

# Sciences et génie à la page

Le rôle du Canada dans l'approvisionnement responsable en métaux technologiques

Mai | 2021

La demande en « métaux technologiques », comme le nickel, le cobalt et le lithium, est propulsée par la croissance des technologies de pointe, qui ont le potentiel d'aider le Canada dans sa transition vers une économie à faibles émissions de carbone en contribuant à la production d'énergie renouvelable. Cependant, si les applications de ces métaux sont prometteuses, leur production a été associée à plusieurs défis liés à la sécurisation de leur approvisionnement et à leurs impacts sociaux et environnementaux. Ce document donne un aperçu des possibilités et des défis de l'exploitation minière au Canada et met en évidence la nécessité d'une collaboration intégrée entre le gouvernement, l'industrie et les collectivités pour renforcer le leadership canadien dans l'extraction responsable des métaux technologiques à l'échelle mondiale.

## LES MÉTAUX ET LES MINES AU CANADA

Le secteur des mines et des métaux a joué un rôle important dans le développement du Canada et contribue de façon appréciable à son économie en constituant une grande source d'emplois partout au pays.<sup>1</sup> Le secteur continue d'évoluer et de s'améliorer grâce à des innovations et à des partenariats gouvernementaux, universitaires et avec d'autres secteurs.

L'exploitation minière a également eu des impacts environnementaux, économiques et sociaux associés au rejet de contaminants<sup>2</sup> et à des revendications concurrentes pour les terres. Au Canada, les communautés autochtones ont souvent été les premières exposées au développement minier; ces impacts ont été bien documentés, en particulier pour l'exposition à long terme à la contamination héritée.<sup>3,4</sup> Alors que les sociétés d'exploration et d'exploitation minière recherchent activement la participation des peuples autochtones et à former des accords avec eux, de même que l'approbation d'un large éventail d'intervenants, des améliorations dans ces domaines sont une condition préalable à la réussite du secteur.

Malgré ces défis, les métaux produits par les mines sont une composante essentielle des nouvelles technologies, y compris celles qui nous aideront à affronter les changements climatiques et d'autres réalités. Le secteur canadien des mines a la possibilité de répondre à de nouveaux besoins de la société tout en veillant à maintenir des pratiques soutenables.

## Statistiques sur le secteur minier canadien en 2019<sup>25, 26</sup>

### STATISTIQUES DE 2019 – L'INDUSTRIE MINIÈRE CANADIENNE

Un des cinq principaux producteurs mondiaux pour 17 minéraux et métaux

CONTRIBUTION AU PRODUIT INTÉRIEUR BRUT  
**109** milliards \$

### EMPLOIS

Emplois directs et indirects

**719 000** emplois

Participation autochtone

**16 500** emplois

**60**

minéraux et métaux produits par

### VALEURS DES MINÉRAUX PRODUITS

TOTAL

**48** milliards \$

**200**

mines et

MÉTAUX

**27** milliards \$

**6 500**

sablières, gravières et carrières de pierre

VALEUR DES EXPORTATIONS

**106** milliards \$



Pour développer cette opportunité, les gouvernements et l'industrie doivent intervenir collectivement afin de renforcer le leadership canadien pour une exploitation minière responsable.

**LES MÉTAUX ET LA SOCIÉTÉ : LA DEMANDE ET L'APPROVISIONNEMENT RESPONSABLE**

La demande toujours plus forte des 50 dernières années a entraîné une croissance exponentielle des marchés des métaux. La nouvelle hausse récente est attribuable aux besoins de métaux technologiques, et cette demande continuera d'augmenter pendant encore au moins 30 ans.<sup>5,6</sup>

Il existe un lien direct entre la demande de métaux et la transition énergétique ainsi que notre monde de technologies connectées. Produire de l'énergie avec des éoliennes ou des panneaux solaires nécessite d'importantes quantités de cuivre et de fer, ainsi que d'autres éléments courants comme l'aluminium, le zinc, le silicone et le molybdène. Ces technologies utilisent également des matériaux plus difficiles à obtenir tels que le lithium,

4x

**Les véhicules électriques nécessitent trois à quatre fois plus de cuivre que les véhicules conventionnels, et leurs batteries sont gourmandes en minéraux pour la plupart considérés comme critiques comme le lithium, le nickel, le cobalt, le graphite et des métaux de terres rares (voir ci-dessous).<sup>7,8</sup>**

le cobalt, les métaux des terres rares, le cadmium, le phosphore, le tellure, le béryllium, le germanium, l'indium, le gallium, le sélénium et l'argent. Les véhicules électriques nécessitent trois à quatre fois plus de cuivre que les véhicules conventionnels, et leurs batteries sont gourmandes en minéraux pour la plupart considérés comme critiques comme le lithium, le nickel, le cobalt, le graphite et des métaux de terres rares (voir ci-dessous).<sup>7,8</sup> Le stockage dans des batteries sert également à stabiliser la production intermittente d'énergie renouvelable, à optimiser les « réseaux intelligents » et à assurer la conservation des données sur Internet.

Certains des métaux et minéraux technologiques les plus importants, comme le graphite, sont qualifiés de « métaux critiques » ou de « minéraux critiques » et sont globalement rares et fournis par un nombre limité de producteurs. Cela pourrait entraîner des problèmes de fiabilité et de chaîne d'approvisionnement. Un approvisionnement constant en métaux technologiques et en minéraux critiques a mené à la création du Plan d'action conjoint canado-américain pour la collaboration

**Métaux et minéraux critiques – les effets de l'atténuation des changements climatiques<sup>5,6</sup>**

**LES MÉTAUX ET LES MINÉRAUX TECHNOLOGIQUES ET CRITIQUES :**

Les métaux sont une composante majeure des infrastructures (p. ex., bâtiments, voies routières et ferroviaires, avions et automobiles) et des technologies (p. ex., défense, aérospatiale, batteries, informatique et communications). Ces métaux technologiques sont également indispensables à la transition énergétique et à l'économie verte. Une partie des métaux technologiques, de même que certains minéraux (comme le graphite), sont qualifiés

de « critiques » parce que leurs chaînes d'approvisionnement limitées passent par des pays qui les rendent vulnérables aux perturbations et parce qu'ils ont un rôle essentiel dans la fabrication de produits d'importance stratégique. La liste des métaux et des minéraux critiques varie d'un pays à l'autre<sup>7,8</sup> et est appelée à évoluer en fonction des conditions économiques et d'approvisionnement.

**LA BANQUE MONDIALE – LES MÉTAUX ET LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE**

La Banque mondiale a mené deux études en 2017 et en 2020 afin d'évaluer l'augmentation de la demande des métaux qui seront nécessaires pour atténuer les changements climatiques selon divers scénarios de réchauffement. Un sommaire des résultats du rapport de 2020 pour quelques-uns des métaux technologiques et critiques est présenté ci-dessous.



Ces métaux technologiques sont également indispensables à la transition énergétique et à l'économie verte.

MÉTAL – 2050	LITHIUM	COBALT	INDIUM	NICKEL	ALUMINIUM	CUIVRE
% d'augmentation annuelle de la demande provenant des technologies énergétiques	>450	>450	>200	~100	~10	~10



sur les minéraux critiques qui a été finalisé en janvier 2020<sup>9</sup>, et récemment le Canada a publié sa propre liste de minéraux critiques.<sup>8</sup> Une grande partie des préoccupations est liée aux limites actuelles de la source et de l'approvisionnement. Un bon nombre de ces métaux et minéraux ne sont pas géologiquement

rare,<sup>10,11</sup> mais leurs chaînes d'approvisionnement sont complexes. Les enjeux sociopolitiques dans les juridictions qui sont les principaux fournisseurs et les problèmes environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG) représentent des défis majeurs.<sup>12</sup> Par exemple, environ 68% du cobalt essentiel aux technologies de batteries est extrait principalement en République démocratique du Congo<sup>13</sup>, et la Chine produit 85% des produits finaux fabriqués à partir d'éléments de terres rares et utilisés dans les batteries, dans les éoliennes et dans les panneaux solaires.<sup>14</sup> La diversification des chaînes d'approvisionnement est une façon d'aider le Canada et les partenaires internationaux à garantir l'accès à des ressources qui répondent à leurs besoins en énergie propre.

Le recyclage peut contribuer à satisfaire la demande, mais comporte de nombreuses limites. Même si certains métaux, comme l'aluminium, le plomb, le cuivre et le fer, se recyclent facilement, c'est loin d'être le cas pour d'autres métaux. Par exemple, le zinc utilisé dans l'acier galvanisé et dans les produits de peinture est très difficile à recycler. Les efforts pour recycler les métaux critiques sont freinés par la complexité des conceptions et les alliages multiélémentaires précis, des matériaux utilisés dans diverses technologies de pointe. Ces efforts sont d'autant plus limités que le Canada n'a pas d'installations de traitement ni de chaînes d'approvisionnement complètes pour les métaux critiques. En principe, les métaux extraits des mines devraient demeurer en utilisation pendant plusieurs cycles, mais il faudra une évolution des mentalités des consommateurs tout comme des fournisseurs de technologies pour y parvenir. Certains des moyens de réaliser ces changements de société font partie du concept d'économie circulaire.

Au Canada et ailleurs, les consommateurs prennent de plus en plus conscience des sources douteuses de certains métaux essentiels à la transition énergétique et à

**En principe, les métaux extraits des mines devraient demeurer en utilisation pendant plusieurs cycles, mais il faudra une évolution des mentalités des consommateurs tout comme des fournisseurs de technologies pour y parvenir. Certains des moyens de réaliser ces changements de société font partie du concept d'économie circulaire.**



des produits de consommation comme les téléphones intelligents et les ordinateurs. Dans certains cas, cela peut se traduire par une augmentation du soutien à la diversification des chaînes d'approvisionnement et une intensification de l'exploitation minière dans des pays riches en ressources naturelles comme le Canada.<sup>15</sup>

#### **L'EXPLORATION : POUVONS-NOUS TROUVER DE NOUVELLES RESSOURCES AU CANADA?**



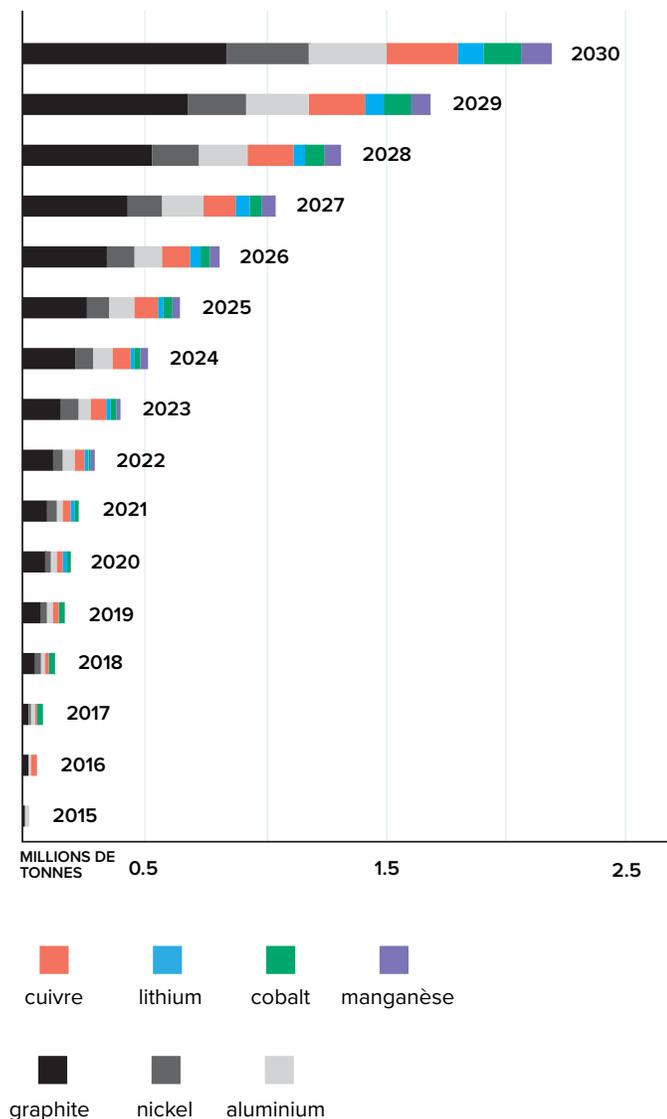
**MINE DE CUIVRE HIGHLAND VALLEY**

JENNIFER STAHN/INFONEWS.CA 2016

Pour que le Canada devienne un fournisseur important en métaux utilisés dans la transition énergétique, il faut y découvrir de nouvelles ressources, les évaluer et les exploiter. Toutefois, l'exploration est une entreprise difficile, de haut risque et sans garantie de réussite. Les réussites passées sont le fruit de collaborations entre l'industrie, les universités et les gouvernements (y compris les gouvernements inuits et des Premières Nations); elles ont ainsi créé de nouvelles connaissances et méthodologies qui aident à cibler les efforts d'exploration des métaux.

## PRÉVISION DE LA DEMANDE EN MÉTAUX NÉCESSAIRES À L'ÉLECTRIFICATION DU PARC AUTOMOBILE

SOURCE : BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE



Le but de l'exploration est de découvrir des gisements de grande valeur, celle-ci étant déterminée par la quantité de minerai présent dans la roche, la taille du gisement et son potentiel économique pour offrir des avantages à long terme aux sociétés, aux intervenants et aux collectivités. L'exploration de zones vertes, c'est-à-dire complètement nouvelles, doit donc se concentrer dans les régions propices à une exploitation qui a un minimum d'impact pour un maximum d'avantages socioéconomiques, même

dans les situations où de nouvelles infrastructures sont requises. Vraisemblablement, ces découvertes se feront de plus en plus dans des régions éloignées, comme le Nord canadien, ou à des profondeurs du sol où la prospection et l'exploration étaient limitées historiquement. Dans ces régions éloignées, l'exploration est souvent associée à des risques en raison de son coût élevé et d'une faible probabilité de réussite. Les nouveaux relevés géoscientifiques et les données résultantes que fournissent les gouvernements peuvent être combinés aux approches et aux technologies innovantes afin d'atténuer certains risques pour les sociétés et les investisseurs.

Comprendre les terres et les procédés qui produisent des métaux à des concentrations rentables est un aspect essentiel d'une exploration minière fructueuse. Pour y arriver, il faut collecter des données à multiples échelles, du niveau continental au niveau microscopique. De nombreuses disciplines mènent des recherches prometteuses. Par exemple, des études microbiennes permettent d'indiquer des gisements cachés<sup>16</sup>, et des méthodes géophysiques mises au point pour l'exploration pétrolière et gazière, comme les relevés sismiques, sont adaptées et combinées à d'autres méthodes pour visualiser des cibles minérales à des profondeurs atteignant un kilomètre. Des analyses de données de plus en plus sophistiquées, y compris l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, sont réalisées sur de vastes bases de données géologiques, géophysiques, géochimiques et de télédétection à l'échelle régionale et par projets afin de repérer les cibles d'exploration et de départir les résultats prometteurs des faux positifs ou négatifs.<sup>17</sup>

### EXEMPLES DE PROJETS CANADIENS DE RECHERCHE GÉOSCIENTIFIQUE SUR LES RESSOURCES MINÉRALES

**LITHOPROBE** (1984-2004)<sup>27</sup>

**Empreintes**, un projet du CRSNG et du Conseil canadien d'innovation minière (CCIM) (2010-2020)<sup>28</sup>

**Terre de métaux**, un projet du fonds Apogée Canada pour l'excellence en recherche (2017-aujourd'hui)<sup>29</sup>

**Programme de géocartographie de l'énergie et des minéraux (GEM)**<sup>30</sup> et **Initiative géoscientifique ciblée (IGC)**<sup>31</sup> de Ressources naturelles Canada

## LES DÉFIS DE L'EXPLOITATION ET DE L'EXTRACTION DE MÉTAUX

Lorsqu'un gisement minéral est découvert, il faut séparer les métaux des roches et des minéraux environnants. Coûteux et énergivore, ce procédé produit souvent des déchets nuisibles à l'environnement. La demande accrue de métaux technologiques a mis en lumière la nécessité d'améliorer ces procédés d'extraction.

En général, les métaux proviennent de minéraux (l'or étant une exception notable); leur extraction consiste à séparer le minéral hôte de la roche et à lui faire subir des traitements afin d'en récupérer le métal. Le contenu métallique rentable peut atteindre jusqu'à 65% pour le fer, un pour cent pour le cuivre, moins d'une partie par million pour l'or et une quantité encore plus faible dans le cas de certains métaux critiques essentiels à la transition énergétique.

Si la concentration de métaux est faible, leur exploitation exige d'extraire et de traiter de grandes quantités de roches pouvant atteindre 100 000 tonnes par jour, dont la majorité se transforme en déchets. Libérer les minéraux contenant du métal requiert d'énormes quantités d'énergie pour concasser et broyer les roches jusqu'à les réduire à une fine poudre. Comme la demande mondiale de divers métaux augmente, l'industrie se tourne vers de vastes exploitations à ciel ouvert où les concentrations de métaux sont en baisse constante<sup>18</sup>, bien que le Canada ait la chance d'avoir un nombre important de mines à fortes concentrations de métaux qui n'ont pas suivi la tendance mondiale à ce jour. C'est ainsi que, pendant la majeure partie du 20<sup>e</sup> siècle, les mines ont extrait de moins en moins de métal de quantités toujours plus grandes de roches, tout en consommant plus d'énergie et d'eau pour chaque unité de métal produite. Le développement de nouvelles technologies qui améliorent le rendement d'extraction constitue un axe de recherche et d'innovation au Canada et ailleurs.

Les exploitations à grande échelle produisent également davantage de déchets, qui comprennent les roches retirées pour en extraire les minéraux à valeur commerciale et les résidus miniers, c'est-à-dire les roches finement

broyées qui restent après que les minéraux utiles ont été extraits. En général, les résidus sont déposés dans de l'eau retenue par des digues dans des vallées. Malheureusement, la rupture de ce genre de digues a déjà provoqué des tragédies et, dans certains cas, impliquant des pertes humaines (p. ex., la catastrophe de Brumadinho, au Brésil, en 2018).<sup>19</sup>

L'exploitation de la majorité des mines pour les principaux métaux, comme le fer, implique de déplacer d'importantes quantités de matériaux. En revanche, l'exploitation de métaux critiques est plus diversifiée. Lorsqu'il y a de fortes concentrations de métaux, les procédés d'extraction peuvent cibler un seul métal, comme dans le cas du nickel. Si les concentrations sont faibles, le métal est généralement récupéré comme sous-produit de l'extraction d'autres

**En utilisant de nouvelles technologies et l'analyse de données à diverses échelles pour parfaire les connaissances sur la répartition des métaux dans les roches et dans les minéraux, on pourrait obtenir des procédés de traitement et d'extraction plus rentables et écologiques.**

métaux, comme c'est le cas du cobalt produit dans les mines de nickel ou de cuivre. Enfin, les métaux présents à l'état de traces ne peuvent être récupérés que par la fonte et l'affinage d'autres métaux, comme pour le gallium se trouvant dans les minerais d'aluminium, l'indium et le germanium dans ceux de zinc et le sélénium dans ceux de cuivre. Il en découle une telle complexité des marchés et des chaînes d'approvisionnement que cela nuit aux efforts pour s'assurer que les métaux proviennent de sources acceptables.

L'un des défis de l'exploitation minière, c'est la nature variable des matières premières avant traitement, c'est-à-dire les roches contenant les minéraux hôtes. En utilisant de nouvelles technologies et l'analyse de données à diverses échelles pour parfaire les connaissances sur la répartition des métaux dans les roches et dans les minéraux, on pourrait obtenir des procédés de traitement et d'extraction plus rentables et écologiques. La détection permet de choisir de traiter des matières riches en métal et de réduire la consommation énergétique et la production

de résidus en évitant de traiter des roches à faible contenu métallique.<sup>20</sup> Certains gisements se prêtent à la lixiviation en tas ou en cuve pour extraire les métaux des roches ou encore à l'injection de réactifs dans le sol pour récupérer les métaux. Les procédés de lixiviation peuvent réduire l'empreinte de l'industrie minière et les déchets miniers, mais le risque de contamination des eaux souterraines et de surface demeure un enjeu. D'autres métaux, comme le lithium, sont récupérés par l'évaporation à grande échelle des eaux souterraines naturelles (p. ex., dans des lacs salés du Chili et de l'Argentine), mais si cette technique peut sembler inoffensive, elle nécessite de grandes quantités d'eau dans une région aux ressources limitées.<sup>21</sup>

Dans les mines existantes, l'objectif est d'optimiser les procédés tout en diminuant la consommation d'énergie et d'eau. Le recours à l'automatisation et à la commande numérique améliore le rendement et la sécurité. Il faut réduire et gérer les déchets, surtout les résidus, produits par les grandes mines.<sup>17</sup> Pour ce faire, de nouvelles façons de stocker les résidus miniers, une meilleure surveillance et évaluation des risques ainsi que le déploiement de systèmes intégrés sont à préconiser. Des possibilités d'extraire les métaux critiques et des façons d'exploiter les résidus sous forme de matériaux ou d'autres utilisations permettraient de valoriser les anciens sites et d'en réduire les impacts environnementaux. En outre, certains résidus pourraient servir à séquestrer du CO<sub>2</sub>, ce qui viendrait compenser les émissions de gaz à effet de serre et stabiliser les résidus de manière efficace.<sup>22</sup>

## L'APPROVISIONNEMENT RESPONSABLE POUR RÉPONDRE À LA DEMANDE EN MÉTAUX

En contrepartie du besoin grandissant en métaux technologiques et critiques, il existe une volonté croissante de produire ces métaux de manière responsable sans aggraver les problèmes qu'on souhaite atténuer.

De grandes sociétés minières canadiennes et mondiales ont adopté les objectifs de développement durable de l'ONU, qui fixent des cibles importantes d'ici 2030. Pour les atteindre, il faudra investir des sommes considérables et trouver des solutions novatrices. De plus, l'impératif de mesurer et de communiquer les progrès réalisés pour atteindre ces objectifs est encore négligé dans certaines sociétés et collectivités. Une meilleure transparence des

données, qui inclurait les données en temps réel lorsqu'elles sont disponibles, est cruciale pour améliorer la confiance et la participation de tous.

Au chapitre de l'environnement, il y aurait matière à mener des études environnementales plus poussées sur les sites miniers proposés et les corridors d'infrastructures connexes. L'adoption d'une approche intégrée de l'aménagement du territoire a été proposée comme moyen de mieux évaluer son état et son utilisation actuelle en impliquant toutes les parties prenantes et les parties concernées dans la prise de décision.<sup>23</sup> Cette intégration fait désormais partie des réglementations récentes (c.-à-d. la Loi sur l'évaluation d'impact) qui exigent l'évaluation d'une plus large gamme de facteurs sur le site proposé, y compris des données sur la géologie, le climat, le sol, l'eau, la biodiversité, le patrimoine, les communautés et les activités humaines. Grâce à des données de qualité et à une analyse spatiale, des décisions pourront être prises avec transparence pour réduire l'impact au minimum, préserver les zones essentielles, obtenir des avantages mutuels et éviter les conflits.<sup>24</sup> Ces études à portée élargie sont particulièrement importantes dans les zones où risquent de cohabiter plusieurs exploitations minières avec une utilisation parallèle des sols et où les impacts cumulatifs à venir pourraient avoir des conséquences imprévues.

On reconnaît de plus en plus que les peuples autochtones, les collectivités voisines et le grand public s'attendent à un minimum de responsabilité sociale pour qu'un projet de mine soit accepté. On constate de nombreux changements dans la façon dont les sociétés traitent les collectivités autochtones et non autochtones, ce qui a mené à la conclusion d'ententes prévoyant des avantages assurés, des emplois et la protection de l'environnement. Cette évolution des relations se poursuivra en favorisant des ententes fondées sur la collaboration, des partenariats et d'autres types d'accords inédits. Le développement d'une activité économique durable au-delà du cycle de vie de la mine exige des efforts ciblés sur le renforcement des capacités, la création d'occasions d'affaires et l'entrepreneuriat indépendant. Pour déployer cette approche à l'échelle d'une région (ou d'un écosystème), une collaboration élargie doit s'établir entre les collectivités, les sociétés minières et les gouvernements.

Les consommateurs veulent avoir l'assurance que leurs produits contiennent des métaux de source responsable,

d'autant plus lorsque la technologie s'annonce comme étant verte et propre. Conséquemment, les sociétés de technologie de consommation pourraient participer directement ou indirectement à l'extraction des ressources. La validation de la source d'un métal au moyen de sa chaîne d'approvisionnement donnera lieu à de nouveaux modèles de technologies et d'affaires et augmentera les possibilités de recyclage et de retraitement. En définitive,

## Pour réussir, le secteur nécessitera des efforts multidisciplinaires impliquant les secteurs de la haute technologie, de la biotechnologie, de la science des données et des sciences sociales ainsi que des sciences de la terre, de l'ingénierie et des sciences de l'environnement.

c'est ce qui jettera les bases d'une économie circulaire où l'industrie minière fournit un approvisionnement responsable en métaux et les exploite de manière à prolonger leur utilisation aussi longtemps que possible.

## LE SECTEUR MINIER CANADIEN : FUTUR CHEF DE FILE DES MÉTAUX TECHNOLOGIQUES?

La perspective que le Canada devienne un producteur clé de métaux technologiques retient l'attention, car ces matériaux contribueront à la transition mondiale vers une économie à faibles émissions de carbone. La capacité du Canada de diriger cette transition est rendue possible par le vaste réseau de penseurs, d'innovateurs, de chercheurs et d'éducateurs qui œuvrent à la prochaine phase de l'industrie minière canadienne. Pour réussir, le secteur nécessitera des efforts multidisciplinaires impliquant les secteurs de la haute technologie, de la biotechnologie, de la science des données et des sciences sociales ainsi que des sciences de la terre, de l'ingénierie et des sciences de l'environnement. L'expertise collective du Canada, ainsi que la participation réelle des peuples autochtones à tous les niveaux, peuvent nous fournir les métaux technologiques et critiques nécessaires à la lutte contre les changements climatiques et à la réalisation d'autres objectifs de société.

### À PROPOS DE Sciences et génie à la page



The Partnership Group for  
Science and Engineering  
Le Partenariat en faveur des  
sciences et de la technologie

**Sciences et génie à la page** est une initiative du **Partenariat en faveur des sciences et de la technologie** qui vise à intensifier la discussion sur des questions d'actualité axées sur la science et le génie en résumant l'état actuel des connaissances et du paysage politique. Tous les numéros sont préparés et révisés par une équipe multidisciplinaire de bénévoles et publiés gratuitement.

Cette publication du PFST a été préparée par **John Thompson** (PetraScience Consultants) et **Steve Piercey** (Université Memorial de Terre-Neuve), avec l'aide du Centre Canadien Science et Médias et traduit par **Gabrielle Garneau**.

Le PFST est très reconnaissant à **Ressources naturelles Canada** et à la **Fédération canadienne des sciences de la terre** de leur appui à ce numéro.



Natural Resources  
Canada

Ressources naturelles  
Canada

Canada



CFES FCST  
Canadian Federation  
of Earth Sciences | Fédération canadienne  
des sciences de la Terre



## RÉFÉRENCES

- « Canada. » (2021). *Association canadienne des prospecteurs et entrepreneurs*. [www.pdac.ca/docs/default-source/communications/infographics-docs/canada.pdf?sfvrsn=ec129098\\_2](http://www.pdac.ca/docs/default-source/communications/infographics-docs/canada.pdf?sfvrsn=ec129098_2).
- « Sources of pollution: mining. » (2020). *Environnement et changement climatique canada*. [www.canada.ca/en/environnement-climate-change/services/managing-pollution/sources-industry/mining.html](http://www.canada.ca/en/environnement-climate-change/services/managing-pollution/sources-industry/mining.html).
- Keeling, A., and Sandlos, J. (2015). *Mining and Communities in Northern Canada: History, Politics, and Memory*. University of Calgary Press.
- Horowitz, L.S., Keeling, A., Lévesque, F., Rodon, T., Schott, S., and Thériault, S. (2018). « Indigenous peoples' relationships to large-scale mining in post-colonial contexts: Toward multidisciplinary comparative perspectives. » *The Extractive Industries and Society*, 5(3), 404-414. doi:10.1016/j.exis.2018.05.004.
- « The growing role for minerals and metals for a low carbon future. » (June 2017). *Banque mondiale*. [documents1.worldbank.org/curated/en/207371500386458722/pdf/117581-WP-P159838-PUBLIC-ClimateSmartMiningJuly.pdf](https://documents1.worldbank.org/curated/en/207371500386458722/pdf/117581-WP-P159838-PUBLIC-ClimateSmartMiningJuly.pdf).
- « Minerals for climate action: the mineral intensity of the clean energy transition, » (2020). *Banque mondiale*. [pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climates-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf](https://pubdocs.worldbank.org/en/961711588875536384/Minerals-for-Climates-Action-The-Mineral-Intensity-of-the-Clean-Energy-Transition.pdf).
- Schulz, K.J., DeYoung Jr, J.H., Seal II, R.R. and Bradley, D.C. (2017). « Critical mineral resources of the United States – Economic and environmental geology and prospects for future supply. » *USGS Professional Paper 1802*, 797. [pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802](https://pubs.er.usgs.gov/publication/pp1802).
- « Minéraux critiques. » (2021). *Ressources naturelles Canada*. [www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mines-matériaux/mineraux-critiques/23415](http://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mines-matériaux/mineraux-critiques/23415).
- « Le Canada et les États-Unis mettent la dernière main à leur plan d'action conjoint pour la collaboration dans le domaine des minéraux critiques. » (2020). *Ressources naturelles Canada*. <https://www.canada.ca/fr/ressources-naturelles-canada/nouvelles/2020/01/le-canada-et-les-etats-unis-mettent-la-derniere-main-a-leur-plan-daction-conjoint-pour-la-collaboration-dans-le-domaine-des-mineraux-critiques.html>.
- Jowitt, S.M., Mudd, G.M., and Thompson, J.F.H. (2020). « The renewability of non-renewable metal resources and the potential influence of resource conflict. » *Commun Earth Environ*, 1(13). doi:10.1038/s43247-020-0011-0.
- Arndt, N.T., Fontbote, L., Hedenquist, J.W., Kesler, S.E., Thompson, J.F.H., and Wood, D. (2020). « Future global mineral resources. » *Geochemical Perspectives*, 6(1), 171. doi:10.7185/geochemsp.61.
- Lèbre, É., Owen, J.R., Corder, G.D., Kemp, D., Stringer, M. and Valenta, R.K. (2019). « Source risks as constraints to future metal supply. » *Environ. Sci. Technol.*, 53, 10571–10579. doi.org/10.1021/acs.est.9b02808.
- USGS Publications*. « Mineral commodity summaries 2021. » (2021). [pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf](https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf)
- « U.S. dependence on China's rare earth: Trade war vulnerability. » (June 2019). *Reuters*. [www.reuters.com/article/us-usa-trade-china-rareearth-explainer-idUSKCNITS3AQ](http://www.reuters.com/article/us-usa-trade-china-rareearth-explainer-idUSKCNITS3AQ).
- « Les Canadiens souhaitent saisir les possibilités offertes dans le domaine des minéraux critiques. » (2020). *Association minière du Canada*. [mining.ca/fr/communiqués-de-presse/les-canadiens-souhaitent-saisir-les-possibilités-offertes-dans-le-domaine-des-mineraux-critiques/](http://mining.ca/fr/communiqués-de-presse/les-canadiens-souhaitent-saisir-les-possibilités-offertes-dans-le-domaine-des-mineraux-critiques/).
- Simister, R.L., Iulianella Phillips, B.P., Winterburn, P.A., and S.A. Crowe. (2020). « Microbial-community fingerprints as indicators for buried mineralization, in British Columbia. » *Geoscience BC Report 2020-03*, MDRU Publication 446, 31. [brimm.ubc.ca/projects/exploration-using-microbes/](http://brimm.ubc.ca/projects/exploration-using-microbes/).
- Yin, Z., Caers, J and Zuo, R. (2020). « A Monte Carlo-based framework for risk-return analysis in mineral prospectivity mapping. » *GEOSCIENCE FRONTIERS*, 11(6), 2297–308. doi.org/10.1016/j.gsf.2020.02.010
- Schodde, Richard. « Role of Technology and Innovation for Identifying and Growing Economic Resources. » (2019) *AMIRA International's 12th Biennial Exploration Managers Conference*. [minexconsulting.com/wp-content/uploads/2019/12/AMIRA-EMC-Presentation-March-2019-FINAL.pdf](https://minexconsulting.com/wp-content/uploads/2019/12/AMIRA-EMC-Presentation-March-2019-FINAL.pdf).
- Oberle, B., Brereton, D., Mihaylova, A. (eds.). (2020). « Towards Zero Harm: A Compendium of Papers Prepared for the Global Tailings Review. » *Londres : Global Tailings Review*. [globaltailingsreview.org/](http://globaltailingsreview.org/).
- « Ore Sorting. » (March 2019). *International Mining*, 82-3. [minesense.com/wp-content/uploads/2019/05/2019.03-International-Mining-Jeff-More-Interview.pdf](https://minesense.com/wp-content/uploads/2019/05/2019.03-International-Mining-Jeff-More-Interview.pdf).
- « Lithium is powering today's technology – at what cost? » (2019). *National Geographic*. [www.nationalgeographic.com/magazine/2019/02/lithium-is-fueling-technology-today-at-what-cost/](http://www.nationalgeographic.com/magazine/2019/02/lithium-is-fueling-technology-today-at-what-cost/).
- Power, I.M., Dipple, G.M., Bradshaw, P.M.D., and Harrison, A. (2020). « Prospects for CO2 mineralization and enhanced weathering of ultramafic mine tailings from the Baptiste nickel deposit in British Columbia, Canada. » *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 94. doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102895.
- « Plus grand que la somme de ses parties : Vers une gestion intégrée des ressources naturelles au Canada. » (2019). *Conseil des académies canadiennes* <https://www.rapports-cac.ca/wp-content/uploads/2019/04/Rapport-Plus-grand-que-la-somme-de-ses-parties-vers-une-gestion-intégrée-des-ressources-naturelles-au-Canada.pdf>.
- « Blueprints for a greener footprint – Sustainable development at a landscape-scale. » (2016). *Forum économique mondial*. [www3.weforum.org/docs/WEF\\_Blueprint\\_for\\_a\\_Greener.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Blueprint_for_a_Greener.pdf).
- Marshall, B. « Faits et chiffres 2020 de l'Association minière du Canada – La situation de l'industrie minière au Canada. » (2021). *L'Association minière du Canada*. [mining.ca/wp-content/uploads/2021/02/FF-2020-FR-Web-1.pdf](http://mining.ca/wp-content/uploads/2021/02/FF-2020-FR-Web-1.pdf).
- « 10 faits clés sur le secteur des minéraux au Canada. » (2020). *Ressources naturelles Canada*. [www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/publications/publications-sur-les-mineraux-le/10-faits-cles-sur-le-secteur-des-mineraux-au-canada/18426](http://www.rncan.gc.ca/cartes-outils-publications/publications/publications-sur-les-mineraux-le/10-faits-cles-sur-le-secteur-des-mineraux-au-canada/18426).
- « Projet LITHOPROBE. » *Canada's National Geoscience Project*. [lithoprobe.eos.ubc.ca](http://lithoprobe.eos.ubc.ca).
- « Integrated Multi-Parameter Footprints of Ore Systems: The Next Generation of Ore Deposit Models. » *NSERC-CMRC Industrial Research Network*, 2019. [cmrc-footprints.laurentian.ca](http://cmrc-footprints.laurentian.ca).
- « Projet Terre de métaux. » *Mineral Exploration Research Centre*, 2021. [merc.laurentian.ca/research/metal-earth](http://merc.laurentian.ca/research/metal-earth).
- « Initiative géoscientifique ciblée. » *Ressources naturelles Canada*, 2021. [www.rncan.gc.ca/sciences-de-la-terre/ressources-sciences-de-la-terre/programmes-federaux-sciences-terre/initiative-geoscientifique-ciblee-accroitre-lefficacite-de-lexploration-en-profondeur/10908](http://www.rncan.gc.ca/sciences-de-la-terre/ressources-sciences-de-la-terre/programmes-federaux-sciences-terre/initiative-geoscientifique-ciblee-accroitre-lefficacite-de-lexploration-en-profondeur/10908).
- « Programme GEM de Ressources naturelles Canada. » *Ressources naturelles Canada*, 2021. [www.rncan.gc.ca/sciences-de-la-terre/ressources-sciences-de-la-terre/programmes-federaux-sciences-terre/gem-geocartographie-lenergie-mineraux/18216](http://www.rncan.gc.ca/sciences-de-la-terre/ressources-sciences-de-la-terre/programmes-federaux-sciences-terre/gem-geocartographie-lenergie-mineraux/18216).

