classés selon leur forme, leur structure cristalline et leur composition chimique. Ce sont les éléments constitutifs des roches, dont les plus communs sont le quartz, le feldspath, le mica, l'amphibole, l'olivine, et la calcite.

Roches

Une roche est un agrégat d'un ou plusieurs **minéraux**, qui peut être homogène ou non. Les types de roches sont classés selon leur mode de formation (sédimentaire, volcanique ou métamorphique), leur composition chimique ou minéralogique, ou leurs propriétés mécaniques. Les roches les plus communes sont le granite, le basalte, le calcaire et le grès.



Métaux

Les métaux sont un ensemble spécifique d'**éléments** (c.-à-d. des atomes) qui ont des caractéristiques connues et spécifiques qui les différencient des éléments non métalliques. Ces éléments sont cristallins lorsqu'ils sont à l'état solide et sont naturellement présents dans **les minéraux**. Ils sont souvent de bons conducteurs de l'électricité et de la chaleur. Ils sont brillants et malléables. Et même s'ils ne sont pas les plus abondants dans la croûte terrestre, les métaux sont les **éléments les plus représentés** dans le tableau périodique, puisque sur les 110 éléments dont les propriétés ont été étudiées, 86 sont rangés dans la catégorie des métaux et 7 des métalloïdes (cf. Figure 2). Les métalloïdes, ou semi-métalliques, représentés en vert, possèdent des propriétés intermédiaires entre les métaux et les non-métaux. Le fer, l'or, l'argent, l'aluminium et le cuivre sont des métaux.

Gîtes, gisements et minerais

Un gîte minéral est une accumulation de **minéraux** à un niveau de concentration exceptionnellement élevé. Pour chaque gîte, un ensemble de conditions, par exemple quant à son niveau de concentration et sa taille, doivent être réunies pour qu'il puisse être exploité de manière rentable. Un gîte minéral qui est suffisamment riche pour être exploité en en retirant un profit est appelé gisement de minerai, et dans un tel gisement, l'ensemble composé des éléments minéraux et de la gangue² est appelé le minerai. L'expression **gisement de minerai** est un terme économique, tandis que l'expression **gîte ou gîte minéral est un terme géologique** (Skinner, 2022).

FIGURE 2. Tableau périodique des éléments

1 H																	2 He																														
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																														
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																														
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																														
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																														
55 Cs	56 Ba	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																														
87 Fr	88 Ra	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og																														
<table border="1"> <tr> <td>57 La</td> <td>58 Ce</td> <td>59 Pr</td> <td>60 Nd</td> <td>61 Pm</td> <td>62 Sm</td> <td>63 Eu</td> <td>64 Gd</td> <td>65 Tb</td> <td>66 Dy</td> <td>67 Ho</td> <td>68 Er</td> <td>69 Tm</td> <td>70 Yb</td> <td>71 Lu</td> </tr> <tr> <td>89 Ac</td> <td>90 Th</td> <td>91 Pa</td> <td>92 U</td> <td>93 Np</td> <td>94 Pu</td> <td>95 Am</td> <td>96 Cm</td> <td>97 Bk</td> <td>98 Cf</td> <td>99 Es</td> <td>100 Fm</td> <td>101 Md</td> <td>102 No</td> <td>103 Lr</td> </tr> </table>																		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																																	
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																																	

Remarque : Le tableau périodique indique le numéro atomique de chaque élément. Les éléments sur fond bleu sont des métaux.

Source : Clemson University, Département de la science et de l'ingénierie des matériaux.

2 Il s'agit des éléments minéraux sans valeur commerciale, étroitement mélangés aux minéraux "recherchés" dans un gisement de minerai ou les entourant.



Les quatre principaux métaux extraits depuis l'Antiquité – c'est-à-dire le fer, le cuivre, l'étain et le plomb – sont produits en quantités relativement importantes. Avec les métaux précieux (l'or et l'argent), ils constituent encore aujourd'hui le gros de la demande industrielle.

Avec le temps, l'utilisation croissante des techniques de production modernes et l'application généralisée des technologies de pointe ont accru la consommation d'autres métaux « mineurs » et de métalloïdes (et la dépendance à ceux-ci). La demande de ces métaux mineurs et métalloïdes devrait augmenter de façon exponentielle, car ils possèdent des propriétés spécifiques qui les rendent indispensables au fonctionnement des technologies numériques et au développement des énergies renouvelables.

En général, les entreprises minières ont tendance à privilégier la production des matières premières les plus rentables, laissant derrière celles qui occupent une part de marché moindre, ont moins de valeur, sont plus difficiles à extraire ou à traiter (Mudd *et al.*, 2016), ou requièrent des investissements supplémentaires en raison de contraintes environnementales.

Les métaux dits « mineurs » sont habituellement présents à de faibles niveaux de concentration (moins de 0,1 %) (Zepf *et al.*, 2014). En ce sens, ces métaux forment rarement eux-mêmes des gisements économiquement viables. Ils sont plutôt présents dans les interstices des minerais métalliques « majeurs » avec lesquels ils partagent des propriétés physiques et chimiques similaires (Nassar *et al.*, 2015). Ces métaux mineurs (également appelés « métaux compagnons ») sont donc principalement extraits en tant **que co-produits** ou **sous-produits** durant les opérations minières destinées à l'extraction des métaux majeurs (également appelés « métaux hôtes »).

ENCADRÉ 3. COMPRENDRE LA DIFFÉRENCE ENTRE LES CO-PRODUITS ET LES SOUS-PRODUITS

La production de co-produits et de sous-produits peut contribuer à la rentabilité d'une exploitation minière. La décision de produire un métal compagnon en tant que co-produit ou sous-produit dépendra de sa concentration dans le minerai (sa teneur), de sa valeur et de la facilité à mettre en œuvre une ligne de transformation adéquate.

Il est toutefois important de comprendre la différence qui existe entre co-produits et sous-produits :

Le terme **co-produits** fait référence à au moins deux métaux produits conjointement et dont la valeur économique minière est du même ordre de grandeur, en considérant leur teneur et leur prix. Chaque co-produit a une influence sur les décisions minières au niveau du site minier et peut motiver une décision d'investissement spécifique.

Pour leur part, **les sous-produits** ont d'ordinaire une valeur trop faible pour avoir un impact sur les décisions minières (par exemple l'extension de la durée de vie de la mine, la construction d'infrastructures spécifiques ou la redéfinition du gisement en lui-même).



En conséquence, les notions de co-production et de sous-production présentent chacune leurs propres **caractéristiques d'ordre technique** et **économique**, qui sont synthétisées ci-dessous.

<p>Il y aura co-production lorsqu'un investissement supplémentaire important est nécessaire pour extraire et traiter un métal compagnon (Nieto & Zhang, 2013).</p>	<p>Il y aura sous-production lorsqu'aucun investissement supplémentaire n'est nécessaire (ou très limité) pour extraire et traiter le métal compagnon (Nieto & Zhang, 2013).</p>
<p>Relation bidirectionnelle entre les co-produits : les fluctuations de prix et/ou dans la demande d'un métal peuvent avoir des effets importants sur l'autre co-produit et vice versa.</p>	<p>Relation unidirectionnelle entre le métal majeur et le sous-produit : les fluctuations de prix et/ou dans la demande pour le métal majeur peuvent avoir un impact significatif sur le sous-produit, alors qu'une quelconque évolution du marché du sous-produit n'affectera pas le métal majeur.</p>
<p>Voici un exemple de relation de co-production : le plomb et le zinc (Pb-Zn). Le plomb et le zinc sont souvent produits en tant que co-produits, ce qui fait que la plupart des mines de plomb sont également des mines de zinc et vice versa. Si le marché de l'un de ces co-produits est fortement affecté, par exemple en cas d'interdiction du plomb en raison des risques liés à ses caractéristiques neurotoxiques, les mines de plomb-zinc ne pourraient pas continuer à opérer de manière rentable. Cela entraînerait une chute massive de la production de zinc et une hausse des prix, puisque la demande de zinc resterait constante et que l'offre serait limitée (Frenzel <i>et al.</i>, 2017).</p>	<p>Voici un exemple de sous-production : le tellure (Te), qui est essentiel pour la production de cellules photovoltaïques et de dispositifs thermoélectriques; c'est un sous-produit de l'extraction et du raffinage du cuivre. Plus précisément, plus de 90 % de la production de tellure provient des boues d'anode résultant du raffinage du cuivre, après concentration initiale et extraction du minerai de cuivre (Rietveld <i>et al.</i>, 2019). Dans une telle situation, la demande du marché pour le tellure n'affecte pas les capacités de production et de transformation du cuivre, tandis que le marché du cuivre a une incidence directe sur la quantité de tellure disponible.</p>

En outre, la distinction des concepts de co-production et de sous-production est importante d'un point de vue **comptable et de reporting**. Dans le cas de l'or, en 2018, le Conseil mondial de l'or a recommandé ce qui suit (World Gold Council, 2018) :

<p>Les co-produits doivent être déclarés dans les ventes, car ils permettent d'améliorer le chiffre d'affaires global de l'opération minière. Les coûts sont imputés à la production de chaque métal au prorata de sa contribution aux revenus.</p>	<p>Les sous-produits doivent être considérés comme venant en déduction du coût des ventes. Cela implique que les revenus tirés de leurs ventes sont déduits des coûts d'exploitation avant le calcul du coût de revient du métal primaire.</p>
<p>Dans le cas des mines d'or, si la production secondaire représente plus de 20 % de la valeur globale de la production, elle peut être considérée comme une co-production (Fulp, 2015).</p>	<p>Si la valeur de la production secondaire est inférieure à 20 %, il s'agit donc d'une sous-production (Fulp, 2015).</p>



3.0 Comprendre la notion de « compagnonnage » des métaux : la roue des métaux

La notion de « compagnonnage » est le degré auquel un métal est obtenu – parfois entièrement – en tant que co-produit ou sous-produit d'un métal hôte pendant l'exploitation minière (Nassar *et al.*, 2015). Les métaux compagnons sont généralement associés à des éléments hôtes avec lesquels ils partagent des propriétés physiques et chimiques similaires.

De nombreux éléments mineurs sont produits **uniquement** en tant que co-produits ou sous-produits de l'exploitation minière à partir d'un ou deux métaux hôtes spécifiques. Par exemple, 98 % de la production actuelle de cobalt provient des mines de cuivre (60 %) et de nickel (38 %) (Cobalt Institute, 2022). Le gallium provient exclusivement de l'exploitation minière de l'aluminium (95 %) et du zinc (5 %) (Bureau de recherches géologiques et minières, 2016).

ENCADRÉ 4. COMMENT LIRE LA ROUE DES MÉTAUX ?

La roue des métaux a été créée par Nassar *et al.* en 2015. Elle est une représentation visuelle simplifiée de la production de métaux, le but étant d'illustrer les relations entre les éléments ayant des propriétés similaires. Il est évidemment entendu que les gisements de minéraux de par le monde présentent de grandes variations minéralogiques en fonction de leur type et de leur origine.

Les principaux éléments hôtes figurent dans le **cercle du milieu**. Il s'agit des métaux principalement extraits et produits pour leur valeur intrinsèque, qui sont au nombre de dix : aluminium, titane, fer, nickel, cuivre, zinc, plomb, étain, platine et or.

Chaque **secteur de cercle** montre les éléments compagnons statistiquement associés à l'élément hôte dans les mines.

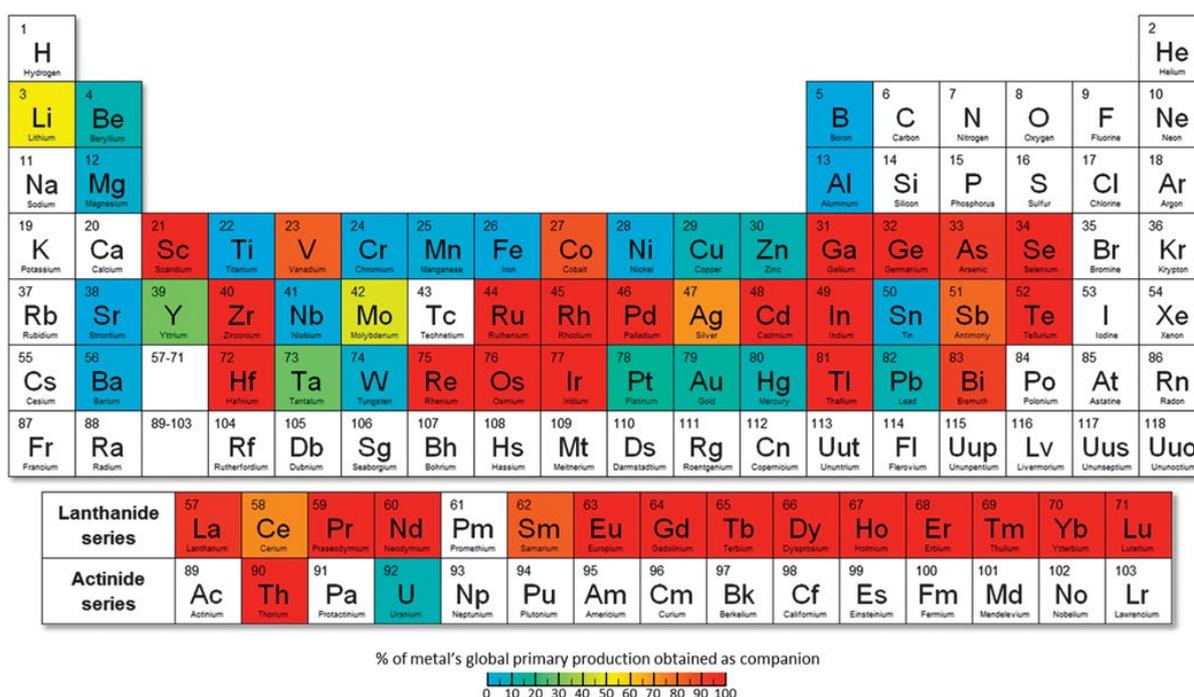
Le **pourcentage** sur les axes représentent la proportion moyenne de l'élément compagnon produit en tant que sous-produit de l'élément hôte auquel il est lié. Plus le bleu est foncé, et plus est élevée la proportion de la production mondiale du compagnon provenant des mines de l'élément hôte.



demande risque de se traduire par une réponse problématique du côté de l'offre, car ce ne sont pas nécessairement des métaux extraits pour eux-mêmes.

Comme le montre la Figure 4, les problèmes d'approvisionnements en co-produits et sous-produits peuvent affecter un nombre important de métaux à divers degrés. Plus les éléments sont colorés en bleu, plus ils sont extraits pour eux-mêmes (s'agissant de métaux hôtes ou majeurs). Le fer, par exemple, est un métal majeur dans le monde entier. Cependant, lorsque l'on se déplace vers la couleur rouge, les métaux sont de plus en plus extraits en tant que co-produits ou sous-produits de l'exploitation d'un autre métal majeur. C'est le cas du cobalt, par exemple, qui est en grande partie un co-produit ou un sous-produit des mines de nickel et de cuivre. Les éléments en blanc sont ceux pour lesquels aucun degré de compagnonnage n'a encore été déterminé.

FIGURE 4. Le tableau périodique du compagnonnage des métaux au niveau mondial pour l'année 2008.



Source : Nassar et al., 2015.

Les métaux compagnons ne pouvant être extraits qu'en même temps que les métaux hôtes, des questions se posent au regard de leur disponibilité, leur accessibilité, le flux de matériaux (c.-à-d., les chaînes logistiques depuis la production brute jusqu'à l'utilisateur final) et leur utilisation ensuite par les industries.



4.0 Risques et difficultés liés au compagnonnage des métaux

4.1 Considérations économiques

4.1.1 Risques concernant l'approvisionnement

Il peut y avoir une corrélation dans les tendances du marché concernant la demande de métaux produits ensemble, comme c'est le cas actuellement pour le cobalt, un co-produit du nickel et du cuivre. Dans de telles circonstances, un accroissement de la production des métaux hôtes entraînera également une hausse de l'offre de métaux co-produits.

Toutefois, cela n'est pas toujours le cas. Il peut parfois y avoir une baisse de la demande du métal primaire, et en même temps une hausse de la demande du co-produit ou sous-produit. Ce peut être le cas pour le plomb et le bismuth, un métal utilisé entre autres dans l'industrie pharmaceutique et comme substitut au plomb, car plus sûr pour l'environnement, dans les alliages utilisés dans les pales de turbine et les écrans de télévision (Deady *et al.*, 2022) et considéré comme critique par l'UE, les États-Unis et le Royaume-Uni, par exemple.

En tout état de cause, les besoins futurs, entraînés par le développement des infrastructures pour les énergies renouvelables et les technologies numériques, auront une incidence sur la demande de métaux spécifiques, comme l'AIE le laisse entendre dans ses prévisions. Cependant, les marchés, stimulés par l'évolution rapide des technologies, sont souvent dynamiques et volatils, ce qui veut dire qu'il n'est pas certain que la demande pour certains métaux spécifiques continuera à croître au même rythme à l'avenir.

L'offre de métaux ne doit pas être considérée isolément. Comme cela a été mentionné, la viabilité économique des opérations minières dépend souvent de la rentabilité économique de l'extraction minière des matériaux « hôtes ». Les métaux compagnons ne sont pas extraits pour eux-mêmes, mais plutôt de manière accessoire comme co-produits ou sous-produits des métaux hôtes, et leur valorisation ou non est souvent basée sur des décisions dictées par des facteurs tels que :

1. L'intérêt des sociétés minières à ne produire que les métaux principaux (ou non).



2. La concentration des métaux mineurs : si elle est jugée trop faible pour un retour sur investissement, ils ne seront pas transformés.
3. Le procédé métallurgique, ou la technologie permettant de séparer ces éléments, n'est pas suffisamment développée pour un type particulier de minerai.
4. Les entraves à la production liées aux exigences en matière de licences et de permis : il est possible par exemple que (i) le permis d'exploitation minière ne permette que la production du métal majeur à l'exclusion de tout autre ; (ii) l'autorisation de traiter un « nouveau » métal requiert une nouvelle séquence de négociations avec le gouvernement ; ou que (iii) le renouvellement d'un permis minier ne soit accordé qu'à la condition que l'entreprise procède à des études d'impact sur l'environnement supplémentaires, qui peuvent s'avérer longues et coûteuses⁴.

La production et, par conséquent, la disponibilité des éléments compagnons, dépendent entièrement de la viabilité économique du processus d'extraction du métal hôte. C'est pourquoi, les éléments compagnons ont souvent été (ou sont encore) rejetés et éliminés avec les stériles et les résidus miniers à chaque étape du processus de concentration.

Compte tenu de la nature du secteur minier, l'offre de métaux est généralement peu élastique à court terme, mais a tendance à être plus élastique avec le temps, à mesure que la production se développe. Toutefois, les particularités des métaux compagnons ont tendance à accentuer ce problème, car leur offre ne répond pas nécessairement à la demande du marché, même à moyen et à long terme, mais plutôt aux conditions mentionnées ci-dessus. La production de co-produits et de sous-produits est complexe et semble présenter une plus grande inélasticité au niveau de l'offre, car elle dépend du fait que l'exploitation minière du métal hôte doive, à un moment donné, identifier une faisabilité technique et/ou économique pour les exploiter.

Même les co-produits, qui jouent un rôle dans les décisions de production concernant d'autres métaux, restent fortement dépendants de l'offre du métal hôte, dont la demande suit parfois une dynamique propre de marché.

S'agissant des sous-produits, souvent considérés comme moins importants, y compris des prix plus élevés peuvent s'avérer insuffisants pour motiver une décision de production. L'offre de ces métaux a tendance à présenter une plus grande inélasticité.

Le fait de ne pas tenir compte de ces risques liés à l'offre pourrait affecter le rythme de déploiement de la transition énergétique et des technologies de transformation numérique. Encore mal comprise et toujours sans réponse, la lenteur de la réaction côté offre aura un impact significatif sur les chaînes de valeur mondiales en aval, mettant en danger des secteurs industriels entiers, et notamment leurs travailleurs dont la sécurité de l'emploi peut être remise en cause.

⁴ De nombreux pays accordent en général l'élargissement du permis d'exploitation minière à d'autres produits, mais souvent à condition que de nouvelles négociations soient engagées entre la compagnie minière et les autorités. De telles extensions de permis sont généralement accordées dans les mêmes conditions que le permis initial, comme c'est le cas au Sénégal (article 25 du Code minier de la République du Sénégal, 2016) ou en République du Congo (article 34 du Code minier, République du Congo, 2005). Mais ces formalités peuvent représenter une charge administrative et financière supplémentaire pour les entreprises si le coût d'extraction du sous-produit est à peine couvert par les recettes supplémentaires espérées.



4.1.2 Forte volatilité des prix

Il n'est pas rare que les prix des co-produits et des sous-produits soient soumis à une plus grande volatilité que ceux des métaux hôtes. En effet, au cours des 50 dernières années, la volatilité des prix des sous-produits a été chaque année en moyenne de moitié supérieure à celle des métaux principaux (Redlinger & Eggert, 2016).

Citons l'exemple du rhodium, qui est un sous-produit du platine et du palladium, principalement extrait en Afrique du Sud (80 % de la production mondiale en 2018) et en Russie (12 % de la production mondiale en 2018) (United States Geological Survey, 2021). Il sert surtout dans les convertisseurs catalytiques (85 % de la production de rhodium) (United States Geological Survey, 2021), utilisés pour réduire les gaz polluants nocifs émis par les véhicules.

Comme l'illustre la Figure 5, le rhodium se négociait à 11 000 USD /oz fin 2022, en baisse de 42 % par rapport à son pic de 19 000 USD /oz en mars 2022 et de 60 % par rapport à son prix le plus élevé qui était de 27 000 USD /oz en avril 2021, mais en hausse de 320 % par rapport à son prix de mars 2020, qui était de 3 500 USD l'once.

Une autre illustration remonte à une quinzaine d'années, lorsque l'industrie automobile, le plus gros consommateur de rhodium, a été frappée par la crise de 2008 : le prix du rhodium avait alors chuté de plus de 90 % en quelques mois, passant de 10 000 USD/oz à moins de 1 000 USD/oz.

FIGURE 5. Évolution des prix du rhodium en USD par once d'avril 2005 à janvier 2023



Source : Kitco.com, 2023.

Les conditions incertaines du marché pour certains métaux mineurs peuvent dissuader les entreprises minières de s'aventurer dans ce type de production, ce qui accentue plus encore les risques liés à l'approvisionnement et à la fluctuation des prix.

La volatilité des prix est également une difficulté pour les gouvernements, car elle les empêche de budgétiser adéquatement les recettes attendues du secteur minier, limitant ainsi leur capacité à planifier correctement les dépenses publiques.



Enfin, les fortes fluctuations des prix des matières premières ont un impact négatif sur le tissu social, et en particulier sur les travailleurs, qui courent le risque d'être licenciés pendant la phase de récession de chaque cycle d'expansion/récession. Une meilleure gestion de ces cycles se traduirait par des avantages tangibles pour les salariés, leurs familles et leurs communautés.

4.1.3 Risques de perte de métaux d'importance stratégique (comme les minéraux critiques)

Compte tenu des besoins croissant pour un large éventail de métaux, le rejet de certains métaux dans les halles à stériles et installations de stockage de résidus, sans les traiter, représente une perte tragique de valeur. Alors que le déficit d'approvisionnement en minéraux considérés comme essentiels pour la transition énergétique et pour les technologies numériques augmente, des recherches sont en cours pour essayer de limiter ces pertes et d'en récupérer le plus possible. Pour ce faire, des avancées dans le domaine métallurgique permettant de mettre en place un procédé aussi simple que possible afin de maximiser la récupération des métaux compagnons sont nécessaires.

Le fait de ne pas traiter les métaux mineurs représente une perte de valeur potentielle pour les opérations minières et États. Pour les autorités fiscales des pays producteurs, en particulier, cela représente un manque à gagner qui limite les recettes qui peuvent être perçues et redistribuées, notamment aux communautés.

4.1.4 Risques liés à la sous-déclaration des réserves et des ressources

Les estimations actuelles des réserves et des ressources en métaux sont loin d'être précises, en grande partie parce qu'il n'existe pas de directives ni de définitions universellement acceptées des produits primaires, des co-produits ou des sous-produits dans les normes codifiées de déclaration des ressources minérales (Mudd *et al.*, 2016). Les pays suivent différentes méthodes, y compris pour agréger et divulguer les données, ce qui entraîne des variations dans les estimations de ces réserves et ressources.

Et celles-ci sont encore plus marquées pour les métaux compagnons, qui sont souvent perçus comme renfermant une moindre valeur matérielle pour que leur extraction en vaille la peine, et sont donc négligés et sous-déclarés. Qui plus est, même lorsque la valorisation des métaux compagnons est considérée dans l'étude de faisabilité d'un projet minier, l'estimation de ces ressources est souvent non divulguée et présentée en tant que "équivalent-métal" du métal principal.

Il en résulte un manque de données fiables sur les estimations des ressources et sur la quantité et la qualité des minéraux disponibles et, par conséquent, une incertitude quant au fait qu'elles puissent être exploitées et transformées à grande échelle. Cette absence de données suffisantes et fiables accroît les incertitudes sur le marché des minéraux qui sont particulièrement demandés pour appuyer la transition énergétique et la transformation numérique. Elle affecte en outre la capacité à anticiper et à gérer les risques liés à l'insécurité de l'approvisionnement et à déterminer où et comment concentrer les efforts pour intensifier les activités de recherche et d'exploration et fixer les priorités. Des habitudes de divulgation d'informations plus complètes et plus transparentes pourraient donc aider à limiter la volatilité des prix.



ENCADRÉ 5. QUE SONT LES RESSOURCES ET LES RÉSERVES MINÉRALES ?

Les ressources et les réserves minérales sont des accumulations de matières premières minérales qui peuvent être extraites avec un profit à la clé, selon les conditions techniques et économiques du moment. Ayant pour une large part une composante économique, la fluctuation du prix des matières premières a une incidence directe sur la quantité de ressources et de réserves disponibles.

Les termes « ressources » et « réserves », dans leur usage actuel, sont des termes de divulgation d'informations techniques, qui sont obligatoires pour la plupart des entreprises minières cotées en Bourse. Ils sont définis dans des codes de divulgation standard, tel celui par exemple du Joint Ore Reserves Committee (JORC)⁵ (Australie et Nouvelle-Zélande), South African Mineral Reporting Codes (SAMREC)⁶ (Afrique du Sud) et l'Instrument national (Ni) 43-101⁷ (Canada), qui ont été mis au point par les organismes boursiers pour aider les investisseurs à comparer les projets d'exploration minière et à éviter les déclarations fausses ou trompeuses. Ces codes fixent des normes, des lignes directrices et des recommandations minimales pour la déclaration publique des actifs miniers. Ils servent également de cadre pour la classification des ressources et des réserves, sur la base des connaissances géologiques, des possibilités de récupération des métaux et de la viabilité économique des projets miniers. Ils reposent sur la notion de « personne compétente » (JORC, SAMREC) ou de « personne qualifiée » (CIM ni 43-101), c'est-à-dire qu'il est demandé à un expert technique, reconnu par ses pairs, de signer le rapport divulguant les résultats.

Une ressource minérale est la partie du gisement minéral pour laquelle il existe un niveau de confiance technique suffisant dans le modèle géologique pour espérer l'exploiter. Les ressources peuvent généralement être réparties en trois catégories différentes, classées en fonction du degré croissant de confiance géologique :

- Ressources présumées
- Ressources indiquées
- Ressources mesurées.

Une réserve minérale (Ni 43-101, SAMREC) ou **réserve de minerai** (JORC) représente la partie économiquement exploitable d'une ressource minérale indiquée et mesurée. Seule une étude de préfaisabilité ou de faisabilité d'un projet minier peut fournir suffisamment d'informations complémentaires pour définir la catégorie et passer de ressources à réserves. Les réserves sont généralement divisées en deux catégories, en fonction du degré croissant de confiance géologique dans les ressources minérales :

- Les réserves probables : elles sont inférées des ressources indiquées et mesurées.
- Les réserves prouvées : elles ne peuvent être établies qu'à partir des ressources mesurées.

5 Le code JORC est le code australasien pour la déclaration des résultats d'exploration, des ressources minérales et des réserves de minerai. Il est obligatoire pour les sociétés cotées en bourse en Australie et en Nouvelle-Zélande d'utiliser ce code pour divulguer leurs informations.

6 Le code SAMREC est le code sud-africain pour la déclaration des résultats d'exploration, des ressources et des réserves minérales : il fixe des normes minimales, des recommandations, et des lignes directrices pour la divulgation d'informations sur les minéraux.

7 Norme canadienne 43-101 de divulgation des projets miniers. Elle s'applique obligatoirement aux sociétés cotées en Bourse au Canada, eu égard à toute divulgation d'information relative aux propriétés minérales et minières.



Au niveau des pays producteurs, l'incertitude quant aux volumes et à la diversité de leurs ressources en minéraux et en métaux leur ôte toute possibilité de concevoir et de mettre en œuvre une stratégie minière et industrielle nationale efficace.

Au niveau des entreprises minières, le manque de données appropriées les prive de la possibilité de diversifier leur portefeuille et de reconsidérer leur décision d'exploiter des métaux qui sont habituellement regardés comme non prioritaires ou peu rentables.

4.1.5 Risques de flux de matières (premières minérales) illicites

Durant le processus de concentration, au cours duquel les minerais passent par des procédés chimiques et physiques pour être affinés en concentrés de qualité supérieure, de nombreux métaux compagnons restent mélangés et associés aux métaux hôtes, étant donné qu'ils partagent des propriétés similaires. Les concentrés de métaux hôtes peuvent ensuite être vendus aux fonderies et/ou usines de raffinage pour être séparés et transformés en métaux vendables. Ce qu'il reste est considéré comme de simples impuretés sans valeur ou pour lesquelles des pénalités peuvent être imposées.

Dans de nombreux pays producteurs, les concentrés exportés sans transformation particulièrement poussée ne sont pas systématiquement testés par les autorités pour vérifier la présence d'éléments autres que les métaux de base et les impuretés connues. En fait, lorsque les métaux mineurs ne font pas partie du portefeuille des compagnies minières, ils sont rarement déclarés comme des minéraux « extractibles », et ne sont donc pas déclarés. Bien qu'il existe des directives strictes (Readhead, 2018) permettant aux gouvernements des pays producteurs d'évaluer la teneur en métal et le volume des produits exportés, aucun protocole ni aucune analyse ne permet d'identifier des éléments quelconques si les matériaux exportés ne sont pas testés spécifiquement pour ceux-ci.

C'est donc là une problématique majeure, puisque les autorités compétentes ne sont pas en mesure d'estimer le volume et la valeur de l'ensemble des minéraux qui sont vendus ou exportés. Ceux expédiés à l'étranger sans déclaration ou déclaration adéquate représentent un risque élevé de **fuite de matériaux**, voire de **flux de matériaux illicites**. En conséquence, les États ne sont pas en mesure de réclamer la part des recettes qui leur revient.

Il est estimé qu'environ 60 % des minéraux critiques proviennent de métaux mineurs, et leur demande devrait croître de façon exponentielle à l'avenir; dès lors, la fuite potentielle de ces matériaux ou les flux de matériaux illicites représentent un risque financier important et un manque à gagner certain pour les pouvoirs publics, comme pour les entreprises.

4.2 Risques environnementaux

Le rejet de métaux compagnons, après les opérations d'extraction minière ou de traitement dans des décharges et haldes à stériles ou des installations de stockage de résidus miniers, soulève également des problèmes environnementaux sous-jacents, car certains de ces éléments, rendus plus mobiles en raison du processus de traitement lui-même, sont toxiques (comme le plomb ou le mercure, qui sont particulièrement neurotoxiques).

Les installations de stockage de résidus miniers fermés et abandonnés représentent l'une des sources les plus importantes de pollution par les métaux lourds, là où des activités minières sont développées ou l'ont été dans le passé. La lixiviation des métaux par les eaux de pluie peut participer à leur propagation en aval et précipiter l'écoulement des métaux lourds



présents dans les installations de stockage des résidus (Wang *et al.*, 2019). Cela représente une menace importante pour l'environnement, les communautés locales et les travailleurs. Ce problème est particulièrement aigu dans l'industrie minière, les employeurs ayant le devoir de protéger leurs employés et de veiller à leur santé et à leur sécurité (Organisation internationale du travail, 2003, 2005).

La moindre augmentation de la récupération de métaux compagnons contribuerait à aider à atténuer ce risque majeur. Pour ce faire, l'utilisation de techniques de traitement nouvelles et/ou améliorées conformes aux normes environnementales les plus strictes contribuerait à limiter ces impacts négatifs et les problèmes liés à l'héritage environnemental.

Certains éléments compagnons indésirables peuvent même parfois empêcher l'exploitation d'un gisement. Le projet de terres rares de Kvanefjeld au Groenland, qui selon les estimations représenterait plus d'un milliard de tonnes de ressources minérales (Greenland Minerals and Energy, 2015), est actuellement interrompu en raison de la sous-production d'uranium. La licence d'exploitation de ce projet a été rejetée par les autorités en application d'une nouvelle loi adoptée en 2021, interdisant l'exploration et la production de ressources minières quand la concentration d'uranium dépasse le seuil de 100 ppm (partie par million ou 0,0001 %) (Jamasmie, 2021).

4.3 Défis liés au recyclage

En théorie, le métal (en tant qu'atomes) peut être recyclé à 100 %, comparativement par exemple à des composés tels que les plastiques, dont les chaînes moléculaires sont dégradables sous l'effet de la chaleur, de la lumière ultraviolette ou au fil du temps. Dans la pratique, cependant, le compagnonnage des métaux pose des défis supplémentaires au niveau du recyclage.

Les métaux sont généralement largement dilués dans les objets manufacturés (Verhoef, 2004), ce qui est particulièrement vrai pour les métaux mineurs qui sont utilisés en très petites quantités. À cet égard, les procédés de recyclage métallurgique présentent un niveau de complexité comparable à celui des procédés métallurgiques miniers. Toutefois, contrairement au traitement minier, où les associations minérales sont présentes naturellement, les métaux contenus et associés dans les objets fabriqués répondent à des propriétés technologiques. Les métaux mineurs présents dans les objets manufacturés sont donc plus difficiles à recycler parce que leur inclusion dans de tels objets n'est pas naturelle. À cet égard, les connaissances métallurgiques développées et utilisées pour traiter les minerais naturels pourraient ne pas être adaptables ou pertinentes pour le traitement secondaire des « minerais artificiels ».



5.0 Comment la compréhension du compagnonnage peut aider à identifier de nouvelles sources de métaux

Les projections actuelles concernant la demande de métaux liée au développement des technologies énergétiques laissent présager un déficit important de l'offre au cours de la prochaine décennie (AIE, 2021). Si les moteurs de la demande sont relativement clairs, il est plus difficile d'estimer d'où viendront les minéraux, à quel rythme ils seront produits et comment certains métaux mineurs seront récupérés, étant donné que, techniquement parlant, ils ne peuvent pas être exploités pour eux-mêmes. Cela dit, une compréhension plus fine de la façon dont les métaux sont extraits et associés ensemble peut apporter un nouvel éclairage aux décideurs politiques et les inciter à mettre en place les instruments de politique publique et de réglementation nécessaires, à investir dans la recherche et le développement, à fournir un soutien adéquat aux nouvelles techniques de transformation, et à faciliter l'accès à de nouvelles sources de métaux. Une telle approche peut également s'accompagner de la création d'une plate-forme associant l'industrie minière et d'autres acteurs de la chaîne d'approvisionnement, afin d'étudier les voies possibles pour combler la brèche en matière d'approvisionnement. Sont présentées dans cette section plusieurs pistes pouvant être exploitées grâce à une meilleure compréhension du compagnonnage des métaux.

5.1 Opportunités de valorisation supplémentaire de la production métallique

La demande croissante de minéraux essentiels à la transition énergétique et aux technologies numériques conduit à porter un nouveau regard sur l'économie des métaux compagnons.

Le traitement des métaux compagnons peut être l'occasion d'augmenter la rentabilité des opérations minières, notamment en faisant un meilleur usage du capital investi et du travail intensif déjà effectué, depuis la phase d'exploration jusqu'à l'extraction, le concassage et le broyage.



Ce peut être également une aubaine pour les pays producteurs, en leur offrant de nouvelles possibilités de tirer profit de leur sous-sol et de développer des activités à valeur ajoutée – et donc de participer aux chaînes d’approvisionnement mondiales.

Les co-produits ou sous-produits, représentent une occasion pour les pays producteurs de repenser leur régime fiscal, et de l’assouplir pour certains types de minéraux, par exemple avec l’adoption de taux de redevances variables, en l’occurrence plus progressifs que les taux fixes (IGF 2022). Il peut toutefois s’avérer difficile d’imposer des taux variables sur les métaux hôtes, parce que les coûts et les prix augmentent ou diminuent généralement à l’unisson. Mais l’application de redevances variables aux métaux mineurs limite le risque pour la rentabilité de l’exploitation minière, dans les cas où la sous-production à elle seule ne génère pas suffisamment de valeur pour influencer les décisions d’investissement. En conséquence, cela pourrait signifier un flux de recettes supplémentaire pour les pays riches en ressources naturelles, sans décourager l’investissement dans le secteur minier. Cela dit, il convient pour les pays de faire preuve d’une certaine souplesse dans l’application de taux variables, en particulier dans le cas des métaux co-produits, car ils pourraient rivaliser avec la production du métal hôte, ou même la dépasser.

ENCADRÉ 6. NOUVEAUX SOUS-PRODUITS D’UNE MINE D’ÉTAIN

La mine d’Uis en Namibie est exploitée par Andrada Mining (anciennement AfriTin Minerals). Elle est entrée en production en 2019 pour produire un concentré d’étain (Sn). Les essais métallurgiques ont permis d’extraire du lithium et du tantale en tant que sous-produits. La construction d’une usine pilote pour produire de l’hydroxyde de lithium de qualité batterie et d’un circuit de séparation du tantale pour produire du concentré d’oxyde de tantale sera bientôt lancée (AfriTin Mining Ltd, 2022). Il est intéressant de noter que, en fonction de l’évolution relative des prix de l’étain et du lithium (et si les concentrations relatives dans le gisement le permettent), le lithium pourrait bien remplacer l’étain et devenir le principal élément produit par cette mine.

5.2 Halles à stériles et parcs à résidus miniers, sources potentielles de minéraux critiques

Comme évoqué ci-dessus, la plupart des installations de stockage de résidus miniers, en particulier celles qui sont fermées, abritent d’importantes quantités de métaux compagnons qui ont été extraits dans le cadre du processus de récupération de l’élément hôte, puis rejetés. Même si l’exploitation de ces éléments mineurs n’a pas été considérée dans le cadre de l’étude initiale de faisabilité d’un projet minier (ou l’a été, mais n’a pas été jugée économiquement viable à ce moment-là), il demeure possible, compte tenu de la demande croissante de minéraux critiques associée à l’évolution des conditions économiques générales et aux percées technologiques, d’exploiter ces résidus pour récupérer les métaux mineurs.

Cela nécessiterait de nouvelles évaluations géologiques des ressources et des réserves contenues dans ces résidus et pourrait considérablement modifier le statut de ces matériaux, qui passeraient de déchets à (nouveaux) gisements de minerai pouvant être réexploités.



ENCADRÉ 7. LA NOUVELLE ALCHEMIE : TRANSFORMER LES DÉCHETS MINIERS EN OR BLANC

La mine de Boron en Californie, vieille de 90 ans et toujours exploitée par Rio Tinto est une mine produisant des borates. Elle a produit une quantité importante de résidus au fil du temps. Afin d'évaluer leur valeur minérale potentielle restante, ces résidus ont été testés pour l'or et d'autres sous-produits. Les résultats ont révélé la présence de lithium à des niveaux de concentration qui pourraient justifier une nouvelle exploitation. Un essai à petite échelle a été réalisé avec succès en 2019 pour prouver la viabilité technique du projet. Et une étude de faisabilité est en cours pour la construction d'une usine de traitement d'une capacité initiale de 5 000 tonnes par an, suffisante pour approvisionner en lithium quelque 70 000 batteries de véhicules électriques (Rio Tinto, 2021).

En outre, la valeur que représentent de telles installations fermées de stockage de résidus miniers, pouvant justifier une nouvelle opération, apporte une additionalité importante. Elle offre l'opportunité unique d'intervenir sur ces installations qui sont une menace pour l'environnement et les communautés en raison de leur conception, de leur construction et de leurs normes dépassées dans le contexte du changement climatique. Cela dit, le retraitement des résidus doit faire l'objet d'un contrôle et d'un suivi strict afin d'éviter les catastrophes, comme la rupture du barrage de résidus qui s'est produite en septembre 2022 à Jagersfontein, en Afrique du Sud (Eligon, 2022).

Le retraitement des résidus pourrait constituer une importante source de revenus pour les pays miniers. Il pourrait également aider à créer – et à développer – un tout nouveau secteur, avec de nouveaux débouchés d'emploi. De nouvelles compétences spécifiques pourraient être requises pour pourvoir à ces nouveaux emplois, qui répondraient aux besoins de renforcement des compétences du pays.

Mais si en principe le retraitement des résidus peut s'avérer être une source séduisante de minéraux critiques, il faudra lever plusieurs obstacles réglementaires pour convaincre les investisseurs. Par exemple, le manque de clarté quant à la propriété des résidus – en particulier dans le cas des mines abandonnées et orphelines – et, par conséquent, leur sécurité, est un facteur dissuasif évident pour tout investisseur éventuellement intéressé. En outre, les questions concernant les droits fonciers, les coûts et les délais d'obtention des permis, des licences environnementales, l'accès à la technologie (en particulier pour les entreprises de taille moyenne) et le financement des opérations de retraitement des résidus sont souvent des freins considérables, qui doivent être éliminés pour pouvoir attirer les investisseurs.

Il appartient donc aux États de libérer le potentiel transformateur de ce qui, encore aujourd'hui, est considéré comme un passif environnemental, et créer une nouvelle source de récupération de minéraux essentiels aux technologies actuelles. Pour y parvenir, il faudra renforcer le cadre légal et réglementaire, mettre en place des mesures incitatives et assurer une plus grande cohérence ou harmoniser différents pans de l'action publique, afin de garantir la durabilité des pratiques. Par ailleurs, pour que les bailleurs soient convaincus d'investir (compte tenu au demeurant des externalités liées aux activités de retraitement), des programmes d'investissement appropriés et complets, tels que ceux dédiés à la valorisation des déchets miniers devront être conçus (en les insérant dès le départ dans les procédures d'autorisation), et être financés comme il se doit.



5.3 Possibilité d'inscrire la production minière dans la stratégie nationale de développement

La recherche d'un volume et d'une diversité de plus en plus élevés de minéraux et de métaux pour soutenir les technologies indispensables à un avenir plus durable – ainsi que de stratégies permettant d'en sécuriser l'approvisionnement – pousse un nombre croissant de pays producteurs à intensifier leur production et à passer des accords d'approvisionnement à long terme.

Cette tendance place ces pays dans une position de force et leur donne donc la possibilité de repenser leur avantage stratégique, tant face aux partenaires mondiaux qu'en termes de stratégie nationale de développement. Partant de là, une bonne gestion de la production minière nationale, surtout si elle est diversifiée, est essentielle pour favoriser le développement industriel et créer plus de valeur ajoutée, et pour stimuler les investissements dans les secteurs économiques essentielles pour les questions climatiques. Au niveau mondial, c'est une occasion unique pour les pays producteurs de renforcer leur position dans les chaînes d'approvisionnement internationales et de conclure des marchés plus justes et plus équitables avec les investisseurs.

Pour que ces ambitions se matérialisent, il sera important de revoir les procédures réglementaires relatives à l'attribution des licences ou des permis lorsque des données existent concernant les métaux compagnons. Le système de délivrance des permis et licences ne doit pas empêcher les entreprises minières de traiter des métaux mineurs lorsque cette transformation est économiquement réalisable; et en même temps, les autorités publiques doivent être en mesure d'en réévaluer les conditions si tout « changement important » se produit⁸. En outre, les autorités gouvernementales doivent être informées du niveau de traitement des métaux compagnons, même s'ils ne sont pas transformés, et exiger plus de transparence et des déclarations claires, notamment en ce qui concerne la présentation systématique et détaillée des données géologiques et la classification des métaux en tant que sous-produits ou co-produits. Cet aspect est important parce que certains métaux mineurs peuvent être reclassés et passer de la catégorie « sous-produits » à la catégorie « co-produits », si à un moment donné la valeur de production devient significative.

En termes de planification, il est essentiel pour les pays producteurs de comprendre les liaisons naturelles entre les éléments métalliques et de disposer d'une bonne base de données sur le compagnonnage des métaux afin d'identifier les minéraux qui peuvent être exploités et ceux ne pouvant pas encore être récupérés, pour ensuite stimuler l'exploration ou promouvoir des opérations de récupération dans les mines en fonctionnement ou les futurs projets miniers.

⁸ La notion de « changement important » désigne toute modification substantielle ayant un effet significatif sur l'ensemble des activités d'une entreprise.



6.0 Conclusion

De l'exploration à l'exploitation minière, jusqu'à la transformation et le retraitement des résidus, il est essentiel de comprendre le compagnonnage des métaux pour trouver des moyens innovants de combler le déficit d'approvisionnement qui s'annonce en minéraux nécessaires à la transition énergétique. Un nouvel outil est donc ajouté à la boîte à outils du secteur minier.

Le principal point à retenir de la notion de compagnonnage des métaux est que l'extraction des métaux et la disponibilité de l'approvisionnement ne peuvent être considérées séparément. De fait, la production d'un grand nombre de métaux est interconnectée et cela oblige donc à mieux comprendre la façon dont fonctionne la dynamique du marché de ces métaux (individuellement et collectivement) et comment elle peut affecter la capacité de l'industrie minière à fournir des métaux qui sont en forte demande, mais pas nécessairement en offre suffisante.

Pour encourager les entreprises minières à investir dans des métaux mineurs considérés comme de moindre intérêt (et donc traités comme des sous-produits), mais par ailleurs critiques pour un large éventail d'applications industrielles, les États pourraient envisager de mettre en place des systèmes particuliers d'incitation en faveur de l'investissement dans la récupération des métaux compagnons, en même temps que les métaux hôtes. En contrepartie, ils pourraient obliger les sociétés de prospection à effectuer et à divulguer des analyses multi-éléments d'échantillons du sol afin de s'assurer que tous les éléments ou minéraux présents sont pris en compte.

Des volumes considérables de métaux sont extraits, mais tous ne sont pas traités, pour les raisons soulignées auparavant. Cela signifie que les haldes, parcs et bassins de résidus et stériles, par exemple, contiennent des éléments qui, à un moment ou à un autre, n'ont peut-être pas été considérés comme importants, mais pourraient le devenir, compte tenu de la tension actuelle qui existe du côté de l'offre. Pour atténuer les risques et tirer parti de l'opportunité qui se présente, il convient d'encourager la recherche fondamentale en métallogénie ainsi que la recherche appliquée sur les procédés métallurgiques.

En termes de politiques publiques, il existe d'importants risques économiques et environnementaux qui doivent être pris en compte pour que le retraitement des résidus soit réalisable dans des conditions respectant l'environnement. Néanmoins, et c'est ce qui est important, les perspectives offrent également d'énormes opportunités à mesure que le



développement technologique et l'ambition d'avancer vers un avenir plus vert conduisent à centrer l'attention sur les métaux mineurs, qui sont d'une importance grandissante pour les besoins industriels. C'est également là une occasion pour les compagnies minières d'accroître la valeur de leurs opérations et d'optimiser la disponibilité de minéraux critiques.

Pour faciliter l'exploration et les investissements, il faudra promouvoir et développer des synergies et des partenariats entre les organismes publics de recherche et les compagnies minières, notamment au niveau régional. Cette logique devrait permettre d'identifier des moyens innovants de traiter les métaux mineurs et de valoriser les minéraux et les métaux qui sont extraits mais qui sont considérés, ou l'ont été jusqu'à présent, comme des déchets.

Le bouillonnement du marché des métaux – compte tenu en particulier de la volatilité élevée des prix, des stratégies mondiales visant à garantir l'accès aux minéraux critiques, et de la prolifération des contrats d'approvisionnement directs entre acteurs des chaînes d'approvisionnement et compagnies minières – est intimement lié à la difficulté et à la lenteur de la réponse du côté de l'offre face à la pression de la demande. Comprendre le compagnonnage des métaux permettrait d'apporter de nouvelles connaissances sur la faisabilité de l'extraction de certains minerais et sur les types de corps minéralisés dans lesquels il y a plus de chance d'en trouver. Ainsi, il devrait être possible de prendre des décisions mieux éclairées lors de l'élaboration de plans concernant l'emploi de ces métaux à des fins industrielles.



Références

- AfriTin Mining Ltd. (2022). *Lithium and tantalum product development update*. https://polaris.brighterir.com/public/andrada_mining/news/rns/story/xz0d93r
- ASM International (2011). *Metallurgy for the non-metallurgist* (2nd Ed.). https://www.asminternational.org/documents/10192/3212401/05306G_Sample_BuyNow.pdf/ab60c086-2c71-4de0-91f6-aad1112cf4dc
- Bureau de recherches géologiques et minières (2016). *Fiche de synthèse sur la criticité des métaux – Le gallium*. <https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2020-12/fichecriticitegallium-publique160912.pdf>
- Clemson University Department of Materials Science and Engineering (2023). *Metals*. <https://www.clemson.edu/cecas/departments/mse/research/areas/metals.html>
- Cobalt Institute (2022). *Cobalt mining*. <https://www.cobaltinstitute.org/about-cobalt/cobalt-life-cycle/cobalt-mining/>
- Deady, E., Moon, C., Moore, K., Goodenough, K. M., Shail, R. M. & mn. (2022). Bismuth : Economic geology and value chains. *Ore Geology Reviews*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104722>
- Desjardins, J. (2014). *The history of metals*. Visual Capitalist. <https://www.visualcapitalist.com/history-of-metals/>
- Eligon, C. G. (2022). How a South African town became buried in sludge after a diamond mine collapse. *New York Times*.
- Fleming, A., Manley, D. & Lassourd, D. (2022). Variable royalties : An answer to volatile mineral prices. Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development. <https://www.igfmining.org/wp-content/uploads/2022/11/variable-royalties-an-answer-to-volatile-mineral-prices.pdf>
- Frenzel, M., Kullik, J., Reuter, M. A. & Gutzmer, J. (2017). Raw material “criticality” – sense or nonsense? *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(12). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa5b64>
- Fulp, M. (2015). *The real cost of mining gold*. Kitco. <https://www.kitco.com/ind/fulp/2015-02-04-The-Real-Cost-of-Mining-Gold.html>
- Greenland Minerals and Energy (2015). *Company announcement, Kvanefjeld feasibility study completed*.
- Agence internationale de l'énergie (2021). *The role of critical minerals in clean energy transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
- Organisation internationale du travail (2003). *Sécurité et santé dans les industries des métaux non ferreux*.
- Organisation internationale du travail (2005). *Recueil de directives pratiques sur la santé et la sécurité dans l'industrie du fer et de l'acier*. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---safework/documents/normativeinstrument/wcms_112441.pdf



- Jamasmie, C. (2021). *Greenland bans uranium mining, blocking vast rare earths project*. Mining.com. <https://www.mining.com/greenland-bans-uranium-mining-blocking-vast-rare-earth-projects/>
- Kitco.com (2023). *Rhodium In US dollar per ounce - (RHODIUM)*. https://www.kitco.com/charts/interactive-charts/?Symbol=RHODIUM&Currency=USD&multiCurrency=true&langId=EN&period=2329200000&utm_content=20110407_iCharts_30day_rhodium_link&utm_campaign=iCharts
- Manley, D., Heller, P. R. P., & Davis, W. (2022). *No time to waste: Governing cobalt amid the energy transition*. Natural Resource Governance Group. https://resourcegovernance.org/sites/default/files/documents/no_time_to_waste_governing_cobalt_amid_the_energy_transition.pdf
- Mudd, S., Jowitt, S. M. & Werner, T. T. (2016). The world's by-product and critical metal resources part I: Uncertainties, current reporting practices, implications and grounds for optimism. *Ore Geology Reviews*, 86. p. 924–938.
- Nassar, N. T. Graedel, T. E., & Harper, E. M. (2015). By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science Advances*, 1(3). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400180>
- Nieto, A., & Zhang, K. Y. (2013). Cutoff grade economic strategy for byproduct mineral. *Mining Technology*, 122(3).
- Readhead, A. (2018). *Monitoring the value of mineral exports: Policy options for governments*. Organisation de coopération et de développement économiques et Forum intergouvernemental sur les mines, les minéraux, les métaux et le développement durable. <https://www.oecd.org/tax/beps/monitoring-the-value-of-mineral-exports-oecd-igf.pdf>
- Redlinger, M. & Eggert, R. (2016). Volatility of by-product metal and mineral prices. *Resources Policy*, 46, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.12.002>
- République du Congo (2005). *Code minier, Loi n° 4-2005 du 11 avril 2005*.
- République du Sénégal (2016). *Code minier*.
- Rietveld, E., Boonman, H., van Harmelen, T., Hauck, M., & Bastein, T. (2019). *Global energy transition and metal demand*. TNO. https://www.researchgate.net/publication/330468693_GLOBAL_ENERGY_TRANSITION_AND_METAL_DEMAND
- Rio Tinto (2021). *Rio Tinto achieves battery grade lithium production at Boron plant*. <https://www.businesswire.com/news/home/20210407005321/en/>
- République du Sénégal (2016). *Code minier*.
- Skinner, B. J. (2022). *Mineral deposit*. Encyclopédie Britannica. Lien consulté en 2022. <https://www.britannica.com/science/mineral-deposit>
- United States Geological Survey (s.d.). *What is the difference between a rock and a mineral?* <https://www.usgs.gov/faqs/what-difference-between-rock-and-mineral>
- United States Geological Survey (2021). 2018 Minerals yearbook, platinum-group metals. <https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2018-plati.pdf>
- Verhoef, E. V., Gerard, P. J., Dijkema, & Reuter, M. A. (2004). Process knowledge, system dynamics, and metal ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 8(1–2), 23–43.



Wang, P., Sun, Z., Hu, Y., & Cheng, H. (2019). Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact. *Science of The Total Environment*, 695. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133893>

World Gold Council (2018). *Guidance note on non-GAAP metrics : All-in sustaining costs and all-in costs*. <https://www.gold.org/about-gold/gold-supply/responsible-gold/all-in-costs>

Zepf, V., Reller, A., Rennie, C., Ashfield, M., & Simmons, J. (2014). *Materials critical to the energy industry. An introduction* (2nd Ed.). BP Plc.



IGF

INTERGOVERNMENTAL FORUM
on Mining, Minerals, Metals and
Sustainable Development