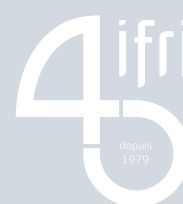




JUIN
2025

Réévaluation de l'offre de cuivre Le rôle crucial de la technologie



Cédric PHILIBERT
Nicholas ARNDT

L’Ifri est, en France, le principal centre indépendant de recherche, d’information et de débat sur les grandes questions internationales. Créé en 1979 par Thierry de Montbrial, l’Ifri est une fondation reconnue d’utilité publique par décret du 16 novembre 2022. Elle n’est soumise à aucune tutelle administrative, définit librement ses activités et publie régulièrement ses travaux.

L’Ifri associe, au travers de ses études et de ses débats, dans une démarche interdisciplinaire, décideurs politiques et experts à l’échelle internationale.

Les opinions exprimées dans ce texte n’engagent que la responsabilité de l’auteur.

ISBN : 979-10-373-1075-0

© Tous droits réservés, Ifri, 2025

Couverture : © KGHM (<https://kgm.com/>)

Comment citer cette publication :

Cédric Philibert et Nicholas Arndt, « Réévaluation de l’offre de cuivre : le rôle crucial de la technologie », *Études de l’Ifri*, Ifri, juin 2025.

Ifri

27 rue de la Procession 75740 Paris Cedex 15 – FRANCE

Tél. : +33 (0)1 40 61 60 00 – Fax : +33 (0)1 40 61 60 60

E-mail : accueil@ifri.org

Site internet : ifri.org

Auteurs

Cédric Philibert est consultant indépendant et analyste senior dans le domaine de l'énergie et du climat, avec une spécialisation sur les énergies renouvelables pour l'industrie et les transports, et le rôle de l'électrification et de l'hydrogène dans la décarbonation de l'économie mondiale. Il est également chercheur associé à l'Institut français des relations internationales (Ifri) et à l'Université nationale australienne (ANU). Il a travaillé pendant 19 ans à l'Agence internationale de l'énergie (AIE), d'abord avec la division énergie et environnement, en charge de l'évolution du cadre international de lutte contre les changements climatiques. En 2009, il a rejoint la division des énergies renouvelables en tant que responsable des enjeux liés aux technologies.

Nicholas Arndt a obtenu son doctorat à l'université de Toronto en 1975 et a occupé des postes universitaires dans plusieurs pays avant de devenir professeur en France. Ses recherches portent sur les roches mafiques et ultramafiques, les gisements de minerais magmatiques et les premiers environnements terrestres. Il a dirigé d'importants projets internationaux, notamment le forage de Barberton dans le cadre de l'International Continental Drilling Program (ICDP) et du programme de la Fondation européenne pour la science (ESF) sur l'environnement archéen. Nicholas Arndt, qui a siégé dans des comités scientifiques majeurs, est un chercheur fréquemment cité, membre de l'Academia Europaea et de la Geochemical Society.

Les auteurs remercient Larry Cathles, Steve Kesler, Olivier Vidal et Dan Wood pour leurs commentaires qui ont permis d'améliorer le document.

Résumé

Certains auteurs affirment que la transition énergétique est vouée à l'échec en raison de la rareté des métaux et de l'augmentation des coûts énergétiques de l'extraction. À mesure que les teneurs en minerai diminuent, l'exploitation minière nécessiterait davantage de combustibles fossiles, ce qui entraînerait une augmentation des émissions de gaz à effet de serre susceptible de compromettre les efforts de décarbonation. En outre, ils avertissent que l'expansion des opérations minières peut entraîner une consommation accrue d'eau douce, une production de déchets plus élevée et une dégradation inacceptable de l'environnement.

Un examen plus approfondi de l'exploration et de l'exploitation minières suggère toutefois que ces préoccupations sont sans doute exagérées. Les progrès de la technologie minière ont permis l'extraction efficace de gisements à faible teneur sans augmentation majeure de la consommation d'énergie. Comme l'illustre le cas du cuivre, les réserves et les ressources minérales n'ont cessé d'augmenter au fil du temps. Si l'exploitation minière a des incidences sur l'environnement, sa contribution à l'utilisation des sols, à la consommation d'eau et à la perte de biodiversité reste relativement faible. Les coûts des métaux ont augmenté mais sont restés largement abordables.

La demande de métaux augmentera de manière significative car la transition énergétique se combine à la numérisation de l'économie et à une demande d'énergie toujours plus importante de la part des pays en voie de développement. Dans le cas du cuivre, le taux de croissance attendu ne s'écarte pas sensiblement de celui des dernières décennies. Les réserves et les ressources sont suffisamment importantes pour soutenir cette croissance avec seulement une petite réduction de la teneur en minerai, et pourraient encore croître si les prix augmentent. Un large éventail d'innovations techniques garantira probablement que la consommation d'énergie de l'extraction d'une tonne de cuivre n'augmente pas, tandis que l'électrification en cours des mines et la décarbonation de la production d'électricité garantiront une diminution continue des émissions de gaz à effet de serre associées.

Les véritables risques pour la transition énergétique sont la vitesse d'augmentation insuffisante de l'extraction des métaux, y compris le cuivre, ainsi que les risques géopolitiques associés à des niveaux élevés de concentration dans l'extraction et, surtout, le raffinage pour une série de matériaux critiques.

Executive summary

Some authors argue that the energy transition is doomed to fail due to metal scarcity and the rising energy costs of extraction. They claim that as ore grades decline, mining will require more fossil fuel, leading to increased greenhouse gas emissions that could undermine decarbonization efforts. Additionally, they warn that expanding mining operations may result in higher freshwater consumption, waste production, and unacceptable environmental degradation.

A closer look at mineral exploration and mining suggests, however, that these concerns may be overstated. Advances in mining technology have enabled the efficient extraction of lower-grade deposits without major increases in energy use. As illustrated by the case of copper, mineral reserves and resources have constantly increased over time. While mining has environmental impacts, its contribution to land use, water consumption and loss of biodiversity remains relatively small. Metal costs have increased but remained broadly affordable.

The demand for metals will significantly increase as the energy transition combines with the digitalisation of the economy and an ever-increasing energy demand from developing countries. In the case of copper, the expected growth rate does not sensibly depart from the last decades. Reserves and resources are large enough to sustain that growth with only a small reduction in ore grade and could further increase if prices increase. A breadth of technical innovations will likely ensure that the specific energy consumption of copper mining does not increase, while the ongoing electrification of mines and decarbonization of electricity generation will ensure a continuous decrease in specific greenhouse gas emissions.

The real risks for the energy transition are the insufficient rate of increase in metal mining, including copper, and the geopolitical risks associated with high levels of concentration of mining activities and moreover in refining for a series of critical materials.

Sommaire

SOMMAIRE	5
INTRODUCTION	6
L'importance du cuivre	10
Métaux co-récupérés.....	12
LA FORMATION ET L'EXPLOITATION DES GISEMENTS DE CUIVRE .	14
La formation des gisements minéraux	14
Types et répartition des gisements de cuivre	14
Exploitation minière et traitement des minerais	16
Réserves et ressources	19
LES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES DE L'EXTRACTION DES METAUX	22
Extraction de métaux et extraction totale.....	22
Énergie et gaz à effet de serre	23
Eau et déchets	26
Impact sur la biodiversité.....	28
L'AVENIR DE L'EXPLOITATION MINIERE ET LE POUVOIR DE LA TECHNOLOGIE	32
Creuser plus profond ?	32
Améliorations technologiques	35
CONCLUSION	38
REFERENCES	39

Introduction

L'augmentation continue de la demande de métaux, en particulier depuis la Seconde Guerre mondiale, a alimenté une croissance économique rapide. Cette croissance s'est accompagnée d'une augmentation significative de la population et d'une amélioration considérable du niveau de vie de milliards de personnes. La croissance démographique mondiale entre maintenant dans une phase de ralentissement et pourrait s'inverser au cours des prochaines décennies. Au-delà d'un certain niveau de développement économique, la demande d'industrie lourde cède la place à la demande de services qui, sans être entièrement dématérialisés, sont néanmoins moins gourmands en matériaux.

La transition énergétique vise à remplacer les combustibles fossiles – gaz, pétrole et charbon – par des sources de production à faible teneur en carbone, principalement éoliennes et solaires, non seulement pour la production d'électricité mais aussi dans les bâtiments, l'industrie et les transports. Cette évolution entraînera une augmentation significative de la demande de métaux essentiels à la production, à la distribution et au stockage de l'énergie, en particulier dans les véhicules électriques. Il s'agit notamment de métaux tels que le nickel, le cobalt et le lithium, ainsi que les fameuses terres rares. Il s'agit également de métaux industriels comme le fer et l'aluminium, avec un accent particulier sur le cuivre, qui fait l'objet du présent document.

Simultanément, la croissance rapide de la numérisation, de l'Intelligence artificielle (IA), des centres de données et des cryptomonnaies continue de stimuler la demande de métaux. Les gouvernements des pays industrialisés sont de plus en plus préoccupés par la dépendance à l'égard des sources étrangères, en particulier la Chine, qui a établi une position dominante dans l'extraction et le raffinage des métaux.

À long terme, la demande de métaux se stabilisera puis diminuera à mesure que le recyclage répondra à une part croissante de cette demande, bien que limitée par les utilisations les plus dispersives et par les contraintes physiques et économiques. Toutefois, au cours des prochaines décennies, la nécessité urgente de passer d'un monde principalement alimenté par des combustibles fossiles à un monde alimenté principalement par des énergies renouvelables – solaire, éolienne et hydroélectrique – grâce à l'extension des réseaux électriques et à l'électrification de nombreuses applications, maintiendra une forte demande de métaux. L'industrie minière peut-elle relever ce défi ?

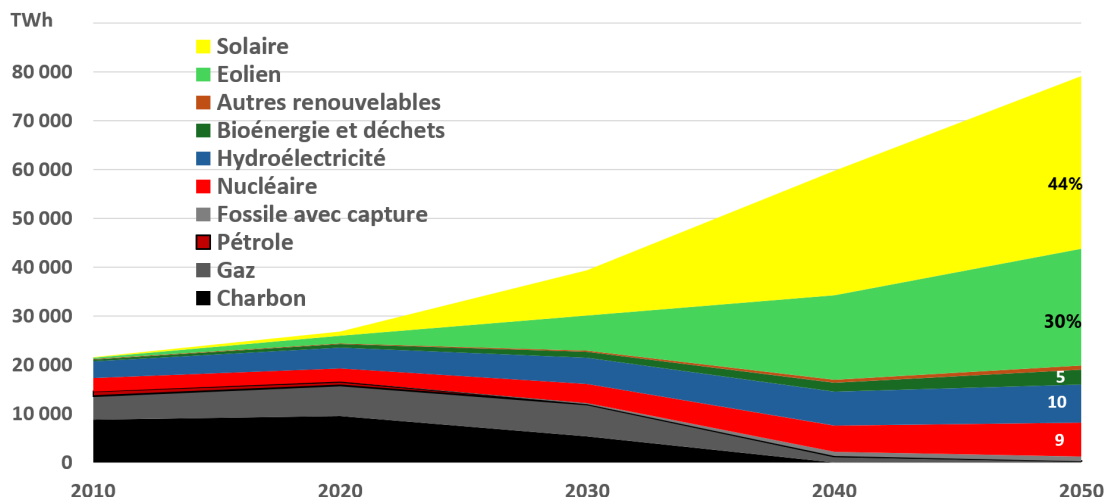
Dans son dernier rapport, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a identifié des options de réduction des émissions coûtant moins de 20 dollars par tonne d'équivalent CO₂, qui représentent plus de la moitié du potentiel total de réduction des émissions nécessaire pour rester sur une trajectoire de 1,5 °C d'ici 2030. Les deux premières options sont l'énergie solaire et l'énergie éolienne, qui offrent respectivement des potentiels de 3,3 Gt CO₂eq/an et de 3,08 Gt CO₂eq/an. Comme troisième option, le GIEC mentionne la réduction de la déforestation et la conversion d'autres écosystèmes (2,28 Gt). D'autres options du secteur énergétique sont mentionnées, mais avec des potentiels plus faibles et des coûts presque toujours plus élevés : la réduction des fuites de méthane, la bioénergie, l'énergie géothermique et hydroélectrique, l'énergie nucléaire et le captage et le stockage du carbone (GIEC 2023).

Les technologies de l'énergie éolienne et solaire sont principalement adaptées à la production d'électricité plutôt que de chaleur ou de carburant pour le transport. Pour réduire l'utilisation des combustibles fossiles – et pas seulement pour la production d'électricité, qui ne représente qu'environ 20 % de la demande finale d'énergie –, il sera nécessaire d'électrifier autant que possible les secteurs d'utilisation finale de l'énergie : les bâtiments, les industries et les transports.

Le développement des énergies renouvelables, notamment éoliennes et solaires, et l'électrification des usages de l'énergie sont donc les moyens les plus importants pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Ces stratégies ont été mises en avant dans les plans stratégiques de plusieurs pays, dont la Chine, les États-Unis (avant la seconde présidence de Donald Trump), l'Union européenne (UE), etc. Elles tiennent également en bonne place dans le scénario « zéro émission nette en 2050 » (NZE-2050) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), publié pour la première fois en 2021.

Le schéma 1 illustre la croissance rapide de l'énergie éolienne et solaire ainsi que de la consommation d'électricité, dans un scénario récemment révisé (AIE 2024). D'ici 2050, l'électricité devrait représenter la moitié de la consommation finale d'énergie et les deux tiers de l'énergie « utile », terme qui tient compte des pertes substantielles subies en brûlant des combustibles pour produire de l'électricité ou de l'énergie mécanique. L'énergie solaire devrait couvrir 44 % de la demande future d'électricité (42 % pour l'énergie solaire photovoltaïque et 2 % pour l'énergie solaire thermodynamique), 30 % pour l'énergie éolienne, 10 % pour l'hydroélectricité, 9 % pour l'énergie nucléaire, 4 % pour la bioélectricité et 1 % pour l'énergie géothermique et le charbon avec captage du CO₂.

Schéma 1 : Production d'électricité dans le scénario « zéro émission nette » de l'AIE



Source : « Data from World Energy Outlook 2024, Agence internationale de l'énergie (AIE), 2024.

D'autres institutions ont publié des scénarios comparables. Par exemple, le scénario NZE-2050 de Bloomberg New Energy Finance prévoit que les sources renouvelables fournissent 81 % de l'électricité, 9 % provenant du gaz et du charbon avec captage du CO₂.

Métaux critiques

Les politiciens, les journalistes et le grand public ont pris conscience de la notion de métaux ou de minéraux « critiques » lorsque la Chine a imposé des restrictions à l'exportation des terres rares en 2010. Cette mesure a suscité une inquiétude mondiale et une hausse du prix des terres rares. Plus important encore, elle a alerté les pays industrialisés sur les menaces potentielles pesant sur l'approvisionnement en certains métaux essentiels pour les applications de haute technologie. Auparavant, dans les années 1980, le ministère de l'intérieur et le service géologique des États-Unis avaient dressé une liste de « matériaux stratégiques et critiques » axés sur les besoins militaires et industriels. Les restrictions chinoises à l'exportation ont ensuite conduit à l'établissement de listes de métaux ou de minéraux critiques, la première aux États-Unis en 2017, suivie de listes distinctes dans l'UE, au Japon et dans d'autres pays. Dans ces listes, un métal ou un minéral (les deux figurant dans la plupart des compilations) est défini comme critique s'il existe un risque d'approvisionnement significatif et s'il a une importance économique et stratégique, en particulier dans le cadre de la transition énergétique. Sur cette base, les métaux suivants sont considérés comme hautement critiques dans la plupart des listes : terres rares, lithium, cobalt, nickel, gallium, germanium, titane, auxquels s'ajoute le graphite. Même si le cuivre a une importance économique et stratégique considérable, il n'est généralement pas considéré comme critique car les sources sont largement dispersées dans des pays qui ont la réputation d'être des fournisseurs fiables. L'UE et les États-Unis ont cependant récemment

reconnu la valeur stratégique du cuivre, dans le cas de l'UE en l'incluant comme matière première stratégique dans sa liste des matières premières critiques (MPC), tandis que l'ordre exécutif de Trump de mars 2025 permet de faciliter l'obtention de permis et de financement pour les projets dans le secteur du cuivre (sans toutefois étendre la liste MPC au cuivre).

Dans la quasi-totalité des listes, les terres rares sont classées comme hautement critiques. Cela s'explique par la mainmise de la Chine sur le traitement et le raffinage de ces métaux – le pays contrôle actuellement 60 % de la production primaire et 85 à 90 % du raffinage mondial. Lorsque le pays a imposé des restrictions à l'exportation en 2010, il était la source d'une proportion similaire de terres rares extraites, mais au cours des années suivantes, les États-Unis, l'Australie, le Myanmar et d'autres pays ont développé des mines qui fournissent environ 30 % des besoins mondiaux. Les terres rares ne sont pas si rares dans la croûte terrestre et les teneurs des gisements de minerai sont similaires à celles du cuivre. En outre, de nombreux gisements de terres rares sont connus sur tous les continents.

Les médias et les politiciens de tous les pays semblent toutefois hypnotisés par les terres rares. Ces métaux ont été mis en évidence dans les tentatives de Trump d'acheter le Groenland et d'obtenir une compensation pour le soutien des États-Unis à l'Ukraine. Le président a déclaré qu'il voulait obtenir de l'Ukraine « 500 milliards de dollars de terre crue [sic]... ». L'utilisation du mot « terre » comme substantif et au singulier suggère que le président imagine qu'un type de sol rare et exceptionnel se trouve sous les champs de blé de l'Ukraine. En fait, il existe peu de preuves de l'existence de gisements importants et viables de terres rares dans le pays. Certaines traces de minéralisation en terres rares sont mentionnées dans des rapports de l'ère soviétique, mais aucune n'est actuellement exploitée. Pour mettre le chiffre de 500 milliards de dollars en perspective, Bayan Obo en Chine, de loin le plus grand gisement de terres rares au monde, possède des ressources d'une valeur d'environ 300 milliards de dollars seulement. Malgré cela, les médias persistent à qualifier l'offre de Trump à l'Ukraine d'accord sur les « terres rares ».

En termes économiques, les terres rares sont des produits de base relativement peu importants ; la valeur de la production mondiale ne représente qu'environ 10 % de celle du cuivre et est comparable à celle des métaux de base tels que le zinc ou le plomb. Leur importance actuelle est principalement due à la domination de la Chine dans la production et le traitement des terres rares, et à sa volonté de tirer parti de ce contrôle en réponse à la pression commerciale des États-Unis.

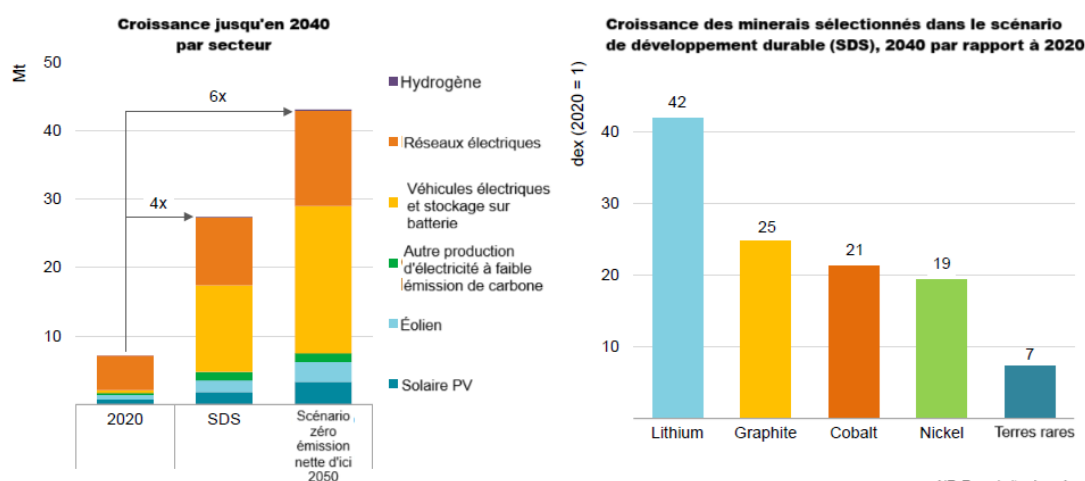
L'importance du cuivre

Plus encore que le lithium ou les terres rares, le cuivre, excellent conducteur de chaleur et d'électricité, ductile et facile à travailler, résistant à la corrosion, est au cœur de la transition énergétique. Les éoliennes, les panneaux photovoltaïques, les véhicules électriques, les pompes à chaleur, les réseaux électriques, notamment *offshore*, tous éléments clés de la transition, font largement appel au cuivre.

La consommation annuelle est d'environ 27 millions de tonnes de cuivre, dont les deux tiers sont utilisés sous leur forme pure, principalement dans les fils électriques, les câbles et la plomberie. Environ 20 % sont utilisés sous forme de laiton (alliage de cuivre et de zinc), dans les robinets, les instruments de musique et les pièces mécaniques. Environ 5 % sont utilisés sous forme de bronze (alliage de cuivre et d'étain), pour les cloches, les statues et certains composants mécaniques tels que les roulements. L'ensemble des autres alliages représente moins de 5 % de la production totale.

En 2021, l'AIE a évalué que la demande de minéraux critiques dans les secteurs des technologies de transition pourrait être multipliée par six d'ici 2040, selon la première édition du scénario NZE-2050 (schéma 2). Près de la moitié de cette augmentation serait nécessaire pour produire des véhicules électriques et des batteries de stockage, un tiers pour les réseaux électriques et un cinquième pour la production d'électricité à faible émission de carbone (principalement éolienne et solaire).

Schéma 2 : Demande en minerais pour différentes technologies bas-carbone par scénario



Notes : Mt = millions de tonnes. Comprend tous les minéraux dans le champ d'application de ce rapport, mais n'inclut pas l'acier et l'aluminium. Voir l'annexe pour une liste complète des minéraux.

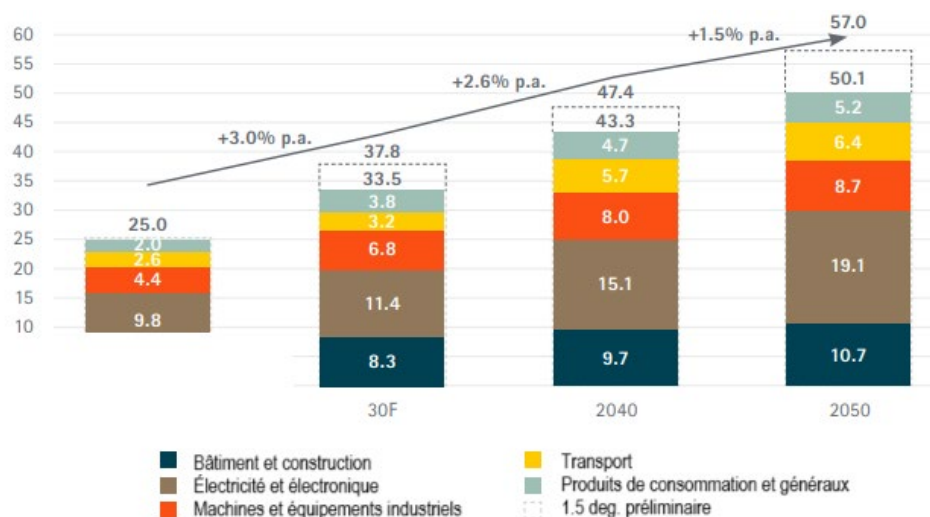
Source : « The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions », AIE, 2021.

La consommation dans ces secteurs devrait augmenter d'au moins sept fois pour les terres rares, environ vingt fois pour le nickel, le cobalt et le graphite, et jusqu'à quarante fois pour le lithium. Bien que le cuivre ne soit généralement pas considéré comme un minerai critique, son approvisionnement dans les décennies à venir est incertain dans un monde qui se précipite vers une électrification à grande échelle. Selon certains analystes (par exemple, Hache *et al.*, 2020), l'humanité pourrait consommer jusqu'à 90 % des ressources connues de cuivre connues ou 54 % des ressources totales estimées d'ici 2050.

La demande réelle dépendra du taux de croissance économique, du sort des transitions énergétiques, de la vitesse et du niveau de l'électrification des utilisations actuelles des combustibles fossiles, de la croissance de l'offre qui dépend de la vitesse à laquelle de nouvelles ressources sont découvertes. La plupart des analyses convergent vers un doublement de la consommation annuelle de cuivre d'ici 2050, comme l'indique l'International Copper Association (schéma 3).

La demande réelle de cuivre dépend également des possibilités de substitution, influencées par les variations des prix relatifs. L'aluminium peut remplacer le cuivre dans les tubes de refroidissement et de réfrigération, les équipements et câbles électriques. La fibre optique peut remplacer le cuivre dans les télécommunications, tandis que le plastique peut être utilisé à la place du cuivre dans les tuyaux d'évacuation, les accessoires de plomberie et les conduites d'eau. Le titane et l'acier sont aussi des alternatives dans les échangeurs de chaleur. L'Institut de recherche sur le développement durable de Schneider Electric conclut que le secteur des bâtiments présente les possibilités les plus prometteuses de réduction de la demande. Une réduction de 20 % de l'utilisation du cuivre dans les bâtiments pourrait faire baisser la demande annuelle totale de cuivre de 5,4 % d'ici 2050 (T.A. Kwan, 2025).

Schéma 3 : Augmentation prévue de la demande annuelle de cuivre affiné entre 2020 et 2050



Source : « Copper, the Pathway to Net Zero ». International Copper Association 2023

Pour la plupart des utilisations dans un monde de plus en plus électrifié, l'aluminium est le principal substitut du cuivre. Si l'aluminium est un conducteur moins efficace – sa conductivité par mètre n'est que de 61 % de celle du cuivre –, il est aussi trois fois plus léger. À conductivité égale, un câble en aluminium doit avoir une section 1,5 à 2 fois plus grande qu'un câble en cuivre, mais il pèsera moins lourd. L'aluminium est déjà utilisé couramment pour les lignes aériennes à haute tension et les câbles de grande section, mais cette substituabilité a des limites, en particulier pour les applications nécessitant des sections compactes.

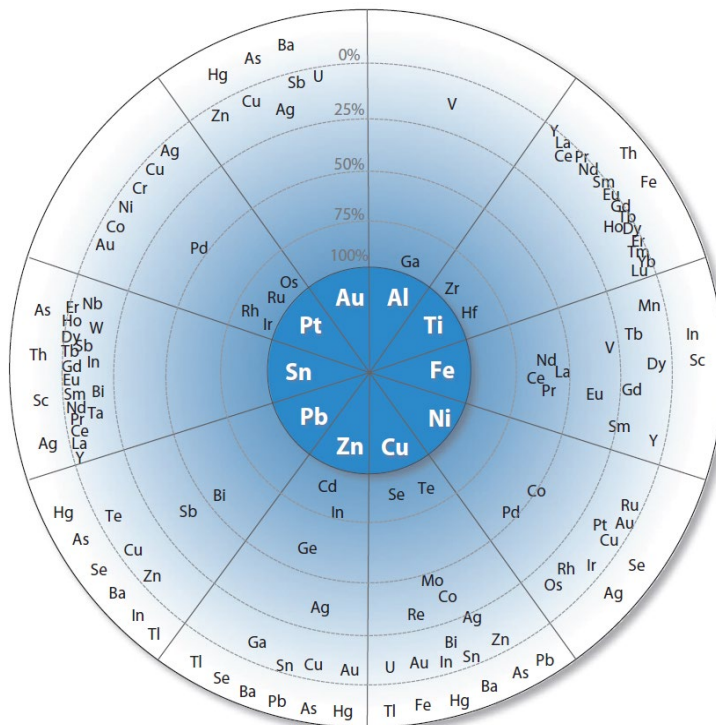
Sur les 27 Mt de cuivre consommées en 2023, un tiers provient de la « production secondaire », c'est-à-dire du recyclage. Le cuivre peut être recyclé à plusieurs reprises sans perte de performance et il n'y a pas de différence de qualité entre les productions primaire et secondaire. Certaines nouvelles possibilités de substitution pourraient générer des quantités importantes de cuivre à recycler, mais l'augmentation rapide de la demande globale suggère que la part de la production secondaire n'augmentera pas avant que la demande ne stagne, lorsque la majeure partie de la transition énergétique sera réalisée, idéalement au cours de la seconde moitié du siècle. Pourtant, le recyclage du cuivre va augmenter, notamment en raison du remplacement des lignes électriques, de la plomberie et des câbles de télécommunications vieillissants.

Métaux co-récupérés

De nombreux métaux sont des coproduits ou des sous-produits de ce que l'on appelle les « métaux hôtes », un phénomène que certains auteurs qualifient de « compagnonnage ». Ce phénomène présente un aspect positif : les besoins en énergie et en eau, ainsi que les incidences sur l'environnement, peuvent être moindres. Le revers de la médaille est que la disponibilité des métaux co-récupérés dépend de l'exploitation des métaux hôtes.

Les coproduits sont représentés dans le schéma 4 dans le cercle extérieur, avec des distances proportionnelles au pourcentage de leur production primaire dérivée du métal hôte indiqué. Comme le montre le schéma, les mines de cuivre (Cu) produisent la plupart du sélénium (Se) et du tellure (Te), ainsi que des fractions significatives de molybdène (Mo), de cobalt (Co), de rhénium (Re), d'argent (Ag), d'or (Au) et d'autres métaux. Bien que l'argent possède des gisements suffisamment riches pour être exploités directement, 71 % de la production totale d'argent provient de mines de zinc, de plomb, de cuivre ou d'or. Le cobalt est un exemple notable : il n'existe qu'une seule véritable mine de cobalt dans le monde, située au Maroc. Ailleurs, le cobalt est un sous-produit des mines de cuivre et de nickel.

Schéma 4 : La roue du compagnonnage métallique



Source : N. Nassar, T.E. Graedel et E.M.Harper, 2015

Ce document se concentre sur le cuivre, le premier métal travaillé par l'homme avec l'or, le plus utilisé dans la transition énergétique et celui dont l'approvisionnement suscite le plus d'inquiétudes dans les cercles politiques et économiques sérieux. Il vise à examiner comment les changements technologiques dans les opérations minières peuvent avoir un impact sur la production future et les niveaux de réserves, et ainsi changer la perspective sur ce métal important.

La formation et l'exploitation des gisements de cuivre

Cette section explique brièvement comment se forme un gisement de cuivre, comment il est exploité et comment les métaux sont récupérés à partir du minerai.

La formation des gisements minéraux

Un gisement de minerai est une partie de la croûte terrestre où des métaux ou des matériaux vitaux pour la société sont concentrés à des niveaux nettement supérieurs à la normale. Ces concentrations résultent de processus géologiques naturels, tels que le magmatisme, la sédimentation, l'altération ou la circulation de fluides hydriques, qui sont soit perturbés, soit intensifiés pour créer des accumulations de minéraux de valeur économiquement exploitables.

Les teneurs en minerai, c'est-à-dire la concentration de minéraux ou de métaux utiles, varient considérablement. Pour les métaux abondants dans l'écorce terrestre, comme le fer ou l'aluminium, les teneurs en minerai varient généralement entre 20 % et 60 %. En revanche, un certain nombre d'autres métaux utilisés par l'industrie, comme le cuivre, le nickel ou le zinc, ne se trouvent qu'en faibles concentrations (de l'ordre de quelques pourcents), tandis que les métaux précieux comme l'or ou le platine ne sont présents qu'à l'échelle de parties par millions. Il existe une relation directe entre la teneur du minerai et son prix : le fer se vend à environ 200-400 dollars la tonne, le cuivre à environ 9 dollars le kilo et l'or à environ 90 dollars le gramme.

Types et répartition des gisements de cuivre

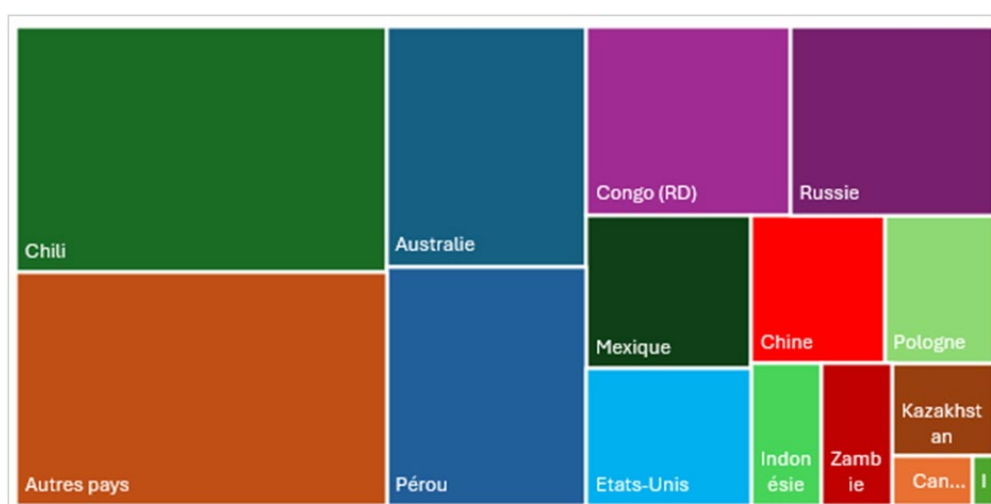
Nous ne fournissons ici qu'une brève description des principaux types de gisements de cuivre. Pour plus de détails, le lecteur est invité à consulter le « Commodity Profile » du British Geological Survey ou les textes standards de géologie économique (par exemple L. Robb, 2004)

Contrairement à d'autres matières premières pour lesquelles quelques grands gisements dominent le marché mondial, les gisements de cuivre sont présents dans le monde entier. Presque tous les pays possèdent des gisements et, sauf lorsque des pressions politiques ou sociétales empêchent l'exploitation minière, ces gisements sont exploités. C'est principalement

pour cette raison que le cuivre est absent de la plupart des listes de métaux critiques

Néanmoins, les sources les plus importantes de cuivre se limitent à deux régions principales, chacune ayant un type de gisement particulier. Les plus importants sont les gisements porphyriques qui se trouvent dans les régions orogéniques où une plaque tectonique plonge sous la croûte océanique ou continentale. C'est là que se trouvent les principales sources de cuivre, le long des marges occidentales de l'Amérique du Sud et de l'Amérique du Nord, sur les îles du Pacifique comme les Philippines ou la Papouasie-Nouvelle-Guinée, et dans certaines parties de l'Europe de l'Est et de l'Asie centrale. Le schéma 5 montre la répartition par pays et illustre l'importance majeure du Chili.

Schéma 5 : Répartition par pays des réserves mondiales de cuivre



Source : « Mineral Commodities Summary 2025 », USGS, 2025

Un gisement de cuivre porphyrique est un vaste gisement de minerai à teneur faible ou moyenne formé à partir de fluides hydrothermaux associés à des intrusions granitiques. Les minéraux du minerai, généralement des sulfures de cuivre tels que la chalcoppyrite et la bornite, sont disséminés dans les plutons granitiques et dans les roches murales altérées environnantes. Ces zones d'altération sont dispersées autour des plutons centraux et sont composées de minéraux hydrothermaux tels que des argiles et d'autres phyllosilicates, du quartz et des feldspaths. On pense que ces gisements se forment lorsque du magma felsique pénètre dans la croûte supérieure et libère des fluides hydrothermaux à mesure que la pression diminue et que le magma se solidifie. Ces fluides transportent les métaux du minerai et, en circulant à travers les fractures et les failles, déposent les sulfures de cuivre et d'autres métaux.

L'autre source majeure est la ceinture de cuivre africaine, qui s'étend de la République démocratique du Congo au centre de la Zambie. Ces gisements, qualifiés de « sédimentaires » ou « stratiformes », sont

constitués de sulfures de Cu-Fe disséminés dans des grès, des schistes et des calcaires. Le minerai contient également des teneurs importantes en cobalt et constitue la principale source mondiale de ce métal. Le cuivre est souvent présent sous forme d'oxydes tels que la malachite et l'azurite dans les zones altérées près de la surface et sous forme de sulfures plus profondément dans le gisement (par exemple, chalcopryrite, bornite). On pense qu'ils se forment lorsque des solutions oxydées contenant du cuivre migrent à travers les couches de sédiments et précipitent lorsque les conditions changent (par exemple, une baisse du pH ou la présence de sulfures).

Exploitation minière et traitement des minerais

La possibilité d'exploiter un gisement de minerai dépend de nombreux facteurs, notamment de son emplacement, de la profondeur et de la géométrie du corps minéralisé, du type de minerai, des coûts d'exploitation locaux et de considérations politiques ou sociales. Toutefois, les facteurs les plus importants sont la teneur en minerai et le prix du métal. À mesure que les prix des métaux augmentent, les gisements à faible teneur en minerai deviennent économiquement viables pour l'exploitation minière. Cette dépendance à l'égard des prix influencera considérablement l'offre future de métaux, car les gisements riches et facilement accessibles deviennent de plus en plus rares.

Au cours des dernières décennies, la prospection minière a probablement permis d'identifier la plupart des gisements de minerai proches de la surface, en particulier dans des régions comme l'Australie, le Canada, le Chili, la Scandinavie et les États-Unis, où les technologies modernes de prospection sont largement utilisées. À l'avenir, les efforts d'exploration se concentreront donc sur la découverte de gisements dans des régions sous-explorées, telles que de grandes parties de l'Afrique et de l'Asie, et de nombreuses parties de l'Europe, où les méthodes modernes n'ont pas encore été appliquées.

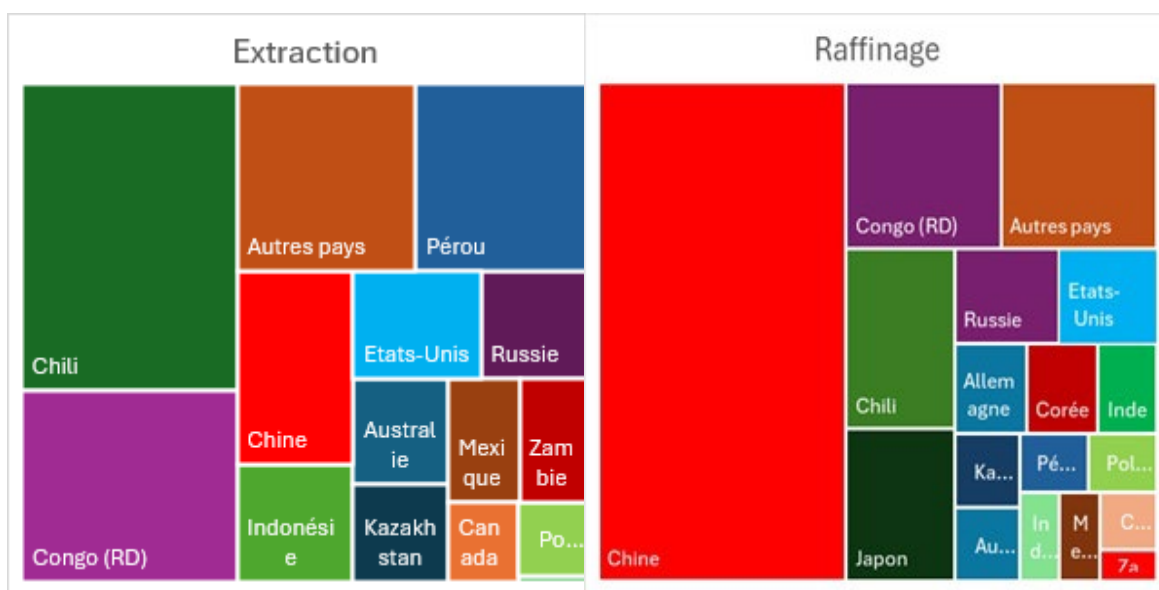
Au cours des dernières décennies, l'extraction du cuivre s'est faite principalement dans de grandes mines à ciel ouvert. C'est le cas de certaines des plus grandes mines du monde, comme Bingham Canyon aux États-Unis et Chiquicamata au Chili, qui exploitent toutes deux des gisements de cuivre porphyrique. D'autres gisements porphyriques plus profonds sont exploités dans des mines souterraines à l'aide de méthodes innovantes d'extraction par blocs, comme Grasberg en Indonésie et Cadia en Australie. Dans certains cas – Grasberg et Chiquicamata – l'exploitation a commencé dans une mine à ciel ouvert, puis a progressé vers une mine souterraine pour exploiter le minerai situé bien en dessous de la surface.

Les minerais sulfurés sont d'abord concassés et broyés en fines particules avant d'être soumis à la flottation, qui sépare les minéraux contenant du cuivre des stériles, produisant un concentré contenant 20 à 30 % de cuivre, ce qui est nettement plus élevé que le minerai d'origine, qui contient généralement entre 0,3 et 1,7 % de cuivre (avec une moyenne de 0,58 %). Le concentré est séché pour réduire sa teneur en eau et transporté vers des fonderies pour éliminer le soufre, puis vers des raffineries, où il subit un traitement pyrométallurgique pour éliminer les impuretés, suivi d'une électrolyse pour produire du cuivre pur utilisable dans l'industrie. Une part importante des concentrés est expédiée à l'étranger, principalement en Chine, qui importe environ la moitié des expéditions mondiales de concentrés de cuivre.

Les minerais oxydés sont traités par hydrométallurgie, ce qui implique une lixiviation à l'acide sulfurique pour dissoudre le cuivre, suivie d'une extraction par solvant pour purifier et concentrer la solution, et enfin d'une extraction électrolytique pour produire du cuivre de haute pureté. Ce processus est généralement réalisé à proximité des sites miniers, bien que dans certains cas, des produits intermédiaires tels que des précipités ou du cuivre d'une pureté d'environ 85 % soient également expédiés.

Onze pays extraient les trois quarts du cuivre mondial, mais le traitement et le raffinage des minéraux sont concentrés dans un plus petit nombre de pays que l'exploitation minière (schéma 6).

Schéma 6 : Répartition par pays de l'extraction (à gauche) et du raffinage (à droite) du cuivre



Source : « Mineral Commodities Summary 2025 », USGS, 2025.

KGHM, le géant polonais du cuivre - un atout stratégique en Europe

Près de Lubin, au cœur de la riche et très dynamique voïvodie polonaise de Basse-Silésie, se situe l'un des plus grands gisements de cuivre au monde, exploité par KGHM Polska Miedź S.A. (ci-après « KGHM »). La production de cuivre est la huitième plus importante au monde, KGHM exploitant un bassin minier souterrain composé de trois districts (Rudna, Lubin et Polkowice-Sieroszowice), presque deux fois plus grand que Paris. Le site comprend également une usine de concentration et des fonderies, au sein d'un complexe intégré employant près de 19 000 personnes. La teneur moyenne en cuivre du minerai est d'environ 1,5 %. Les opérations minières se déroulent jusqu'à 1 348 mètres de profondeur, avec plus de 30 millions de tonnes de minerai extraites, soit environ 400 000 tonnes de cuivre sous forme de concentré par an. En ajoutant la ferraille et d'autres concentrés, le complexe produit environ 590 000 tonnes de cathodes de cuivre par an, d'une pureté d'environ 99,99 %. La haute qualité des produits est attestée par les certificats délivrés par la Bourse des métaux de Londres, la Bourse des contrats à terme de Shanghai et la Bourse internationale de l'énergie de Shanghai, et garantis par les marques suivantes : HML pour la fonderie « Legnica », HMG-S pour la fonderie « Głogów I » et HMG-B pour la fonderie « Głogów II », sous lesquelles ils sont enregistrés à la Bourse des métaux de Londres en tant que qualité « A ». Près de la moitié des cathodes produites sont transformées par KGHM en fil machine en cuivre, en fil machine en cuivre exempt d'oxygène (contenant également de l'argent) et en granulés. La Pologne n'est pas seulement dotée de très grandes réserves de cuivre : la production minière s'accompagne de sous-produits tels que l'argent métallique (qui fait de KGHM un leader mondial) et, dans une moindre mesure, l'or, le rhénium, le plomb, l'acide sulfurique, le sélénium, le sulfate de cuivre et le sulfate de nickel.

Le complexe consomme environ 2 % de la demande d'électricité et 1 % de la consommation de gaz de la Pologne, et les coûts de l'électricité ont augmenté plus rapidement que les prix mondiaux du cuivre. L'amélioration de la productivité, la réduction de la consommation d'énergie et l'empreinte environnementale, sociale et de gouvernance (ESG) sont des priorités, au même titre que la sécurité, à l'intérieur du complexe, mais aussi autour des grands résidus.

Dernier point, mais non le moindre, l'empreinte ESG des opérations devrait diminuer au fil du temps grâce à la décarbonation progressive du mix électrique polonais (le charbon étant progressivement remplacé par l'éolien, le solaire et, plus tard, le nucléaire, avec le gaz comme solution de secours), et le transport des produits semi-finis ou finis sera progressivement amélioré grâce à la décarbonation de la flotte de camions et du transport maritime.

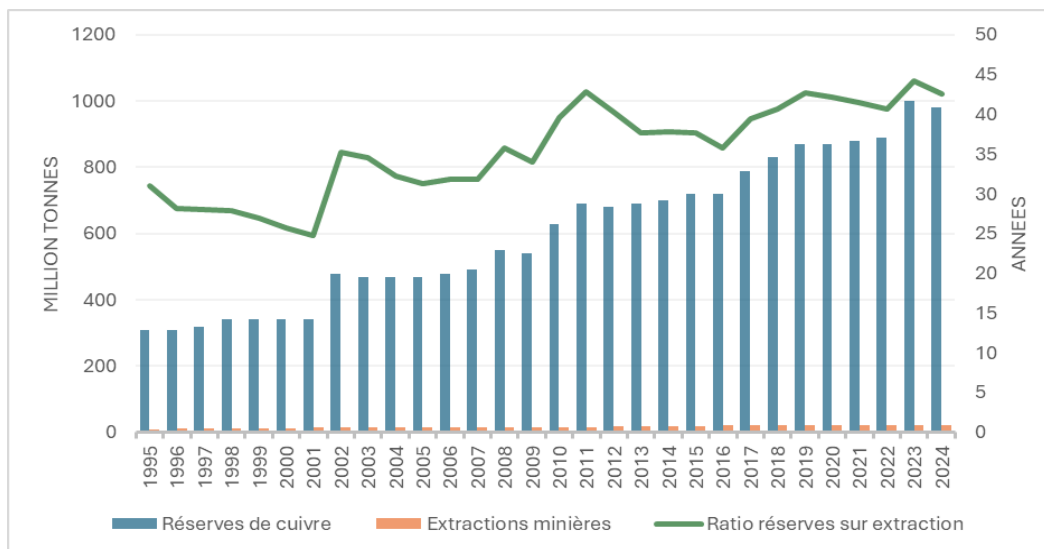
Il est possible de maintenir la production à de tels niveaux pendant des décennies et de remplacer progressivement le gaz naturel dans les fonderies par des produits à plus faible empreinte de méthane. Les coûts de production seront déterminants, dans un environnement fortement taxé, de sorte que la mise en œuvre de grands projets, y compris dans les couches plus profondes où ces coûts sont plus élevés (notamment pour le refroidissement et la ventilation), nécessitera de toute évidence un plan d'investissement à long terme impliquant une coordination étroite avec le gouvernement.

Réserves et ressources

La distinction entre les réserves et les ressources est généralement et à juste titre présentée comme économique : les réserves sont les parties des gisements de minerai qui peuvent être exploitées en utilisant les technologies actuelles aux prix actuels. Les ressources sont des « concentrations de matières minérales naturelles d'intérêt économique dans ou sur la croûte terrestre, sous une forme, une qualité et une quantité telles que l'extraction économique d'un produit minéral est actuellement ou potentiellement réalisable » (USGS 2018). Aucune des deux notions n'est donc purement géologique. Les ressources ne sont pas des réserves, ces dernières devant être confirmées par une personne qualifiée de « compétente », c'est-à-dire un géoscientifique disposant d'une expérience suffisante pour travailler sur le style de minéralisation concerné et qui est membre d'une organisation professionnelle accréditée. C'est important, car les estimations des réserves ont une incidence directe sur la valeur des actifs d'une entreprise, qui à son tour influe sur sa capacité à lever des fonds, que ce soit en contractant des emprunts ou en vendant des actions. Les agences gouvernementales surveillent de près la façon dont ces termes sont appliqués, et les experts et les entreprises chargés d'approuver les réserves de minerai et les estimations connexes peuvent être tenus légalement responsables.

Il est important de reconnaître la nature dynamique des réserves, comme l'illustrent les statistiques suivantes : l'United States Geological Survey (USGS) estime que les réserves mondiales de minerai de cuivre à la fin de 2023 étaient d'environ 1 milliard de tonnes de cuivre métal récupérable (schéma 7). Cela représente un triplement de la valeur de 325 Mt à la fin de 1995, bien que la production soit passée de 10,5 Mt en 1995 à 23 Mt en 2023.

Schéma 7 : Évolution des réserves et de la production de cuivre depuis 1995



La ligne verte représente la durée de vie estimée des réserves, calculée en divisant les réserves connues par la production annuelle.

Source : « *Mineral Commodities Summary 2025* », USGS, 2025.

Les réserves dépendent du prix du métal, augmentant à mesure que le prix augmente, ce qui permet d'exploiter des gisements à plus faible teneur, ou diminuant lentement à mesure que le prix baisse. Le prix d'une tonne de cuivre a évolué autour de 2 000 dollars dans les années 1990. Il est passé à 6 000 dollars à la fin des années 2000 et oscille actuellement entre 8 000 et 11 000 dollars, soit un quadruplement en termes courants et un doublement approximatif en monnaie constante, une fois l'inflation du dollar prise en compte.

À l'échelle d'une mine individuelle, les réserves diminuent au fur et à mesure que le minerai est extrait et augmentent lorsque le forage et d'autres méthodes d'exploration démontrent que davantage de minerai est disponible. Il s'agit généralement d'une transformation des ressources en réserves. Les estimations des réserves augmentent lorsque les améliorations technologiques rendent l'extraction et le traitement du minerai plus efficaces. La même dynamique s'applique à l'échelle mondiale, ce qui explique pourquoi, malgré une production constante et croissante, les réserves mondiales de cuivre et de la plupart des autres métaux sont restées constantes ou ont même augmenté.

Les estimations des ressources en cuivre sont beaucoup plus importantes. L'USGS (2025) indique que les ressources identifiées contiennent 1,5 milliard de tonnes de cuivre non extraites et que les ressources non découvertes contiennent environ 3,5 milliards de tonnes de cuivre. Les ressources estimées par l'USGS (2025) sont limitées aux gisements situés à moins de 1 km de la surface pour les gisements porphyriques et jusqu'à 2,5 km de la surface pour les gisements stratiformes encaissés dans les sédiments, sur la base des limites pratiques

actuelles des techniques d'exploitation minière conventionnelles. Comme nous le verrons dans la dernière partie, si les améliorations techniques des méthodes d'exploration et d'exploitation augmentaient ces limites, les estimations de ressources seraient plus importantes.

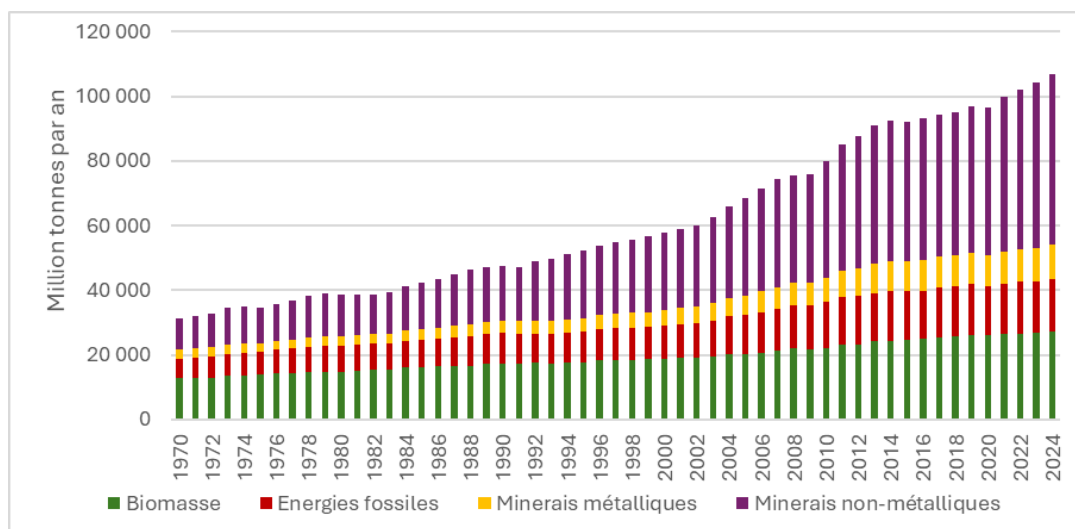
Les conditions environnementales de l'extraction des métaux

Cette section examine d'abord l'extraction des métaux dans le contexte plus large de l'extraction des ressources mondiales, puis explore l'évolution de sa demande d'énergie et des émissions de GES associées, sa consommation d'eau et sa production de déchets, et enfin son impact sur la biodiversité.

Extraction de métaux et extraction totale

Trop souvent, les impacts environnementaux de l'ensemble de la production de ressources sont attribués à l'exploitation minière, mais l'extraction des métaux n'est qu'un sous-ensemble de l'extraction des ressources mondiales. Selon la base de données des flux mondiaux de matières du Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), près de 106 milliards de tonnes de matières ont été extraites en 2024. Comme le montre le schéma 8, les minéraux non métalliques (calcaire pour le ciment, gravier, etc.) représentent la moitié de cette masse, la biomasse (sylviculture, agriculture) un quart et les combustibles fossiles (presque exclusivement du charbon) 15 %. Les mines de métaux ne représentent que 10 % du total.

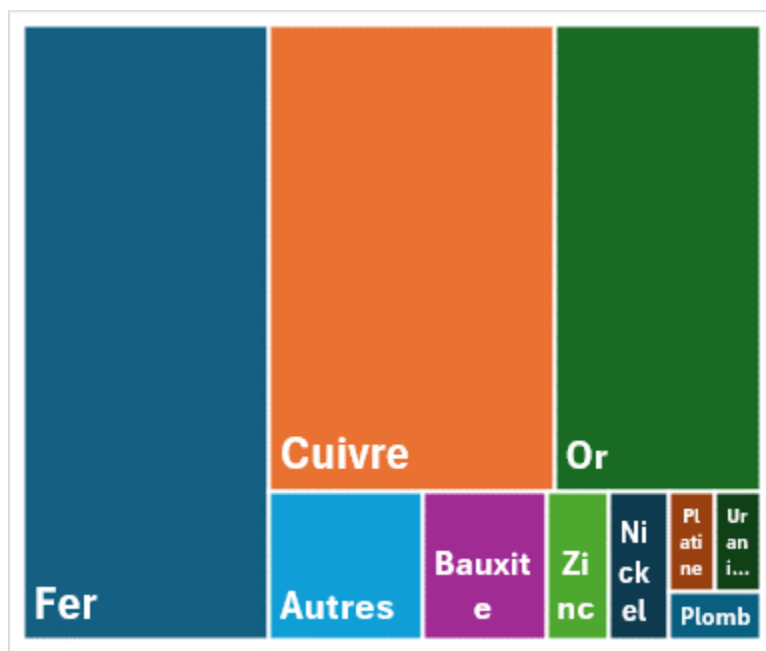
Schéma 8 : Extraction mondiale de ressources de 1970 à 2024 (Mt)



Source : « base de données sur les flux de matières dans le monde », PNUE, 2025.

Sur les 10,6 milliards de tonnes de minerais extraits, le fer et l'or représentent plus de 50 % (schéma 9). En 2021, le cuivre contribua à hauteur de 29 %, la bauxite (4,2 %, pour l'aluminium), le zinc (2,3 %), le nickel (1,9 %). Les autres métaux représentent environ 5 %.

Schéma 9 : Tonnages relatifs de minerais et de concentrés par métal en 2021



Source : « Raw Material Profiles for Metal Ores », Wirtschaftsuniversität (WU) Vienne, 2023

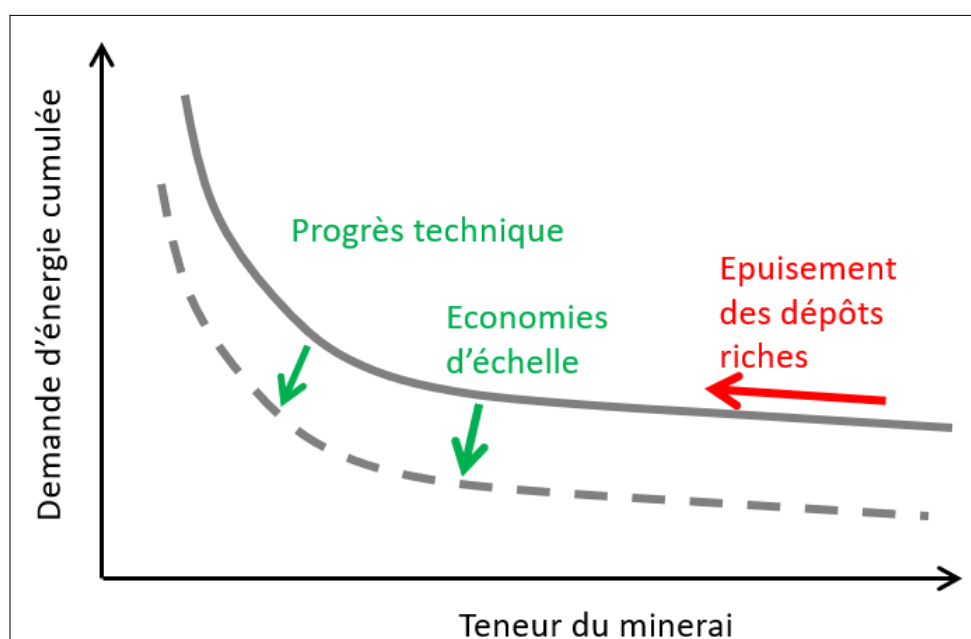
Énergie et gaz à effet de serre

Au cours des vingt dernières années, l'énergie consommée lors de la production de métaux et de tous les minéraux a presque doublé. Feix et Hache (2025) citent deux facteurs principaux : l'utilisation généralisée de technologies moins efficaces sur le plan énergétique pour la production de fer et d'acier dans les pays émergents comme la Chine, et la baisse des teneurs en minerai. Un examen plus approfondi révèle que le premier facteur l'emporte de loin sur le second. La production de fer et d'acier représente la majeure partie de la consommation d'énergie et des émissions de GES, générant plus de 3,7 milliards de tonnes d'équivalent CO₂ par an, contre 97 millions de tonnes d'équivalent CO₂ pour l'extraction et le raffinage du cuivre, même si les tonnages totaux de minerais de cuivre et de fer extraits annuellement sont comparables. Les émissions provenant de l'extraction du cuivre ne représentent qu'une petite fraction (~5 %) des émissions associées à l'extraction et au raffinage du fer, et ne contribuent que pour 1,5 % à la consommation totale d'énergie de l'industrie métallurgique.

Néanmoins, la consommation d'énergie de l'exploitation minière augmente à mesure que la teneur en minerai diminue, toutes choses étant

égales par ailleurs. En outre, la réduction de la teneur en minerai coïncide souvent avec une réduction de la taille des grains métalliques du minerai, et les minerais à faible teneur doivent donc être broyés plus finement (Michaux, 2021). Lorsque la teneur en minerai se rapproche de zéro, l'énergie requise tend vers l'infini, mais les coûts d'extraction et de traitement du minerai à faible teneur deviendront prohibitifs avant que cette limite ne soit atteinte. Néanmoins, les améliorations technologiques et les économies d'échelle l'emporteront probablement sur l'effet négatif de la baisse de la teneur en minerai, comme l'illustre le schéma 10. Vidal *et al.* (2022) montrent que l'efficacité moyenne de l'exploitation minière est d'environ 1/3, ce qui laisse une grande marge d'amélioration.

Schéma 10 : Représentation graphique de la relation entre la teneur du minerai et la demande cumulative d'énergie et de l'influence des différents facteurs



Source : Modifié d'après N. Rötzer et M. Schmidt, 2020

En 1930, lorsque la teneur moyenne du minerai était de 1,7 %, la production d'une tonne de cuivre pur (ou « cuivre cathodique ») nécessitait environ 70 gigajoules (GJ). Ce chiffre est tombé à 53 GJ en 1970, bien que la teneur du minerai soit tombée à 1,3 %, principalement en raison de la domination progressive des mines à ciel ouvert sur les mines souterraines et des améliorations apportées aux technologies minières et à la production d'électricité. L'énergie requise a ensuite légèrement augmenté pour atteindre 69 GJ en 2010, principalement en raison d'une nouvelle réduction des teneurs moyennes en minerai à 0,7 %. Ainsi, au cours des 80 dernières années, les améliorations techniques ont permis de maintenir la demande d'énergie par tonne de cuivre pratiquement constante, malgré une forte réduction des teneurs en minerai de 1,7 % à 0,7 % (N.Rötzer et M. Schmidt, 2020).

Parallèlement, la contribution associée aux émissions de GES a diminué, passant de 5,7 à 4,5 t CO₂-eq/t Cu en 2010, et à moins de 4 t aujourd'hui. Certaines des meilleures performances sont atteintes dans des mines à faible teneur en minerai (0,25 %), comme la mine Aitik de Boliden dans le nord de la Suède (Boliden, 2025). Le mouvement d'approvisionnement en énergies renouvelables est pleinement engagé, avec des projets d'énergie solaire et éolienne à grande échelle sur tous les continents. Le Chili ouvre la voie avec 4 500 MW de capacités solaires et éoliennes dédiées à l'exploitation minière, suivi par l'Australie et des pays riches en hydroélectricité comme le Canada ou la Suède. Dans le même temps, l'électrification des gros engins gourmands en carburant et des camions-bennes, qui a débuté vers 2015 par des projets pilotes, s'accélère. Certaines sociétés minières tentent d'économiser du carburant en combinant les générateurs diesel embarqués avec des caténaires et des perches, tandis que d'autres optent pour des camions entièrement électriques ou pour le concassage dans la fosse et des convoyeurs. Par exemple, la société minière australienne Fortescue a récemment commandé à Liebherr 360 camions-bennes autonomes à batterie électrique, ainsi que 60 bulldozers et 55 excavateurs. L'électrification des camions-bennes, la plus grande source d'émissions de CO₂ dans l'industrie minière, est rentable lorsque l'électricité peut être achetée à prix relativement bas. En particulier si cette énergie provient de sources renouvelables, elle a un coût négatif par tonne de CO₂ émis (Legge *et al.*, 2021).

L'extraction et le raffinage du cuivre dans le monde sont actuellement responsables de 97 Mt d'équivalent CO₂ par an. Sur ce total, 70 % proviennent de l'exploitation minière, 23 % de la fonte et de l'affinage et les 7 % restants du transport en amont et en aval et du traitement en fin de vie des produits vendus (ICA, 2023). Doubler la production de cuivre augmenterait les émissions d'une quantité comparable, pour atteindre un total de ~195 Mt CO₂-eq si rien ne change. Mais la réduction future des émissions de GES par tonne de cuivre l'emportera très probablement sur l'augmentation possible due à la réduction des teneurs moyennes en minerai à 0,53 %. Les émissions de GES provenant de l'extraction et du raffinage du cuivre devraient, dans le pire des cas, rester pratiquement constantes jusqu'en 2050 au moins, étant donné l'abondance des réserves ayant cette teneur moyenne (voir la dernière partie).

Le paradoxe du cuivre est que nous devons extraire et raffiner toujours plus de ce métal à court et à moyen terme pour mettre en œuvre des technologies qui réduiront considérablement les émissions dans d'autres secteurs. L'augmentation temporaire des émissions due à la production de cuivre sera largement compensée par les réductions d'émissions qu'elle permettra dans d'autres applications.

Eau et déchets

La réduction de la teneur moyenne en minerai et l'augmentation de l'exploitation à ciel ouvert par rapport à l'exploitation souterraine ont un impact direct sur le volume des stériles et des résidus produits par les processus d'extraction et de concentration. Ceux-ci peuvent constituer des sources majeures de pollution du sol et de l'eau. Environ 23 millions de personnes, 6 millions de têtes de bétail et 66 000 km² de terres irriguées sont directement exposés à des concentrations dangereuses de déchets toxiques qui s'accumulent dans les systèmes fluviaux en raison de l'activité minière (Macklin *et al.*, 2023). L'exploitation minière artisanale et à petite échelle a un impact environnemental disproportionné, car elle ne contribue qu'à 15-20 % de la production de métaux tels que l'or ou le cobalt, mais dégrade les environnements locaux, tout en étant associée à des technologies et des pratiques très polluantes, telles que la fusion et l'affinage non contrôlés, l'utilisation de mercure et de cyanure et l'élimination inappropriée des déchets (de Haes et Lucas, 2024).

L'exploitation minière est souvent présentée comme une grande consommatrice d'eau. L'extraction du cuivre nécessite entre 50 et 100 litres d'eau par kilogramme de cuivre, utilisés pour le dépoussiérage, la flottation, la lixiviation et d'autres applications. Toutefois, ces chiffres doivent être mis en perspective avec la demande en eau d'autres activités, telles que l'agriculture, la production textile ou la production d'électricité à partir de combustibles fossiles. Pour la viande bovine, on cite souvent le chiffre de 15 000 litres par kilo. Cependant, l'Institut français de la recherche agronomique et de l'environnement (INRAE) explique que la majeure partie de l'eau utilisée dans la production de viande bovine n'est pas extraite du cycle de l'eau : 95 % sont des « eaux vertes », c'est-à-dire des eaux de pluie qui s'infiltrent dans le sol et sont stockées dans la zone racinaire, où elles sont directement utilisées par les plantes. L'eau « bleue » – les eaux de surface (rivières, lacs, réservoirs) et les eaux souterraines (aquifères) qui peuvent être extraites pour l'irrigation, l'utilisation industrielle et la consommation domestique – ne représente que 3 à 4 %. L'eau « grise » – les eaux usées des ménages et des industries qui ont été utilisées mais ne sont pas fortement contaminées et peuvent souvent être traitées et réutilisées pour l'irrigation ou à d'autres fins non potables – représente 1 %. Pour le bœuf, les eaux bleues et grises ne représentent que 550 à 700 litres d'eau par kilo (INRAE, 2019). Un autre concept important est celui de « l'eau utile », qui fait référence à la quantité d'eau utilisée et non retournée à sa source d'origine au cours d'un processus, ce qui la rend indisponible pour une réutilisation immédiate dans le même bassin versant. Les chiffres de plus de 15 000 litres d'eau par kilogramme de chocolat ou de grains de café n'ont pas non plus de sens en l'absence de contextes

locaux. La consommation d'eau bleue et grise par l'industrie textile est peut-être plus révélatrice : 700 à 1 500 litres pour une seule paire de jeans de 600 g, soit plus de dix fois la consommation d'eau du cuivre.

Globalement, comparée à d'autres secteurs, l'exploitation minière représente une proportion relativement faible (~0,1 %) de l'utilisation totale de l'eau (de Haes et Lucas, 2024). Néanmoins, la pénurie d'eau est un défi majeur pour la production de cuivre, en particulier dans les régions arides où se trouvent la plupart des grandes mines. La forte demande en eau de l'industrie, combinée à la concurrence de l'agriculture et des besoins urbains, fait de la gestion de l'eau une question cruciale de durabilité. À mesure que les teneurs en minerai diminuent et que les mines s'approfondissent, les besoins en eau augmentent, ce qui intensifie les conflits avec les communautés et les industries locales. Le changement climatique complique encore le problème, en modifiant la disponibilité de l'eau dans des régions minières clés comme les Andes, où l'approvisionnement pourrait diminuer de 30 % d'ici la fin du siècle.

Le Chili, premier producteur mondial de cuivre, est un exemple de ce défi. Son désert d'Atacama, l'un des endroits les plus secs de la planète, abrite des mines très productives, mais est confronté à une pénurie d'eau extrême. La concurrence pour la ressource est féroce : au Chili, le secteur agricole consomme environ 72 % de l'eau douce disponible et le secteur minier environ 4 %. La contribution du secteur minier au produit intérieur brut (PIB) du pays en 2022 était de 13,6 % et les exportations minières représentaient 58 % des exportations totales du pays. À titre de comparaison, l'agriculture et les secteurs connexes ne représentaient que 8,5 % du PIB total et 27 % des exportations chiliennes totales (Global Business Reports, 2022).

Pour relever le défi de la consommation d'eau, l'industrie continue d'innover dans la gestion de l'eau, en explorant le traitement à sec et les fluides alternatifs pendant le traitement des minerais, et en se procurant des sources d'eau supplémentaires. Dans le nord du Chili, 28 usines de dessalement de l'eau de mer sont en fonctionnement ou en cours de construction, fournissant actuellement 8 000 litres d'eau par seconde à plusieurs mines. Ce chiffre passera à 25 000 litres d'ici 2028.

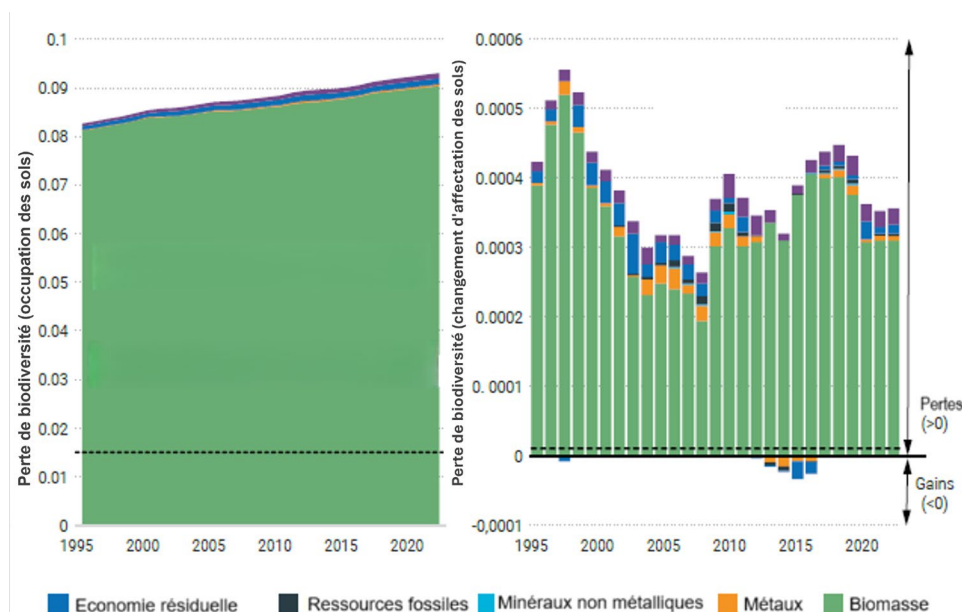
La pénurie d'eau affecte également l'utilisation de l'énergie et les écosystèmes locaux, ce qui nécessite une approche intégrée. Les solutions durables, les avancées technologiques et la collaboration seront essentielles pour équilibrer la demande en cuivre et la responsabilité environnementale et sociale.

Impact sur la biodiversité

Comme pour d'autres questions environnementales, les impacts locaux des opérations d'extraction et de raffinage peuvent être considérables. Cependant, ils ne représentent qu'une petite minorité des impacts globaux. Le schéma 11 montre la répartition de la perte de biodiversité liée à la terre entre les groupes de ressources matérielles (y compris l'agriculture, l'exploitation minière et la transformation) et l'utilisation en aval (utilisation par les ménages et le reste de l'économie, selon le groupe d'experts international sur les ressources du PNUE).

Un exemple éloquent de l'impact perçu de l'exploitation minière sur la biodiversité est fourni par les mines de nickel latéritique en Indonésie. Selon Jong (2024), « un projet massif d'extraction et de traitement du nickel sur l'île indonésienne de Halmahera a déboisé des milliers d'hectares de forêt, déplacé de force les populations locales et pollué les rivières et la mer, dévastant au passage la vie de nombreuses populations autochtones ». L'article rapporte l'expérience des populations locales qui se plaignent que l'entreprise qui exploite le gisement de Weda Bay les a chassées de leurs terres, a dégradé la chasse dans la région et a pollué les rivières locales et les eaux côtières. Bien que nombre de ces rapports soient sans aucun doute véridiques, leur impact total doit être relativisé. Jong (2024) rapporte que 5 331 hectares de forêt ont été déboisés pour l'exploitation minière et les usines de transformation, un chiffre qui peut être facilement vérifié à l'aide des images de Google Earth. Cela semble être une grande surface, un total de 5,3 km², mais la mine est située sur l'île d'Halmahera qui a une superficie de 17 780 km². En d'autres termes, l'exploitation minière n'a affecté qu'environ 0,03 % de la forêt de l'île. Une autre mine, plus petite, située dans le sud de l'île, y contribue également pour une petite part. En comparaison, la zone utilisée pour l'agriculture (principalement les noix de coco, les clous de girofle et l'huile de palme) couvre environ 6 % de l'île, soit 1 060 km². Les forêts des 93 % restants de l'île ne sont pratiquement pas touchées.

Schéma 11 : Impacts de diverses activités humaines sur la perte de biodiversité par l'occupation des sols (à gauche) et le changement d'affectation des sols (à droite)



Source : Bruyninckx et al. « Global Resources Outlook 2024 ».

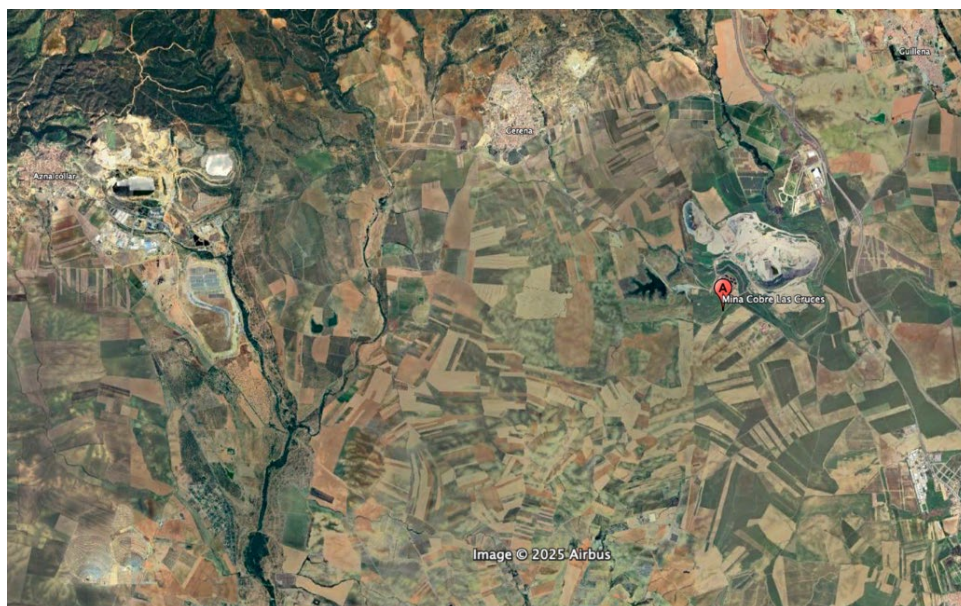
Les eaux de ruissellement des mines de nickel ont pollué les rivières locales et les eaux côtières. Le principal polluant est le sol latéritique usagé qui ne contient que de faibles concentrations de métaux lourds toxiques ou de sulfures qui augmentent l'acidité. Cependant, les sédiments en suspension limitent la pénétration de la lumière du soleil et ont un impact sur la faune locale (poissons et coraux). Mais là encore, ces impacts doivent être relativisés. La baie de Weda, où se trouve le gisement, est une vaste anse ouverte où la pollution due à l'exploitation minière affecte quelques centaines de kilomètres de côtes, ne représentant qu'une infime partie du littoral de l'île d'Halmahera.

La plupart des grandes mines de cuivre sont situées dans des régions peu peuplées, généralement arides, où la concurrence entre l'exploitation minière et l'agriculture ou les régions sensibles sur le plan de la biodiversité est relativement faible. Par exemple, la région d'Atacama, dans le nord du Chili, abrite de nombreuses grandes mines de cuivre qui contribuent à faire du pays la première source mondiale de ce métal. Chiquicamata, l'une des plus grandes mines du monde, s'étend sur une zone de près de 400 km², tandis que des mines plus petites telles que Mantoverde, Las Bronces ou Candelaria couvrent 30 à 40 km². Une estimation approximative de la superficie occupée par toutes les mines de la région pourrait s'élever à 800 km², à laquelle on pourrait ajouter une superficie similaire pour les infrastructures liées aux mines. Cela représente moins de 2 % des 75 176 km² de la région d'Atacama.

La région d'Andalousie, dans le sud de l'Espagne, est une zone où les mines de cuivre cohabitent avec l'agriculture. Le schéma 12 montre la mine

de Las Cruces en activité à droite et la mine de Los Frailes, aujourd'hui disparue, à gauche, entourées d'une zone beaucoup plus vaste couverte de champs de blé et de vergers.

Schéma 12 : Image d'une partie de l'Andalousie, dans le sud de l'Espagne, où l'exploitation minière et l'agriculture coexistent



Source : Google Earth.

Il s'agit dans les deux cas de petites mines, couvrant chacune moins de 10 km², et, dans des circonstances normales, leur impact sur l'agriculture et l'environnement locaux est minime. Les deux activités fonctionnent ensemble dans la région depuis l'époque romaine. Cette situation a été bouleversée en 1998 lorsqu'une digue de résidus de la mine de Los Frailes s'est rompue, libérant environ 4 à 5 millions de mètres cubes de résidus acides dans le système fluvial local, causant d'immenses dommages à l'environnement. Le coût total du nettoyage avoisine les 500 millions de dollars. À la suite de cette catastrophe et d'autres ruptures catastrophiques de digues à résidus au Brésil, ou du déversement largement incontrôlé de résidus dans les rivières en aval de la mine de Grasberg en Papouasie, de nouvelles mesures rigoureuses sont mises en place dans les mines du monde entier. Ces mesures comprennent la surveillance continue des digues à résidus à l'aide de diverses techniques géophysiques et de télédétection, ainsi que de nouvelles méthodes plus sûres pour stabiliser les résidus, notamment l'empilage à sec.

Dans de nombreux reportages et articles de revues scientifiques consacrés aux questions climatiques et environnementales, l'impact de l'exploitation minière est décrit en termes très clairs : « Les abondantes réserves de nickel de l'Indonésie sont cruciales pour un monde à faible émission de carbone. Mais leur extraction ruine la vie des populations

locales et provoque une déforestation galopante. » Il est difficile de trouver des rapports plus nuancés. Lo *et al.* (2024) ont comparé les impacts positifs et négatifs de l'exploitation minière et ont conclu que la diminution du « bien-être environnemental » l'emportait sur l'amélioration des avantages économiques et sociaux dans de nombreuses localités. Michel (2024) fournit des informations détaillées sur la contribution de l'exploitation minière à l'économie indonésienne (près de 10 % du PIB et 30 % des exportations). Ce dernier rapport souligne également qu'une grande partie de l'impact environnemental de l'exploitation minière et de la transformation provient de l'utilisation du charbon ; des mesures sont prises pour le remplacer par des sources d'énergie renouvelables.

Environ un tiers des volumes mondiaux de résidus miniers provient de l'extraction du cuivre. Le drainage minier acide constitue un grave problème environnemental : l'exposition des sulfures à l'oxygène et à l'eau forme un liquide acide et toxique qui finit par contaminer les eaux de surface et souterraines.

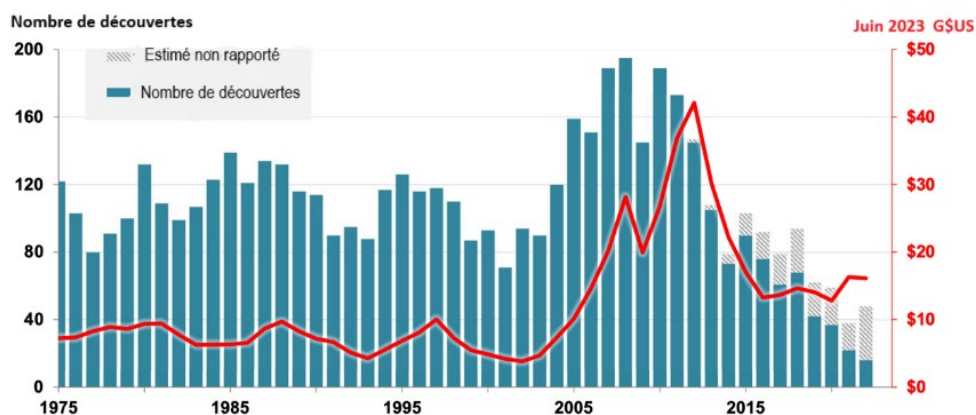
Dans ce contexte, l'amélioration systématique des opérations minières, l'ouverture et la prise en compte des communautés locales sont et resteront primordiales pour l'obtention du permis social d'exploitation et, de plus en plus, pour l'accès au financement et aux marchés. Il existe des normes strictes qui doivent être soigneusement mises en œuvre, telles que l'Initiative pour une assurance minière responsable.

L'avenir de l'exploitation minière et le pouvoir de la technologie

D'après les estimations faites dans les sections précédentes, la demande annuelle de cuivre doublera d'ici 2050. Une façon intéressante d'exprimer cette demande est d'affirmer qu'un nouveau gisement majeur doit être découvert tous les 1 à 3 ans, en fonction de l'ampleur de la demande future (par exemple, Cathles et Simon, 2024). Cette affirmation va à l'encontre de données récentes qui montrent qu'en dépit d'une forte augmentation des dépenses d'exploration minière, le nombre de nouvelles découvertes de gisements de tous les métaux a diminué (schéma 13). Où trouverons-nous donc ces nouvelles sources de cuivre ?

Schéma 13 : Évolution des budgets mondiaux d'exploration minérale et du nombre de nouvelles découvertes de gisements de métaux

Dépenses d'exploration et nombre de découvertes
Monde : 1975-2022



Données à partir de 2012 comprenant un ajustement pour les découvertes non rapportées

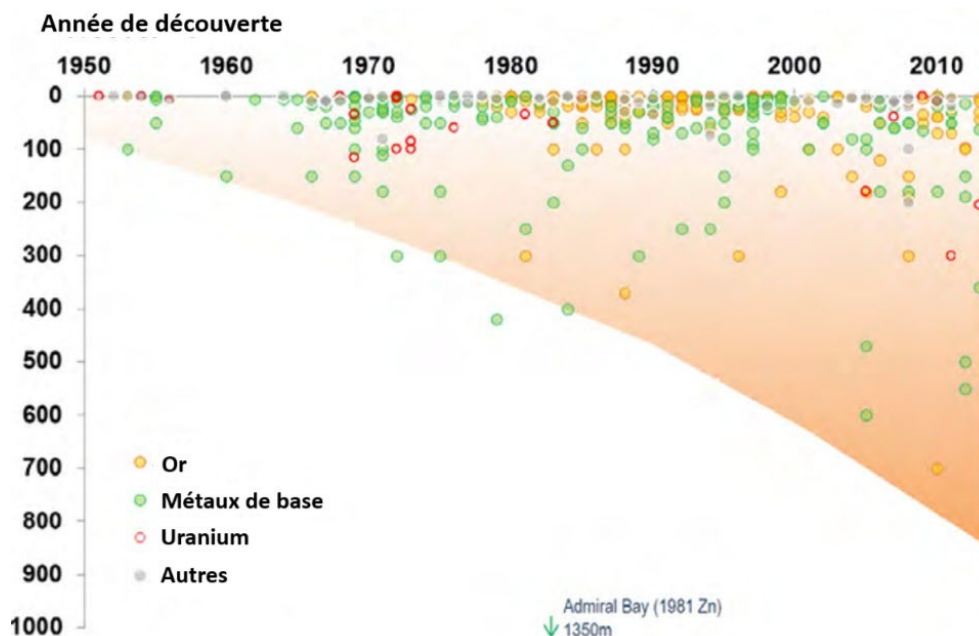
Source : MinEx Consulting, octobre 2023

Source: MinEx Consulting © October 2023

Creuser plus profond ?

L'une des possibilités est de les chercher plus profondément dans la croûte terrestre. Le schéma 14 montre qu'au cours des 70 dernières années, la profondeur des gisements de minerai nouvellement découverts a progressivement augmenté.

Schéma 14 : Évolution de la profondeur des gisements de minerais nouvellement découverts



Source : Nickless et al., 2015.

L'augmentation de la profondeur des découvertes est principalement due à deux facteurs : 1) l'intensification de l'exploration dans la plupart des régions du monde a permis de trouver la majorité des gisements faciles à découvrir près de la surface, et 2) les nouvelles technologies d'exploration, principalement géophysiques, sont désormais capables de détecter des gisements situés bien en dessous de la surface.

Kesler et Wilkinson (2024) ont exploré l'idée que de grandes quantités de cuivre et d'autres métaux restent à découvrir dans les profondeurs de la croûte terrestre. Ils ont supposé une limite d'extraction de 3,3 km dans un avenir proche et ont estimé les ressources en cuivre récupérables à environ 89 milliards de tonnes. Au double du taux d'extraction actuel, ces ressources pourraient soutenir la production mondiale de cuivre pendant plus de 2 000 ans. Une question essentielle se pose toutefois : des gisements aussi profonds pourront-ils un jour être découverts ? La plupart des techniques d'exploration actuelles reposent sur des informations obtenues en surface, suivies de forages. Cela vaut pour toutes les approches géologiques et géochimiques, qui ont joué un rôle déterminant dans la découverte de la plupart des gisements dans le passé. Les méthodes géophysiques peuvent pénétrer plus profondément, mais les méthodes les plus couramment utilisées ne fournissent des informations fiables qu'à des profondeurs de quelques centaines de mètres. Les méthodes magnéto-telluriques, électromagnétiques à haute performance et sismiques fournissent des informations jusqu'à plusieurs kilomètres de profondeur, mais la résolution de ces méthodes se dégrade rapidement avec l'augmentation de la profondeur. Le coût des forages interdit leur

utilisation, sauf lors de l'exploration d'extensions profondes de gisements connus, ou lorsque les méthodes géophysiques ont révélé de fortes anomalies en profondeur.

Étant donné la difficulté de localiser les gisements à la surface ou près de la surface, il est probable que seule une petite fraction des gisements plus profonds sera jamais découverte. En outre, une fois découverts, la possibilité de les exploiter n'est pas garantie. Plus la profondeur augmente, plus le coût de l'exploitation augmente de manière spectaculaire, en raison d'une multitude de facteurs : augmentation de l'énergie nécessaire pour transporter le minerai jusqu'à la surface, augmentation des températures qui doivent être contrôlées par une ventilation coûteuse, augmentation du risque de défaillance structurelle de la mine, et ainsi de suite. C'est pourquoi, pour qu'un gisement profond soit exploité, il doit être plus riche ou plus grand qu'un gisement similaire situé près de la surface.

Une étude des mines profondes en exploitation montre que la grande majorité d'entre elles sont des extensions de gisements situés à la surface - huit des dix mines les plus profondes sont des mines d'or situées près de Johannesburg, en Afrique du Sud, où l'exploitation a progressé depuis la surface il y a plus d'un siècle jusqu'à des profondeurs actuelles de près de 3 km. Il existe très peu d'exemples de gisements profonds isolés qui ne s'étendent pas jusqu'à la surface. Olympic Dam, un très grand et riche gisement multi-éléments en Australie, est une exception car il est recouvert par environ 300 m de strates sédimentaires, et bien que la campagne d'exploration ait été guidée par des principes géologiques solides, la découverte du gisement a été en grande partie accidentelle (Haynes, 2006).

Néanmoins, face à la perspective d'un écart prochain entre l'offre et la demande de cuivre, les sociétés minières cherchent à étendre et à agrandir les mines actuelles, y compris en transformant certaines d'entre elles d'une exploitation à ciel ouvert en une exploitation souterraine. Par exemple, la mine Kidd Creek, au Canada, a commencé ses activités à ciel ouvert en 1966, puis est devenue une mine souterraine en 1972. C'est actuellement la mine de métaux de base la plus profonde du monde, avec une profondeur d'exploitation de près de 3 000 mètres. On sait qu'il existe du minerai supplémentaire à des niveaux plus profonds, mais un projet d'extension de la mine a été mis de côté parce que l'exploitation à plus de trois kilomètres de profondeur s'est avérée difficile d'un point de vue technique et économique. Plus récemment, Codelco a décidé de transformer la plus grande mine à ciel ouvert du monde, Chuquibambilla, en exploitation souterraine afin de maintenir les taux de production et de prolonger la durée de vie de la mine centenaire de plus de 40 ans. La société a présenté son évaluation environnementale en février 2024 et prévoit que la mine atteindra sa capacité en 2030. Elle pourrait utiliser la nouvelle technologie des tunneliers mobiles pour le développement horizontal mécanisé.

S'il est peu probable que les 89 milliards de tonnes de cuivre prévues par Kesler et Wilkinson (2024) soient un jour exploités, l'amélioration des méthodes d'exploration et d'exploitation pourrait probablement permettre aux mines de descendre un peu plus profondément qu'aujourd'hui. Comme par le passé, les réserves et les ressources continueront probablement à augmenter (schéma 7) et à fournir suffisamment de cuivre pour assurer la transition vers les énergies renouvelables. L'opinion populaire selon laquelle les ressources de la terre sont limitées est évidemment correcte, mais l'épuisement n'est pas en vue. En général, il n'y a pas de pénurie d'énergie pour les mines (et des investissements dans la production d'hydroélectricité sont par exemple prévus en RDC pour alimenter les opérations minières, la disponibilité de l'eau dans les réservoirs étant toutefois un défi dans le contexte du changement climatique), et leur empreinte environnementale et leur impact sur l'environnement, y compris les émissions de GES, peuvent être contrôlés, en partie grâce aux nouvelles méthodes discutées ci-dessous.

Enfin, si de nouveaux gisements de métaux tels que le cuivre, le zinc, l'or et le cobalt peuvent encore être découverts en profondeur, l'approche n'est guère applicable aux gisements formés par altération près de la surface de la Terre. Cette dernière catégorie comprend presque tous les gisements d'aluminium et une part importante des gisements de nickel, de lithium, de zirconium/titane et de terres rares. À moins que les gisements de ces types n'aient été recouverts par des roches volcaniques ou sédimentaires plus jeunes, ou enterrés par des processus tectoniques, ils ne seront pas découverts en profondeur.

Améliorations technologiques

Il existe un large éventail d'améliorations techniques susceptibles de réduire les coûts, d'améliorer l'efficacité et de diminuer l'impact sur l'environnement, tant au niveau de l'exploration que de l'exploitation des mines de cuivre. Nombre d'entre elles ont déjà été introduites dans quelques mines, d'autres sont des options pour l'avenir.

- **Électrification et énergies renouvelables.** L'électrification du transport minier est en bonne voie. Elle réduira la consommation d'énergie en éliminant les pertes de Carnot. Couplée au déploiement des énergies renouvelables, désormais soutenues par le stockage en batterie, elle réduira encore davantage les émissions de GES (Li *et al.* 2024).
- **L'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique** révolutionnent l'exploitation minière du cuivre, qu'il s'agisse d'améliorer les méthodes d'exploration ou d'optimiser les processus de production. En ce qui concerne l'exploration, les algorithmes peuvent intégrer des données provenant de sources multiples pour créer des modèles en trois dimensions de gisements de cuivre potentiels. Ils

permettent également d'optimiser divers aspects de la chaîne d'extraction et de traitement, depuis la conduite autonome de flottes de camions de transport jusqu'à l'analyse d'images satellite, en passant par la détection de signes précoces de stress de la végétation ou de changements dans les masses d'eau, ce qui permet une intervention rapide pour prévenir les dommages environnementaux (Kwan, 2024).

- **La lixiviation du sulfure primaire** des stériles pourrait augmenter la production de cuivre de 5 Mt d'ici 2035, transformant ainsi un passif environnemental en opportunité économique (Turner et Reinaud 2024).
- **Lixiviation in situ.** Cette méthode d'extraction minérale laisse la roche mère intacte. Une solution est injectée sous terre pour dissoudre les minéraux cibles, et la solution riche en minéraux qui en résulte est ensuite pompée à la surface pour l'extraction des métaux. Cette approche minimise les perturbations en surface et évite la production de résidus ou de stériles. Pour que la technique soit efficace, le gisement doit être suffisamment perméable pour permettre le mouvement des fluides et se trouver dans un contexte géologique qui empêche la contamination des eaux souterraines. Ce procédé est actuellement utilisé pour extraire l'uranium sur des sites au Kazakhstan, aux États-Unis et en Australie. Il n'a toutefois été que peu utilisé pour l'extraction du cuivre et d'autres métaux, en partie parce que la plupart des corps minéralisés sont peu perméables, ce qui empêche une circulation efficace des fluides. Des expériences récentes menées en laboratoire suggèrent que le cuivre peut être extrait des minerais porphyriques par lixiviation électrocinétique *in situ*. Cette technique implique l'application d'un champ électrique direct ou alternatif à basse tension sur une partie des gisements de minerai, ce qui induit la migration d'un agent de lixiviation qui mobilise les métaux du minerai (Martens *et al.* 2021).
- **Exploitation minière secondaire.** Les résidus miniers offrent des possibilités d'exploitation secondaire, c'est-à-dire d'extraction de métaux précieux à partir de matériaux ou de déchets provenant d'anciennes mines. Les résidus mondiaux contiendraient 100 millions de tonnes de cuivre. Au Chili, la société Amerigo Resources travaille sur cette possibilité depuis 2003 et a récemment augmenté sa production de manière significative. Le tri du minerai à l'aide de capteurs tels que le rayonnement laser, les technologies de broyage plus fin ou l'amélioration des méthodes d'extraction par solvant et d'extraction électrolytique peuvent rendre rentable l'extraction de métaux qui ne l'étaient pas au moment de l'exploitation minière primaire.
- **Exploitation souterraine.** L'évolution vers l'exploitation souterraine, principalement grâce à des méthodes innovantes de foudroyage par

blocs, pourrait réduire le volume des résidus et des stériles, ainsi que la pollution de l'air et l'empreinte surfacique totale.

- **Explosifs verts.** Au Chili, l'entreprise Enaex livre à la société minière Codelco des explosifs à base d'hydrogène bleu, réduisant ainsi d'environ 40 % les émissions de GES associées. Au Pérou, elle utilise un ancien électrolyseur à Cusco pour produire de l'hydrogène vert et de l'ammoniac et livre des "explosifs verts" aux sociétés minières péruviennes. En Suède, la société Hypex Bio produit des explosifs à base de peroxyde d'hydrogène sans nitrate et affirme réduire de plus de 74 % les émissions de GES associées.
- **Courants pulsés.** La transformation (concassage et broyage) absorbe actuellement environ 37 % de l'énergie utilisée pendant l'exploitation minière (Purhamadani et Bagherpour, 2024), et cette proportion augmente au fil du temps à mesure que la teneur du minerai et la taille des particules de cuivre diminuent. Pour accroître l'efficacité du processus, de nouvelles techniques sont mises au point. L'une d'entre elles consiste à utiliser des explosifs à haute performance pour briser le minerai. Les générateurs d'impulsions, une autre technique qui promet de réduire la demande d'électricité jusqu'à 80 %, stockent l'énergie électrique, la compriment dans le temps et l'espace et la délivrent sous la forme d'une impulsion puissante, rapide et courte. Une énergie électrique de faible puissance est ainsi transformée en impulsions très courtes d'une puissance énorme. Au lieu d'exercer une force de compression sur l'extérieur d'une roche jusqu'à ce qu'elle se brise, l'énergie pulsée crée des arcs électriques qui traversent la roche, la font éclater et séparent les grains minéraux individuels.

Conclusion

Il ne fait aucun doute que l'exploitation minière se poursuivra à l'avenir. Elle est nécessaire pour satisfaire la demande croissante d'un large éventail de matières premières, non seulement les fameux métaux critiques mais aussi des métaux plus courants comme le fer et le cuivre, qui seront nécessaires pour construire l'infrastructure de la transition énergétique. Le recyclage jouera un rôle croissant, mais seulement dans quelques décennies, lorsque des stocks suffisants auront été accumulés et que les systèmes de collecte de ce que nous jetons normalement seront devenus efficaces.

Les ressources en cuivre de la planète sont en effet limitées, mais les quantités accessibles semblent plus que suffisantes pour répondre à la demande pendant les décennies, voire les siècles à venir. Les estimations des réserves de cuivre ne sont suffisantes que pour quelques décennies de production, mais il faut reconnaître que les compagnies minières n'ont aucun intérêt à convertir les ressources connues en réserves avant qu'elles ne soient nécessaires. Comme par le passé, la poursuite de l'exploration permettra de trouver des sources de cuivre suffisantes pour répondre à la demande.

Par conséquent, les risques pour la transition énergétique ne sont pas liés à l'épuisement des réserves potentielles de cuivre, mais plutôt aux retards potentiels dans l'exploration et l'exploitation. L'ouverture d'une nouvelle mine est un processus complexe et long qui se heurte souvent à une forte opposition. La majeure partie de l'approvisionnement futur en cuivre proviendra probablement de la prolongation de la durée de vie des mines existantes, par le biais d'expansions horizontales ou verticales, ou d'améliorations des méthodes d'extraction et de traitement.

Dans le même temps, les progrès technologiques devraient réduire la consommation d'énergie spécifique de l'extraction du cuivre et sont susceptibles de diminuer ses émissions globales de gaz à effet de serre, malgré un doublement prévu de la production d'ici 2050. Si le succès de la transition énergétique est loin d'être garanti et se heurte à une résistance considérable, notamment de la part de la Maison-Blanche, l'extraction du cuivre ne sera pas la cause de son échec potentiel.

Références

Agence internationale de l'énergie (AIE) (2021). « The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions », Paris.

AIE (2024). « World Energy Outlook 2024 », Paris.

ARNDT, N. T., FONTBOTE L., HEDENQUIST J.W., KESLER S.E., THOMPSON J.F.H. et WOOD D.G. (2017). « Future Global Mineral Resources », *Geochemical Perspectives*, vol. 6, n° 1.

BOLIDEN (2025). « The World's Most Efficient Open-Pit Copper Mine », disponible sur : www.boliden.com.

BRUYNINCKX *et al* (2024). « Bend the Trend, Global Resources Outlook 2024 », International Resources Panel, Programme des Nations unies pour l'environnement.

CATHLES, L.M. et SIMON A.C. (2024). « Copper Mining and Vehicle Electrification », Forum international de l'énergie.

DE HAES, S. et P. LUCAS (2024). « Environmental Impacts of Extraction and Processing of Raw Materials for the Energy Transition », PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

Energy Transitions Commission (2023). « Material and Resource Requirements for the Energy Transition », juillet.

FEIX, T. ET HACHE E. (2025). « Cumulative Energy Demand and Global Warming Potential of Metals and Minerals Production: Assessment, Projections and Mitigation Options », *Resources Policy*, vol. 102.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2023). « Rapport d'évaluation 6, Rapport de synthèse, Résumé à l'intention des décideurs ».

Global Business Reports (2022). « Chile Mining ».

HACHE, E., BARNET C. et SECK G. (2020). « Le cuivre dans la transition énergétique : un métal essentiel, structurel et géopolitique ! », *Les métaux dans la transition énergétique*, n° 2, IFP Energies nouvelles.

HAYNES, D.W. (2006). « The Olympic Dam Ore Deposit Discovery - A Personal View », *SEG Newsletter*, n° 66.

Institut national de la recherche agronomique et de l'environnement (INRAE) (2019). « Quelques idées fausses sur la viande et l'élevage », disponible sur www.inrae.fr.

International Copper Association (ICA) (2023). « Copper - The Pathway to Net Zero ».

JONG, H. N. (2024). « Indonesian Nickel Project Harms Environment and Human Rights, Report Says », *Mongabay*, 26 février.

KESLER, S.E., et WILKINSON B.H. (2024). « Earth's Copper Resources Estimated from Tectonic Diffusion of Porphyry Copper Deposits », *Geology*, vol. 36, n° 3, p. 255-258.

KWAN, T. A. (2025). « Copper Dynamics and Horizons. Building Sector Mitigation and Electric Vehicle-Driven Growth », Sustainability Research Institute.

LEGGE, H., MÜLLER-FALCKE C., NAUCLER, T. et ÖSTGREN, E. (2021). « Creating the Zero-Carbon Mine », McKinsey & Company, juin.

LO, M. *et al.* (2024). « Nickel Mining Reduced Forest Cover in Indonesia but had Mixed Outcomes for Well-Being », *One Earth*, vol. 7, n° 11, novembre, p. 2019-2033.

MACKLIN, M.G. *et al.* (2023). « Impacts of metal mining on river systems: a global assessment », *Science*, vol. 381, n° 6664, 21 septembre, p. 1345-1350.

MARTENS, E. *et al.* (2021). « Toward a More Sustainable Mining Future with Electrokinetic In Situ Leaching », *Science Advances*.

MICHAUX, S. (2021). « The Mining of Minerals and the Limits to Growth, Open File Work Report, Serial 16/2021 », Geological Survey of Finland, Espoo, Finland.

MICHEL, T (2024). « The Prospects of Indonesia's Nickel Boom Amidst a Systemic Challenge from Coal », *Ifri Papers*, Ifri, mai.

Nickless, E., *et al.* (2015). « Resourcing Future Generations: A Global Effort to Meet The World's Future Needs Head-on », Union internationale des sciences géologiques.

PURHAMADANI, E. et AGHERPOUR R. (2024). « The Role Of Different Explosives In Reducing Energy And Emissions In Mining Comminution For Sustainable Improvement », *Energy*, vol. 310(C).

ROBB, L. (2020). *Introduction to Ore-Forming Processes*, New York, Wiley-Blackwell.

RÖTZER, N. and SCHMIDT M. (2020). « Historical, Current, and Future Energy Demand from Global Copper Production and Its Impact on Climate Change », *Resources*, MDPI, vol. 9, n° 4:442020, 2020.

SECK, G.S., HACHE E., BONNET C., SIMOËN M. et CARCANAGUE S. (2020). « Copper at the Crossroads: Assessment of the Interactions Between Low-Carbon Energy Transition and Supply Limitation », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 163, p. 105072.

Schneider Electric Sustainability Research Institute (2024). « Cuivre 4.0 : Intégrer les pratiques minières vertes, les technologies intelligentes et la collaboration au sein de la chaîne de valeur », septembre.

TURNER, A. et REINAUD J. (2024). « A critical Raw Material Supply-Side Innovation Roadmap for the EU Energy Transition », Systemiq, décembre.

U.S. Geological Survey (2025). « Mineral Commodity Summaries 2025 ».

VIDAL, O. *et al.* (2022). « Modelling the Demand and Access of Mineral Resources in a Changing World », *Sustainability*, MDPI, vol. 14, n° 1:11.

Wirtschaftsuniversität Vienne (2023). « Raw Material Profile for Metal Ores », disponible sur : www.materialflows.net.



27 rue de la Procession 75740 Paris cedex 15 – France

Ifri.org