



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada



RESSOURCES NATURELLES CANADA PRODUIT D'INFORMATION GÉNÉRALE 144f

Mallette éducative « Minéraux critiques »

Version 2023

V. Bécu, A.-A. Sappin et S. Larmagnat

Commission géologique du Canada

2023

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le ministre des
Ressources naturelles, 2023

Pour obtenir des renseignements sur les droits de reproduction, veuillez
communiquer avec Ressources naturelles Canada à l'adresse
copyright-droitdauteur@nrcan-rncan.gc.ca.

Lien permanent : <https://doi.org/10.4095/331222>

Canada

Mallette « Minéraux critiques »

Assemblée par Valérie Bécu, Anne-Aurélié Sappin et Stéphanie Larmagnat, CGC-Québec

L'objectif du projet des mallettes éducatives est de faciliter les activités de sensibilisation et de vulgarisation scientifique en élaborant du matériel et du contenu pédagogique simple, ainsi que des scénarios d'animation prêts à être utilisés. Le tout est contenu dans des mallettes robustes, munies de roues et de poignées, pour faciliter la manutention, le transport et le rangement. Cette initiative a bénéficié de l'appui financier de la Fondation géologique du Canada (FGC) (*Canadian Geological Foundation Grant 19-26*) ainsi que de la Commission géologique du Canada, division de Québec (CGC-Québec), en plus de nombreux dons (échantillons et autres) de la part de plusieurs membres du personnel de la CGC-Québec et leur entourage. Le matériel assemblé se veut un point de départ pouvant être modulé et adapté à la guise des présentateurs selon les divers scénarios et contextes d'animation. En ce sens, le contenu de ce guide ne doit pas être considéré comme exhaustif et peut facilement être modifié pour refléter les ressources présentes dans chaque des provinces ou territoires.



Les minéraux et les éléments qui les constituent sont utilisés dans la fabrication de divers produits ou dans des procédés industriels grâce à leurs propriétés physiques ou chimiques. Que serait notre vie sans métaux ni minéraux : pas d'acier, pas d'électricité, de plomberie, d'appareils ménagers, d'avion et d'automobiles? Mais encore, aviez-vous déjà réalisé que les minéraux entrent également dans la confection de produits cosmétiques, médicaments, vitamines, appareils électroniques et jouent un rôle essentiel dans la transition vers une économie numérique et à faibles émissions de carbone? Le gouvernement du Canada a dressé une liste qui compte 31 minéraux et/ou éléments considérés comme critiques pour la prospérité économique du Canada et de ses alliés et pour positionner le pays en tant que chef de file de l'exploitation minière, comme mentionné dans le Plan canadien pour les minéraux et les métaux (PCMM). La mallette « Minéraux critiques » présente des exemples de minéraux jugés indispensables pour le développement économique du pays.

Minéraux contenus dans la mallette « Minéraux critiques »

Structure du contenu pour la mallette « Minéraux critiques »:

- 1- Introduction
 - a. Introduction
 - b. Inventaire Mallette Minéraux critiques (inventaire du contenu de la mallette « Minéraux critiques »)
- 2- Minéraux critiques
 - a. Minéraux critiques (descriptions des échantillons contenus dans la mallette)
 - b. FICM_Affiche Cellulaire (affiche rigide)
 - c. FICM_Liste minéraux critiques du Canada 2021 (affiche souple)
- 3- Ressources complémentaires
- 4- Sources citées

Nos sincères remerciements à Christopher Lawley pour sa lecture critique du document. Ses commentaires et suggestions auront permis d'apporter améliorations et précisions au contenu. Merci également à Jean-François Bureau et Patrick Potter pour leurs commentaires.

Sources :

<http://www.canadiangeologicalfoundation.org/>

<https://www.rncan.gc.ca/science-et-donnees/centres-de-recherche-et-laboratoires/la-commission-geologique-du-canada/17101>

<https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/mineraux-critiques/23415>

Plan canadien pour les minéraux et les métaux (PCMM) : <https://www.minescanada.ca/fr>

MALLETTE « MINÉRAUX CRITIQUES »/ “CRITICAL MINERALS” CASE



Inventaire des minéraux/ Minerals inventory:

1. Graphite / Graphite
2. Pyrochlore / Pyrochlore
3. Molybdénite / Molybdenite
4. Malachite et cuivre natif / Malachite and native copper
5. Spodumène / Spodumene
6. Bauxite / Bauxite
7. Chromite / Chromite
8. Fluorite / Fluorite
9. Eudialyte / Eudialyte
10. Ilménite / Ilmenite
11. Titanomagnétite / Titanomagnetite
12. Chalcopryrite / Chalcopyrite
13. Sphalérite / Sphalerite
14. Pentlandite et chalcopryrite (Mine Raglan, Cap Smith, Qc) / Pentlandite and chalcopyrite (Raglan Mine, Cape Smith, Qc)

Section 2 : Minéraux critiques

La mallette contient une collection de 16 échantillons qui renferment des minéraux et/ou des métaux (éléments) identifiés comme critiques pour le Canada (voir les minéraux, surlignés en jaune, et les métaux surlignés en vert, dans la Figure 2.1). Bien que certains métaux peuvent être trouvés à l'état pur (p. ex. l'or et le cuivre natifs), mais généralement qu'en très faible quantité, la majorité apparaissent sous forme d'un groupement d'éléments chimiques se présentant sous forme d'un solide cristallin (minéral) formé habituellement par des processus inorganiques. Essentiels pour les applications liées aux énergies renouvelables et aux technologies propres (p. ex. pour la fabrication de batteries, aimants permanents, panneaux solaires et éoliennes), ces minéraux et éléments critiques sont aussi des intrants essentiels dans les chaînes d'approvisionnement liées à la fabrication de technologies de pointes, notamment pour l'industrie de la défense et de la sécurité, les produits électroniques grand public, l'agriculture, les applications médicales et les infrastructures essentielles. On entend par infrastructures essentielles (IE) les processus, les systèmes, les installations, les technologies, les réseaux, les biens et les services qui sont essentiels à la santé, à la sécurité ou au bien-être économique des Canadiens et des Canadiennes, ainsi qu'au fonctionnement efficace des institutions publiques. (source : <https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/ntnl-scr/crtcl-nfrstrctr/ci-iec-fr.aspx>)

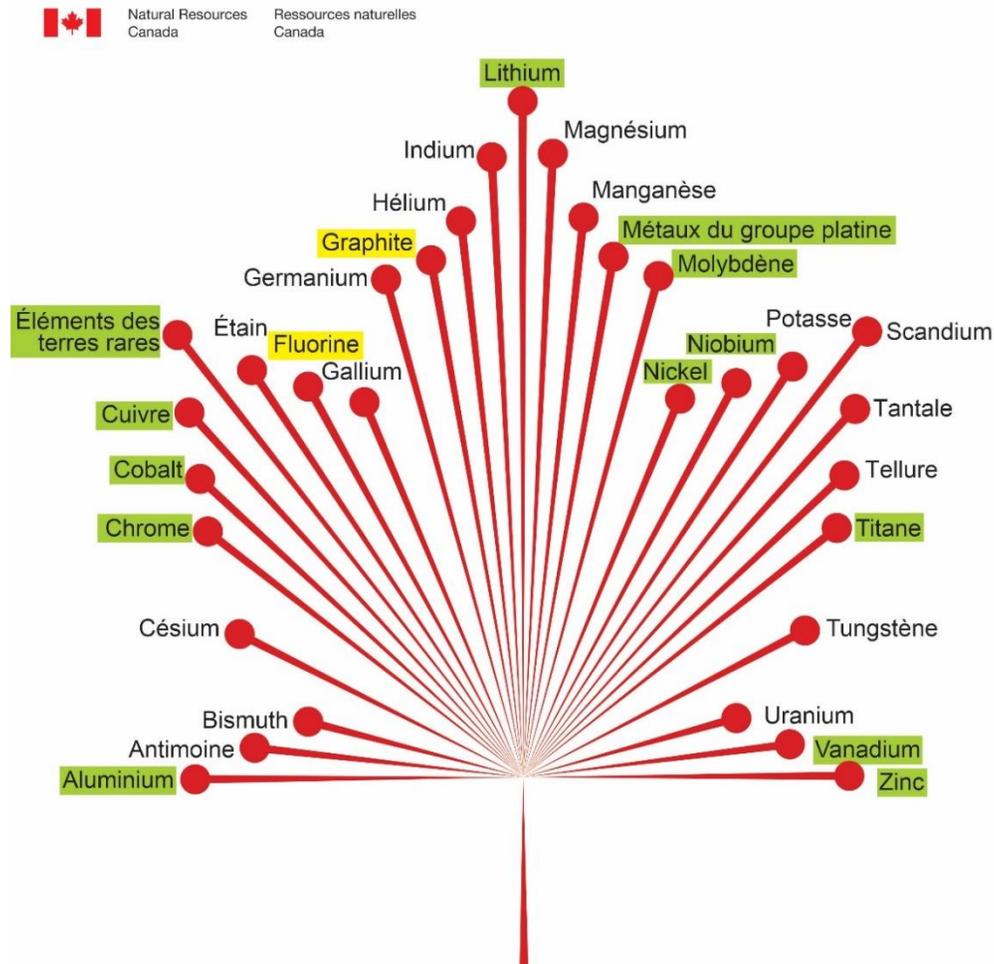


Figure 2.1 : Liste des minéraux critiques du Canada comme publiée en 2021. Les minéraux, surlignés en jaune, et les métaux, surlignés en vert, correspondent aux exemples contenus dans la mallette « Minéraux critiques ».

En 2021, lors de la conférence des Nations Unies sur les changements climatiques (la COP26), le Canada s'est joint à plus de 120 pays, incluant tous les autres pays membres du G7 (Royaume-Uni, États-Unis, Allemagne, Italie, France et Japon), pour s'engager à atteindre un objectif de carboneutralité d'ici 2050. Un certain nombre de provinces et de villes canadiennes ont également emboîté le pas en prenant des engagements similaires. Bien que le rôle prépondérant des combustibles fossiles dans les changements climatiques actuels et futurs ne fasse aucun doute, la transition énergétique sera associée à un grand nombre d'impacts socio-économiques. Par exemple, la prolifération de nouvelles technologies à haut rendement énergétique pourrait ultimement augmenter la consommation d'énergie et de ressources, à l'encontre de ce qui est requis pour atteindre les objectifs climatiques mondiaux (ceci correspond à un concept socio-économique connu sous le nom « d'effet rebond »; Gillingham et al., 2014, RFF DP 14-39). En outre, dans un rapport déposé en début 2021, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) a déclaré que pour atteindre la carboneutralité d'ici 2050, la production mondiale de minéraux et de métaux critiques devrait être multipliée par un facteur six au cours des 30 prochaines années. C'est pourquoi il est important d'en savoir un peu plus sur ces minéraux et métaux et sur les environnements géologiques dans lesquels ils se trouvent.

Pour une mise en contexte plus complète du rôle des minéraux et des métaux dans la transition énergétique, Emmanuel Hache, économiste prospectiviste à l'*IFP Énergies nouvelles*, un organisme public de recherche, d'innovation et de formation dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'environnement, suggère de prendre en considération les points suivants :

1. Les technologies à faible émission de carbone sont plus gourmandes en matériaux que les technologies traditionnelles. Ainsi, l'efficacité énergétique liée au développement des énergies renouvelables s'accompagne d'une augmentation de la consommation de ressources minérales.
2. La définition de criticité d'un métal n'est pas universelle, variant d'un pays à l'autre, et au fil du temps en raison de l'évolution des habitudes de consommation et/ou d'autres progrès techniques. De multiples facteurs peuvent conduire à la criticité, tels que les facteurs géologiques, économiques, stratégiques et environnementaux.
3. Selon le modèle de demande de matière défini par Emmanuel Hache et son équipe, ce n'est pas le lithium mais le cuivre qui est, géologiquement parlant, le métal le plus limité dans le cadre de la transition énergétique. Le lithium est plus limité économiquement et le cobalt géopolitiquement.
4. Les solutions collectives et individuelles de recyclage des métaux, de mobilité durable et, au-delà, de sobriété énergétique ont pleinement leur place dans les actions à envisager pour notre avenir énergétique

(source : <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/climat-environnement-et-economie-circulaire/les-metaux-transition-energetique>)

Un trépied portatif ainsi qu'un coroplaste (affiche rigide, *Du roc à la technologie* – minéraux fournissant des éléments entrant dans la fabrication d'un téléphone cellulaire) et un poster (affiche souple, *Liste des minéraux critiques du Canada 2021*) accompagnent la collection des minéraux critiques et sont entreposés avec la mallette. Ces affiches sont des gracieusetés de la Fondation de l'ICM et des versions PDF accompagnent la *Section 2- Minéraux critiques*.

Différence entre une roche et un minéral?

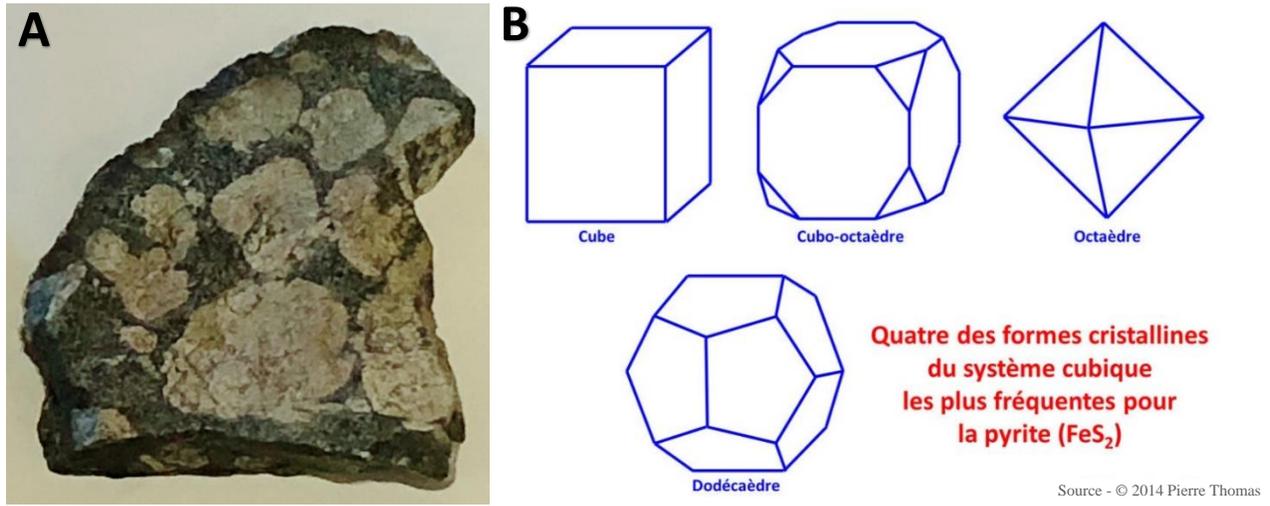


Figure 2.2 : A) Exemple de roche, dans ce cas un gabbro porphyrique, constitué de minéraux de plagioclase (minéral à base de silice et aluminium) de couleur blanchâtre baignant dans une matrice de minéraux fins de couleur foncée composée essentiellement d'amphibole (pyroxène) et de chlorite (minéraux à base de silice, de fer, de magnésium et de calcium). B) Exemple des diverses formes cristallines que peut prendre la pyrite (FeS_2) dans le système cubique, l'un des sept grands systèmes cristallins.

Une roche est un matériau solide en général formé d'un assemblage de minéraux (Figure 2.2A). Les roches sont constituées de minéraux, et les minéraux sont constitués d'éléments chimiques. Une roche peut être constituée d'une ou de plusieurs espèces minérales (p. ex. un granite constitué de quartz, de feldspath et de biotite versus un marbre essentiellement composé de carbonates).

Un minéral est un solide homogène naturel dont la composition chimique est définie (mais pas fixe) et dont l'arrangement atomique est très ordonné. Il est généralement formé par des processus inorganiques. On reconnaît sept grands systèmes cristallins (cubique, quadratique, hexagonal, rhomboédrique, orthorhombique, monoclinique et triclinique) définis par un polyèdre fondamental qui correspond à la forme la plus simple selon laquelle se forme un minéral donné. À noter que chaque système cristallin regroupe de nombreuses formes cristallines et qu'il est fréquent qu'un minéral cristallise sous une variété de formes (voir l'exemple de la pyrite à la Figure 2.2B).

L'échantillon de la Figure 2.2A montre de larges cristaux blanchâtres de plagioclase baignant dans une matrice de cristaux plus fins d'amphibole (pyroxène), de plagioclase et de chlorite. Cette roche est appelée gabbro en fonction de l'abondance relative des minéraux qui la composent. Ce gabbro présente une texture dite porphyrique car de très gros cristaux baignent dans une matrice rocheuse plus fine. Une analogie avec les ingrédients (minéraux) entrant dans la confection de biscuits aux brisures de chocolat (roche) où parfois certains éléments demeurent bien visibles (brisures de chocolat dans les biscuits et les plagioclases dans l'exemple ci-haut) peut être utilisée pour bien illustrer la différence entre un minéral et une roche.

BAUXITE



Figure 2.3 : Échantillon de bauxite (collection CGC-Québec).

Dans la nature, l'aluminium (Al) n'existe pas à l'état pur. Il est extrait du minerai de bauxite ($\text{AlO}_x(\text{OH})_{3-2}$ – Figure 2.3) qui se compose d'oxyde hydraté d'aluminium, contenant de 40 à 60% d'alumine (oxyde d'aluminium Al_2O_3), et qui consiste en un résidu insoluble formé par météorisation (altération engendrée par l'action des agents atmosphériques) profonde de la roche en place sous un climat tropical et humide. Les principaux pays producteurs de bauxite sont l'Australie, la Guinée, la Chine, le Brésil et l'Inde. On produit l'aluminium en séparant l'alumine pure de la bauxite dans une raffinerie par un procédé chimique (procédé de Bayer), puis en traitant l'alumine par électrolyse dans une aluminerie. La méthode consiste à faire circuler un courant électrique dans un électrolyte contenant de l'alumine dissoute où l'aluminium est séparé des atomes d'oxygène et recueilli sur des anodes de carbone. Il faut, en moyenne, environ quatre tonnes de bauxite pour obtenir deux tonnes d'alumine qui produiront, à leur tour, une tonne d'aluminium pur.

Léger, résistant, souple, non corrosif, et recyclable à l'infini, l'aluminium est l'un des métaux les plus utilisés et les plus recyclés dans le monde. L'industrie de l'automobile et des transports emploie des alliages d'aluminium variés pour la fabrication de divers composants en raison de sa légèreté et de sa durabilité, car il permet de diminuer le poids des véhicules et, par conséquent, leur consommation de carburant et leurs émissions de gaz à effet de serre. L'aluminium est également abondamment utilisé dans les secteurs de la construction, dont les usages vont du parement extérieur aux éléments de soutènement des bâtiments, que ceux de l'électricité et de l'électronique à celui des emballages (p. ex. canettes).

Bien qu'il n'y ait pas de gisement de bauxite au Canada, ce dernier est tout de même l'un des principaux producteurs d'aluminium (4^e producteur d'alumine de première fusion dans le monde en 2019) grâce à sa capacité de produire une grande quantité d'électricité, tout particulièrement sous forme d'hydroélectricité, ce qui en fait l'une des productions ayant la plus faible empreinte carbone au monde. De plus, une nouvelle technologie d'électrolyse de l'aluminium sans émission de gaz à effet de serre (GES)

est actuellement en développement. Le remplacement des anodes du procédé traditionnel par des anodes sans carbones permettrait à la fois de réduire les coûts et d'augmenter la capacité de production d'une aluminerie, tout en éliminant les GES directement reliés à la production d'aluminium, en produisant de l'oxygène en tant que sous-produit (technologie ELYSIS™). La quasi-totalité des alumineries est localisée au Québec, à l'exception d'un site situé à Kitimat en Colombie-Britannique, et l'unique affinerie d'alumine du pays se trouve à Jonquière dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

Le réseau hydroélectrique ainsi que la technologie ELYSIS™, tous deux développés au Québec, viennent répondre à la tendance mondiale vers une fabrication de produits à plus faible empreinte carbone, des téléphones intelligents aux automobiles en passant par les avions et les matériaux de construction.

Sources :

<https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/faits-mineraux-metaux/faits-sur-laluminium/20568>

<https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/aluminium>

<https://www.elysis.com/fr>

Côté, T., Fradette, N., et Lévesque, R., *Module 3 : Les cailloux, des matériaux très moderne*; Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Québec, 12 p.

CHROMITE



Figure 2.4 : Échantillon de chromite, minéral noir avec un éclat submétallique, provenant du secteur de Thetford Mines, région de Chaudière-Appalaches, Québec (don de V. Bécu).

La chromite (Figure 2.4) est une espèce minérale du groupe du spinelle, de formule Cr_2FeO_4 (ou $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$) pouvant contenir des traces de magnésium, manganèse, zinc et aluminium. Appartenant au système cristallin cubique, les cristaux de chromite atteignent rarement des tailles de plus d'un centimètre et

se retrouvent le plus souvent en masses grenues, d'éclat submétallique, de couleur variant de noir à brun. La chromite est le seul minerai exploité pour le chrome (Cr).

Le chrome (Cr) est un métal dur (point de fusion 1875 °C), cassant et blanc argenté très connu pour son utilisation comme garniture décorative sur les appareils électroménagers et les automobiles. Toutefois, il sert surtout à fabriquer de l'acier inoxydable, qui contient en moyenne 20% de chrome. Dans sa forme minérale habituelle (chromite), le chrome a des propriétés thermorésistantes qui trouvent des applications dans divers types de fourneaux. Le chrome forme aisément différents composés chimiques qui ont une vaste gamme d'applications, comme les pigments et les agents tannants.

La chromite est un minéral commun dans les péridotites et autres roches ignées ultramafiques, ainsi que dans les roches métamorphiques qui en dérivent, incluant la serpentinite. Formée à haute température, la chromite peut se concentrer par gravité dans le magma pour former des strates enrichies en chrome, en association avec les pyroxènes, l'olivine, la serpentine et le corindon. L'échantillon contenu dans la mallette provient de l'une des nombreuses mines qui ont extrait la chromite contenue dans les unités de dunite et d'harzburgite, des roches ultramafiques localisées à la base du Complexe ophiolitique de Thetford Mines au Québec. Ces mines n'ont été qu'en opération intermittente qu'au cours de la première moitié du 20^e siècle et visaient essentiellement à fournir du chrome pour la fabrication de véhicules et de matériaux divers lors des deux grandes guerres mondiales. Pour l'instant, il n'y a pas d'exploitation de chromite au Canada. Toutefois, prenant en considération le rôle critique du chrome dans la fabrication de divers produits liés à la transition énergétique ou la défense, de grands dépôts découverts dans le secteur du « Ring of Fire » dans le Nord ontarien pourraient être exploités dans un avenir plus ou moins rapproché.

Sources :

Foucault, A. et Raoult, J.-F., 1995. Dictionnaire de géologie, 4^e édition; Masson, Paris, 324 p.

Bédard, P., 2009 (révision 2013). Clef d'identification des minéraux communs : chromite

[<https://cours.polymtl.ca/PBedard/g1q1100/mineraux/chromite/chromite.html>]

<https://gg.mines.gouv.qc.ca/portail-substances-minerales/>

<https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/chrome>

**MINÉRAI DE NICKEL, CUIVRE,
COBALT ET MÉTAUX DU GROUPE
DU PLATINE**

La pentlandite ((Fe,Ni)₉S₈ – Figure 2.5) est un sulfure de nickel assez fréquent dans les gisements magmatiques de nickel (Ni) et cuivre (Cu). Des concentrations appréciables en cobalt (Co) et d'éléments du groupe du platine (ÉGP ou métaux du groupe du platine – MGP) se retrouvent incorporés à même la structure minérale de la pentlandite ou sous forme de minéraux accessoires (minéraux du groupe du platine) dans ces mêmes gisements. L'acier inoxydable constitue l'utilisation



Figure 2.5 : Échantillons de pentlandite et de chalcoppyrite provenant de minerai de nickel de type magmatique provenant de la mine Raglan située dans la ceinture de Cap Smith au Nunavik, Québec (don de M. Houlé).

finale la plus importante du nickel; cette utilisation représente 71% de la consommation totale. Le nickel est également utilisé comme agent d'alliage dans la fabrication de produits en métaux ferreux et non ferreux. L'électronickelage est une autre utilisation du nickel. Ce procédé consiste à recouvrir un objet de métal d'une fine couche de nickel comme élément décoratif ou pour conférer une résistance à la corrosion et à l'usure. Alors que l'emploi du nickel dans la production de piles nickel-cadmium est bien connu, son emploi dans la production de batteries pour les véhicules électriques et hybrides constitue une nouvelle utilisation probable. L'électrification du secteur des transports devrait entraîner une augmentation notable (multiplication par 4) de la demande globale en nickel. Petit fait intéressant, tout le monde a déjà transporté du nickel dans ses poches, puisque ce métal est notamment utilisé dans le procédé de placage multicouche des pièces de monnaie mise en circulation par la Monnaie royale canadienne.

L'exceptionnelle résistance aux températures élevées et à la corrosion font du cobalt (Co) un élément d'alliage essentiel pour la fabrication des turbines des moteurs à réaction et la production d'énergie électrique (améliorant la combustibilité et réduisant la consommation de carburant), des aciers spéciaux pour l'instrumentation médicale/scientifique et des alliages à revêtement dur dans les applications abrasives (p. ex. les pelles de bulldozer). Il est également utilisé dans la confection de batteries rechargeables entre autres destinées aux véhicules électriques ou hybrides ainsi que pour une panoplie d'appareils électroniques.

Les ÉGP regroupent six éléments (osmium, iridium, ruthénium, rhodium, platine, palladium) qui ont des propriétés similaires et qui appartiennent au groupe des métaux de transition. Ils sont parfois désignés comme les métaux du groupe du platine (MGP). Les ÉGP ont des propriétés catalytiques puissantes, c'est-à-dire qu'ils peuvent accélérer ou déclencher un processus chimique sans qu'ils ne subissent de changements permanents ou qu'ils ne soient consommés. La fabrication de convertisseurs catalytiques (utilisés dans les systèmes d'échappement des véhicules à moteur à combustion interne) représente la principale utilisation de ces éléments. Ils sont aussi utilisés comme catalyseurs pour le matériel médical, le raffinage du pétrole, la fabrication de verre et plusieurs autres applications. Parce que ces métaux

précieux sont rares, durables et ont un lustre attrayant, ils sont parfois utilisés dans la fabrication de bijoux (or blanc). Ils servent également de moyens de placement pour les investisseurs.

Le cuivre (Cu) est quant à lui concentré dans les minéraux de chalcopryrite ((CuFeS₂) – Figure 2.5) et covellite (CuS) et revêt une grande importance dans un contexte de transition énergétique, notamment pour l'électrification des transports et le secteur des énergies renouvelables (p.ex. éoliennes et panneaux solaires).

Localisée dans la ceinture de Cap Smith, sur le territoire du Nunavik, la mine Raglan, inaugurée en 1997, constitue encore aujourd'hui la mine la plus septentrionale de la province de Québec. Il s'agit d'un regroupement de quatre mines souterraines, Kikialik (qui signifie « là où il y a du nickel » en inuktitut), Qakimajurq (qui signifie « riche »), Katinniq et Mine 2, qui exploitent des dépôts de sulfures massifs et disséminés riches en nickel (Ni), mais contenant également du cuivre (Cu), des éléments du groupe du platine (ÉGP) et du cobalt (Co). Le complexe minier de Raglan figure parmi les mines de métaux de base le plus riches au monde.

À la mine Katinniq, la minéralisation consiste en des lentilles de sulfures massifs situées à la base de coulées de komatiite (laves riches en magnésium, c.-à-d. qui contiennent de 20% à 30% de MgO). Ces lentilles sont principalement constituées de pyrrhotite (Fe_{1-x}S), de chalcopryrite et de pentlandite localement accompagnée de covellite. Les éléments du groupe du platine se trouvent plutôt sous forme de phases mineures dans des minéraux du groupe du platine ou, comme le cobalt, incorporés à même la structure minérale des minéraux sulfurés susmentionnés. Les zones de sulfures massifs, à la base des coulées (échantillon à gauche sur la Figure 2.5), passent vers le haut à des zones de disséminations à texture réticulée (ou « net-texture ») dans les péridotites (échantillon à droite, Figure 2.5). Ces coulées forment un complexe ultramafique localement marqué par des horizons gabbroïques ou sédimentaires.

Comme les installations de Raglan sont isolées de toutes ressources externes, le site possède toutes les infrastructures reliées aux activités d'une petite municipalité, incluant un complexe d'hébergement, une usine de traitement des eaux, une centrale énergétique et un aéroport. Un réseau de routes praticables toute l'année relie le complexe minier aux entrepôts et installations portuaires situés à Baie Déception. Les travailleurs y sont transportés en avion depuis le sud de la province, mais également à partir des villages Inuits avoisinants pour un horaire de travail par quarts de type *fly-in-fly-out* (voir la suggestion de vidéo portant sur la mine Raglan sous *Vidéos mines* dans la *Section 3- Ressources complémentaires*).

Sources :

<http://sigeom.mines.gouv.qc.ca>

<https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/minerals-metals-facts/nickel-facts/20519>

<https://www.ifpenergiesnouvelles.com/article/nickel-energy-transition-why-it-called-devils-metal>

<https://www.crmalliance.eu/cobalt>

<https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/minerals-metals-facts/platinum-facts/20520>

<https://www.ifpenergiesnouvelles.com/article/copper-energy-transition-essential-structural-and-geopolitical-metal>

<https://www.glencore.ca/fr/raglan>

SIGÉOM, 2021. Système d'information géominière du Québec, Nom du corps: Mine Raglan (Katinniq); Ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec.

CHALCOPYRITE



Figure 2.6 : Échantillon de chalcoppyrite, minéral de couleur jaune laiton avec un éclat métallique, provenant du secteur de Rouyn-Noranda, Abitibi, Québec (don de P. Mercier-Langevin).

La chalcoppyrite est un sulfure de fer et de cuivre (CuFeS_2 – Figure 2.6). Bien que le cuivre se retrouve occasionnellement à l'état natif dans la nature, les sulfures de cuivre telle la chalcoppyrite sont les constituants les plus communs des minerais de cuivre. Le cuivre est connu depuis très longtemps et a été le tout premier métal travaillé par les êtres humains car il est relativement malléable. D'anciennes traces de fusion du cuivre ont été datées de la première moitié du V^e millénaire avant J.-C. En alliage avec l'étain, le cuivre est à l'origine d'une révolution technologique; l'âge du bronze (2300 ans avant notre ère). Plus récemment, la capacité du cuivre à conduire l'électricité l'a rendu essentiel pour les énergies renouvelables.

Le cuivre est utilisé dans différentes industries, comme la fabrication d'équipements divers, et dans des projets de construction d'immeubles et d'infrastructures. On le retrouve également au cœur des génératrices géantes, des centrales électriques, des transformateurs, des moteurs électriques, des démarreurs et générateurs pour automobiles, ainsi que dans l'ensemble de nos appareils

électroménagers et électroniques tels ordinateurs, cellulaires, consoles de jeux vidéo, etc. Au Canada, plus de la moitié du cuivre consommé annuellement est utilisé dans le domaine de l'électricité, surtout sous forme de fil. Des câbles de cuivre souterrains forment les réseaux de communication et de distribution d'électricité qui desservent les populations urbaines et rurales. Le cuivre est également essentiel à tous les organismes vivants à titre d'oligoélément alimentaire. Le corps adulte contient entre 1,4 et 2,1 milligrammes de cuivre par kilogramme de poids corporel.

La transition vers une économie numérique et l'utilisation croissante des technologies nouvelles liées aux énergies renouvelables comme les cellules solaires, les éoliennes et les véhicules électriques devraient accroître la production de cuivre. En effet, les véhicules électriques ont besoin de deux à quatre fois plus de cuivre que les véhicules conventionnels.

La chalcoppyrite se retrouve dans une multitude d'environnements géologiques de compositions et d'âges variés et est fréquemment associée à d'autres métaux tels l'or, le zinc, le nickel et les éléments du groupe du platine (p.ex. platine, palladium, iridium). Au Québec, les principales sources de cuivre proviennent des gisements dits de type sulfures massifs volcanogènes localisés en Abitibi (p. ex. la mine LaRonde Penna* à Preissac) et des gisements magmatiques associés aux intrusions magmatiques mafiques-ultramafiques (riche en magnésium) localisées dans le Nord-du-Québec (p. ex. la mine Raglan* au Nunavik). (*voir échantillons de sulfures massifs volcanogènes contenus dans la mallette « Mines et minéraux » et échantillons de minerai de nickel décrit plus haut).

Sources :

<https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/faits-mineraux-metaux/faits-sur-le-cuivre/20577>

Côté, T., Fradette, N., et Lévesque, R., Module 3 : Les cailloux, des matériaux très modernes. Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Québec, 12 p.

MALACHITE ET CUIVRE NATIF

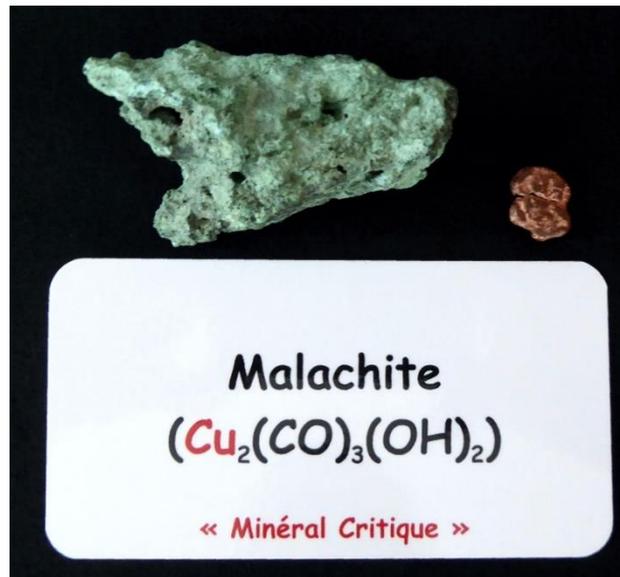


Figure 2.7 : Échantillon de malachite provenant de la région des Cantons de l'Est, Québec (don P. Mercier-Langevin) et échantillon de cuivre natif (collection CGC-Québec).

La malachite ($\text{Cu}_2(\text{CO})_3(\text{OH})_2$ – Figure 2.7) est un carbonate hydraté de cuivre (Cu) qui constitue le produit le plus connu de l'altération à l'air des minerais de cuivre et se présente généralement à l'état naturel sous forme d'encroûtements déclinant de belles nuances vertes. Elle est constituée de petits cristaux aciculaires se disposant en structure radiée, montrant souvent des surfaces finement zonées qui varient du vert pâle au vert foncé parfois irisé de mauve. Étant composée à près de 57% de cuivre, la malachite est à la fois utilisée comme minerai et pierre d'ornement. Elle est également très populaire auprès des adeptes de lithothérapie.

L'étymologie de la malachite est incertaine, elle peut venir de sa faible dureté (du grec malakos, « mou ») ou de sa couleur qui rappelle celle des feuilles de la mauve (du grec malakhê, « mauve »). La malachite est utilisée depuis l'Antiquité. Les Anciens lui prêtaient des vertus curatives (purgatives), et l'employaient comme parure des lieux de culte ou des personnes, y compris comme fard à paupières une fois réduite en poudre. Au Moyen Âge, elle était censée éloigner le « mauvais sort » et servait de colorant pour obtenir le vert de montagne. Aujourd'hui, la malachite est principalement taillée en objets de décoration ou pour la fabrication de bijoux.

Le cuivre natif est un minéral métallique qui peut se déposer dans les coulées de lave basaltique ainsi que dans la zone altérée d'un gîte de cuivre, en association avec la cuprite (Cu_2O), la malachite et l'azurite ($\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$). Le cuivre natif se trouve sous forme de masses ou de cristaux déformés de formes aplaties, d'écailles, de dendrites ou de fils. Le cuivre est le premier métal utilisé par l'humain, possiblement dû à l'abondance des minerais et à leur travail par fusion relativement facile. Au temps des Romains, il y avait à Chypre (Kypros) de très abondants gisements, ce qui explique le nom scientifique du cuivre : *cuprum*.

Sources :

<https://www.universalis.fr/encyclopedie/malachite/>

Bédard, P., 2009 (révision 2013). Clef d'identification des minéraux communs : cuivre

[<https://cours.polymtl.ca/PBedard/g1q1100/mineraux/cuivre/cuivre.html>]

Kourimsky, J. et Tvrz, F., 1977. Encyclopédie des minéraux; Gründ, Paris, 352 p.

EUDIALYTE

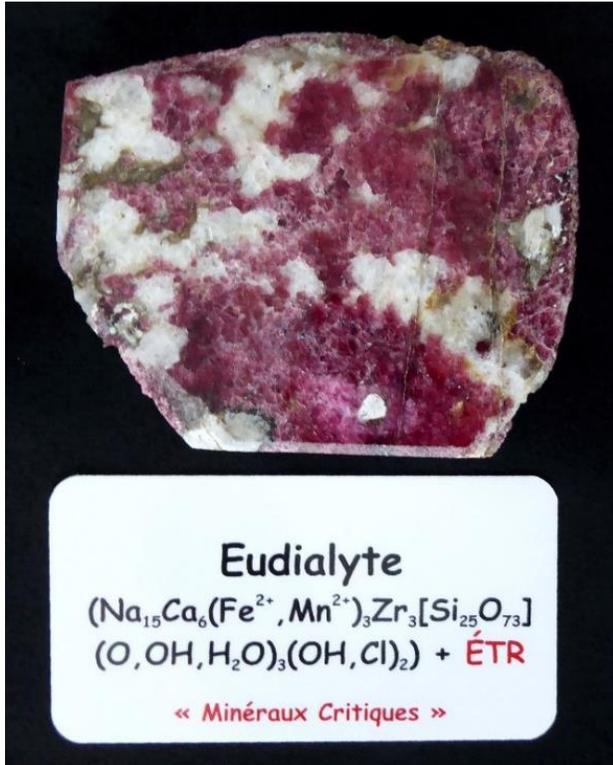


Figure 2.8 : Échantillon d'eudialyte (minéraux roses) provenant du gisement Kipawa, localisé au Témiscamingue, Québec (don de V. Bécu et P. Mercier-Langevin). L'eudialyte peut contenir des éléments de terres rares, ou ÉTR, qui sont indispensables à la fabrication de nombreux produits électroniques communs.

L'eudialyte (Figure 2.8) est un minéral rare, du sous-groupe des cyclosilicates, composé de sodium (Na), calcium (Ca) et zirconium (Zr), de formule chimique $\text{Na}_{15}\text{Ca}_6(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+})_3\text{Zr}_3[\text{Si}_{25}\text{O}_{73}](\text{O}, \text{OH}, \text{H}_2\text{O})_3(\text{OH}, \text{Cl})_2$. Dans certains cas, l'eudialyte peut présenter des enrichissements en éléments de terres rares (ÉTR) dont le lanthane (La), le cérium (Ce) et le néodyme (Nd).

Les ÉTR constituent un groupe de 15 éléments du tableau périodique appelés les lanthanides. Le scandium (Sc) et l'yttrium (Y) ont tendance à être associés aux mêmes gisements à cause de leurs

propriétés similaires aux éléments lanthanides. Les ÉTR constituent des composantes essentielles de nombreux appareils électroniques que nous utilisons au quotidien et qui servent à diverses applications industrielles, notamment l'électronique, l'énergie propre, l'aérospatial, l'automobile et la défense.

La fabrication d'aimants représente la plus grande et la plus importante utilisation des ÉTR, soit 38% de la demande. Les aimants permanents sont une composante essentielle des technologies électroniques modernes utilisées dans les téléphones cellulaires, les téléviseurs, les ordinateurs, les automobiles, les éoliennes, les avions à réaction et bien d'autres produits. Les ÉTR sont aussi largement utilisés dans les produits de pointe et écologiques en raison de leurs propriétés luminescentes et catalytiques.

Le Canada possède certaines des plus importantes réserves et ressources connues (mesurées et indiquées) au monde en ÉTR. Toutefois, il ne figure que depuis l'été 2021 parmi les producteurs d'ÉTR avec la mine de Nechalacho (Territoires du Nord-Ouest). Afin d'accroître la production, un certain nombre de projets d'exploitation sont en cours de développement. Au Québec, les principaux gisements de terres rares comprennent les gisements de Strange Lake et d'Ashram au Nunavik, et de Kipawa au Témiscamingue. L'échantillon de notre collection provient de ce dernier gisement. Dans le cas du gisement de Kipawa, les terres rares sont incorporés dans la structure minérale complexe de l'eudialyte, associée aux unités de syénite composant un complexe intrusif peralcalin (roches magmatiques contenant des minéraux riches en sodium et potassium tels l'aegyrine et l'arfvedsonite).

Sources :

<https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/faits-mineraux-metaux/faits-sur-les-elements-des-terres-rares/20631>

<https://gg.mines.gouv.qc.ca/portail-substances-minerales/>

Voir la « Section 3- Ressources complémentaires » pour compléments d'information et vidéos sur les terres rares.

FLUORITE



Figure 2.9 : Échantillon de fluorite provenant du complexe intrusif du lac Brisson/ gisement de Strange Lake, localisé sur la frontière Québec-Labrador au Nunavik, Québec (collection CGC-Québec).

La fluorite (ou fluorine – Figure 2.9) est un fluorure de calcium (CaF_2) et constitue le principal minerai de fluor (F). C'est un minéral d'éclat vitreux, de transparent à translucide et de couleur très variable (incolore, blanc, violet, jaune, bleu, vert), selon les inclusions d'éléments chimiques contenues dans le minéral. La fluorite est utilisée principalement pour la production d'acide fluorhydrique (HF) qui est utilisée, entre autres, dans la confection de fluorocarbures pour les gaz réfrigérants et les agents gonflants des mousses de polyuréthane, mais également pour la production de polymères, solvants, produits chimiques et batteries au lithium. Elle sert aussi à la fabrication de produits

fluorés dérivés comme le fluorure d'aluminium (AlF_3), qui est employé comme additif pour abaisser la température des bains d'électrolyse utilisés dans la fabrication de l'aluminium.

On utilise également la fluorite comme fondant pour la fabrication de l'acier ainsi que dans la fabrication de verre, de fibres de verre, d'émaux de céramique et de baguettes de soudure. Tandis que le fluorure de calcium sert dans la fabrication d'instruments optiques (microscope, spectrographe, télescope).

Il existe plusieurs types de gisements de fluorite, les principaux étant stratiforme, filonien ou de remplissage de fissure, et associés aux complexes ignés alcalins ou aux pegmatites. Plus de 50% de la production mondiale de fluor provient de la Chine et ses exportations sont en déclin. Bien qu'aucun gisement de fluorite ne soit présentement en exploitation au Canada, certains projets d'exploration et de définition des ressources sont en cours dont une reprise potentielle des activités à l'ancienne mine St. Lawrence à Terre-Neuve ainsi que des travaux d'exploration sur la propriété Liard Fluorspar localisée dans le nord de la Colombie-Britannique. Au Québec, plusieurs gîtes et indices ont été découverts dans les provinces géologiques du Grenville et des Appalaches, notamment dans les régions de l'Outaouais, des Laurentides et de la Côte-Nord. La fluorite est également observée au complexe intrusif du Lac Brisson/Strange Lake, localisé sur la frontière Québec-Labrador, en bordure d'une intrusion circulaire composée de granites peralcalins (roches magmatiques contenant des minéraux riches en sodium et potassium tels l'aegyrine et l'arfvedsonite). Des minéralisations en zirconium (Zr), yttrium (Y), niobium (Nb) et éléments terres rares (ÉTR) sont associées aux niveaux pegmatitiques du complexe granitique.

Sources :

<https://gq.mines.gouv.qc.ca/lexique-stratigraphique/province-de-churchill/pluton-du-lac-brisson/>
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/portail-substances-minerales/>
<https://www.crmalliance.eu/fluorspar>

GRAPHITE

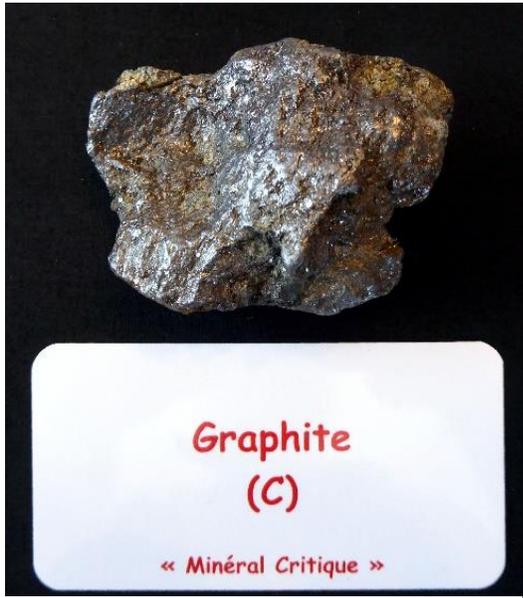


Figure 2.10 : Échantillon de graphite (collection CGC-Québec)

Le graphite (C – Figure 2.10) est un minéral tendre (dureté de 1,5 sur l'échelle de Mohs) et son éclat grasseyé et luisant en ont fait un excellent substitut au plomb, élément avec lequel il a d'ailleurs été apparenté jusqu'au XVIII^e siècle. Le minéral est alors appelé graphite en référence à son utilisation pour l'écriture. À l'origine utilisé à l'état brut dans la confection des mines de crayons, le graphite est désormais mélangé avec de l'argile céramique ce qui permet de varier la dureté de la mine en fonction des proportions de l'un ou l'autre des matériaux. Ainsi, plus la proportion d'argile céramique est importante, plus la mine du crayon est dure et inversement, s'il y a plus de graphite, la mine s'en trouvera plus tendre et laissera un tracé plus épais et foncé. Aujourd'hui, les fabricants utilisent des numérotations associées aux lettres H (*hard* – dure) et B (*bold* – gras/tendre) pour indiquer les différents degrés de dureté de leurs crayons.

Le graphite constitue également un composant essentiel à la fabrication des batteries au lithium-ion qui propulsent les véhicules électriques ainsi que la majorité de nos appareils électroniques modernes tel que les cellulaires, les ordinateurs portables, les montres intelligentes, etc. Il s'agit du matériau principal pour fabriquer l'anode, la partie de la batterie qui absorbe le courant. Fait intéressant, il faut de 20 à 30 fois plus de graphite que de lithium pour faire des batteries lithium-ion. Ainsi, 10 kg de graphite sont nécessaires pour un véhicule hybride alors qu'il en faut environ 40-50 kg pour un véhicule entièrement électrique.

Au Québec, le graphite est exploité à la mine Stratmin dans le secteur du Lac-des-Îles, localisée au sud de Mont-Laurier dans les Hautes-Laurentides. La minéralisation de graphite est associée à des bandes de marbres dolomitiques, de marbres calcitiques*, de quartzites et de roches calcosilicatées appartenant à la Ceinture centrale de roches métasédimentaires du sud-ouest de la Province de Grenville. Le projet Matawinie est également en développement à Saint-Michel-des-Saints, dans la région de Lanaudière. Ce projet, piloté par l'entreprise Nouveau Monde Graphite, entrevoit devenir l'une des plus grosses exploitations à ciel ouvert entièrement opérée par des véhicules électriques. Le graphite s'y présente en paillettes fines à grossières, disséminées dans des niveaux de paragneiss à biotite-graphite d'épaisseur variable (10-15 m). Il est localement accompagné de sulfures de fer (pyrrhotite, pyrite). (* voir échantillon de marbre contenu dans la mallette « Roches sédimentaires et fossiles »)

Sources :

<https://fr.canson.com/conseils-dexpert/le-crayon-mine-graphite>

<https://nouveau monde.groupe.fr/operations/>

<https://gq.mines.gouv.qc.ca/portail-substances-minerales/graphite/>

Pour un complément d'information sur la batterie lithium-ion, voir la « Section 3- Ressources complémentaires ».

Le graphite et le diamant sont tous deux des polymorphes du carbone, c'est-à-dire qu'ils sont tous deux exclusivement constitués d'atomes de carbone, mais ceux-ci ont cristallisé selon des structures différentes, sous des conditions de pression et de température distinctes. Ainsi, le carbone constituant le graphite forme des structures hexagonales placées en couches les unes sur les autres (feuillets), rendant le minéral très friable. Dans un diamant, les atomes sont plutôt organisés dans une structure tridimensionnelle conférant la dureté si exceptionnelle de ce minéral (dureté de 10 sur l'échelle de Mohs).

Les diamants sont des xénoctaux réfractaires (cristaux étrangers au magma dans lequel ils se trouvent), emportés lors de la remontée d'un magma kimberlitique* dans le manteau lithosphérique sous-continentale (Figure 2.11). Ici, le magma est juste un véhicule qui transporte les diamants rapidement vers la surface sous des conditions de haute pression et haute température, ce qui les empêche de se transformer en graphite. (*voir échantillon de kimberlite contenu dans la mallette « Roches magmatiques »)

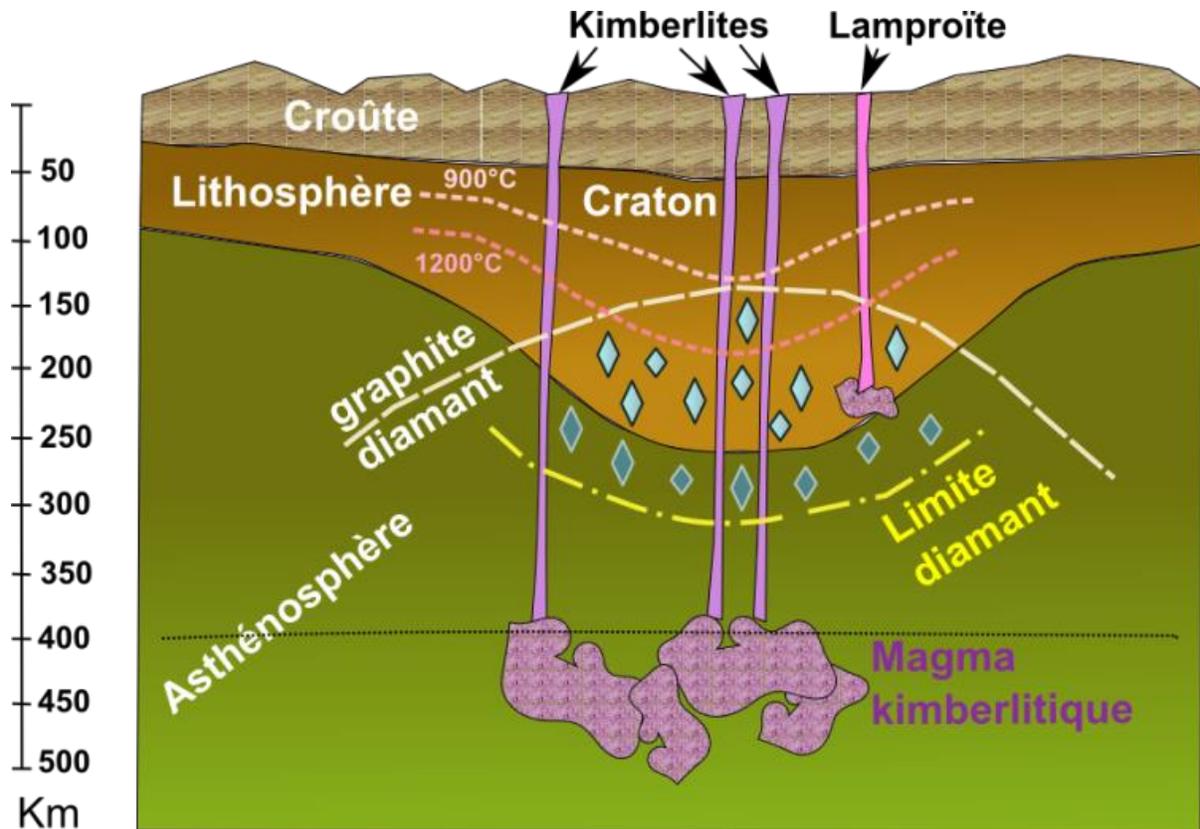


Figure 2.11 : Schéma illustrant les divers champs de stabilité du graphite et du diamant ainsi que le mécanisme de mise en place des diamants dans la croûte continentale lors de la remontée d'un magma kimberlitique localisé en grande profondeur dans le manteau terrestre. (source : https://www.pairform.fr/doc/17/138/500/web/co/grain2_1_2.html)

SPODUMÈNE

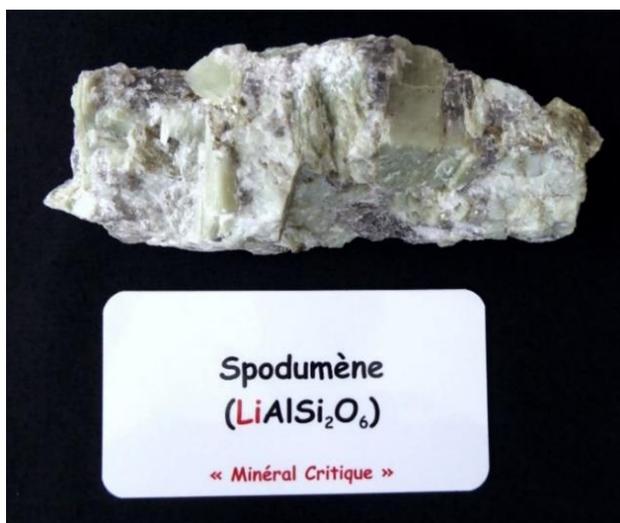


Figure 2.12 : Échantillon de spodumène (minéraux vert pâle) provenant du site minier North American Lithium, localisé à La Corne en Abitibi, Québec (don de P. Mercier-Langevin).

Le spodumène est un silicate d'aluminium (pyroxène) et de lithium ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) de couleur vert pomme à blanc (Figure 2.12) qui se retrouve dans les pegmatites (roches magmatiques à grains grossiers) en cristaux de taille parfois gigantesque (p. ex. les « crystal logs » de la mine Etta au Dakota du Sud atteignent 14 m de long). Il est commun que le spodumène soit associé à des minéraux qui présentent également un potentiel économique en éléments des terres rares (ÉTR).

Le lithium (Li) contenu dans le spodumène a longtemps été exploité pour son intégration dans la fabrication de céramiques, de verres et de graisses lubrifiantes. Toutefois, le lithium est désormais considéré comme l'un des 31 éléments critiques pour la transition vers une économie numérique et à faibles émissions de carbone du pays. En effet, le lithium étant l'élément chimique le plus électropositif et le métal le plus léger, il constitue actuellement un élément de choix pour la fabrication de batteries lithium-ion qui sont à la fois rechargeables tout en ayant une haute densité de charge, c'est-à-dire qu'elles peuvent stocker beaucoup d'énergie par unité de volume et par unité de masse. Elles sont donc plus petites et légères qu'un grand nombre d'autres types de batteries. De plus, les batteries lithium-ion se déchargent relativement lentement et, comparativement aux autres technologies, elles fonctionnent à de grands écarts de température. Ces batteries sont utilisées dans les véhicules électriques ainsi que dans une multitude d'autres menus appareils électroniques tels ordinateurs, cellulaires, montres intelligentes, écouteurs sans fil, et bien d'autres. Le lithium est aussi utilisé dans la fabrication de médicaments pour traiter les troubles bipolaires dans le but de régulariser l'humeur.

Les principales ressources et réserves de lithium dans le monde se retrouvent dans trois types de gisement : (1) les pegmatites, incluant la famille des pegmatites granitiques riches en lithium-césium-tantale (LCT) et certaines intrusions peralcalines (roches magmatiques contenant des minéraux riches en sodium et potassium tels l'aegyrine et l'arfvedsonite), (2) les argiles volcaniques, où le lithium est concentré dans l'hectorite ou d'autres minéraux argileux, et (3) les saumures (et les dépôts hydromorphes, p. ex. les salars de la cordillère des Andes), où le lithium était initialement en solution mais a ensuite été concentré par évaporation ou par des processus géothermiques. Au Québec, quelques gisements ont été exploités et plusieurs projets sont présentement sous étude pour une relance éventuelle (p. ex. North American Lithium, anciennement Québec Lithium, La Corne, Abitibi) ou sont en phase d'étude de faisabilité (p. ex. projet Whabouchi, Eeyou Istchee Baie-James). Ceux-ci sont contenus dans des pegmatites de type LCT où le lithium est concentré dans des minéraux de spodumène.

Sources :

<https://gq.mines.gouv.qc.ca/portail-substances-minerales/>

<https://www.rncan.gc.ca/la-science-simplifiee/balados/quel-type-de-batterie-trouve-t-on-dans-les-vehicules-electriques-element-naturels/22213>

<https://parlonsscience.ca/ressources-pedagogiques/les-stim-en-contexte/comment-fonctionne-une-batterie-lithium-ion>

Robert J. Howell, Laura Lagos, Camilo R. de los Hoyos and Julien Declercq, 2020. Classification and Characteristics of Natural Lithium Resources; *Elements*, v.16 (4), p. 259–264. doi: <https://doi.org/10.2138/gselements.16.4.259>

Pour un complément d'information sur la batterie lithium-ion, voir la « Section 3- Ressources complémentaires ».

MOLYBDÉNITE

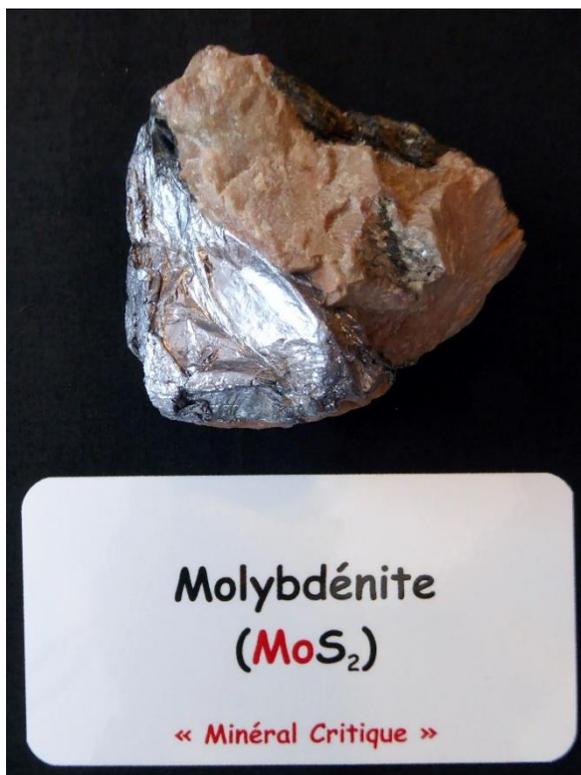


Figure 2.13 : Échantillon de molybdénite (minéral gris argenté – collection CGC-Québec).

La molybdénite (MoS_2 – Figure 2.13) est le principal minéral de molybdène (Mo). L'étymologie du mot molybdénite viendrait *de molybdos*, qui signifie plomb en grec, minéral avec lequel on l'avait confondue à l'origine. Dans l'Ancienne Grèce, ce terme désignait non seulement le plomb et la molybdénite, mais aussi des minéraux analogues comme la galène (PbS), le graphite (C) et certains minéraux renfermant de l'antimoine (Sb). Ce n'est qu'en 1778 que le chimiste suédois Scheel a séparé la molybdénite des autres minéraux portant le même nom.

Le molybdène est un élément métallique gris argenté dont le point de fusion est particulièrement élevé (2610°C). C'est un important élément dans les alliages de fer et d'aciers et dans les alliages de spécialité.

Utilisé couramment comme métal réfractaire (thermorésistant), le molybdène entre aussi dans la composition de catalyseurs, de colorants et de pigments. En sidérurgie, l'addition de molybdène donne de la dureté, de la force, de la résistance à la corrosion et augmente la soudabilité. La molybdénite est quant à elle utilisée à titre de lubrifiant solide et sert d'additif pour les graisses et les huiles.

Au Canada, le molybdène est extrait en Colombie-Britannique en tant que sous-produit dans quelques mines exploitant des gisements de types porphyres à cuivre-molybdène-or. Les minéralisations en chalcopirite (CuFeS_2), bornite (Cu_5FeS_4), pyrite (FeS_2), molybdénite (MoS_2), chalcocite (Cu_2S), covellite (CuS), sphalérite (ZnS), galène (PbS), et cuivre natif de ces gisements sont principalement encaissées dans des veines et stockwerks qui recoupent des intrusions granitiques polyphasées de compositions variant de granodiorite à diorite quartzifère, monzonite quartzifère porphyrique à granodiorite, et tonalite. La production de cette commodité a considérablement diminué ces dernières années et, avec une production annuelle de 170 tonnes métriques de molybdène en 2021, le Canada n'occupait alors que le 9^e rang mondial des producteurs. Les grands producteurs de molybdène sont la Chine (130 000 tonnes), le Chili (51 000 tonnes) et les États-Unis (48 000 tonnes).

Sources :

<https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/molybene>

<https://minfile.gov.bc.ca/searchresults.aspx?23=890&27=Any&t=1>

<https://investingnews.com/daily/resource-investing/industrial-metals-investing/molybdenum-investing/top-molybdenum-producers/>

Kourimsky, J. et Trvz, F. 1977. Encyclopédie des minéraux : Gründ, Paris, 352 p.

PYROCHLORE



Figure 2.14 : Échantillon de pyrochlore (petits minéraux noirs) provenant de la mine Niobec, localisée à Saint-Honoré, Québec (don de P. Mercier-Langevin).

Le pyrochlore $((\text{Na}, \text{Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH}, \text{F}))$ – Figure 2.14) est un oxyde complexe de niobium (Nb), sodium (Na) et calcium (Ca) qui forme des cristaux vitreux bruns à noirs, généralement octaédriques, mais apparaissant parfois en masses irrégulières. Le pyrochlore est le principal minéral exploité pour le niobium.

Le niobium résiste à de nombreux produits chimiques et est facilement malléable même à basse température. Principalement utilisé comme agent d'alliage à l'acier (plus de 90% du marché), le niobium permet de réduire le poids de l'acier tout

en le rendant plus résistant à la corrosion. Ceci se traduit par des économies notables des coûts de construction en permettant la confection de structures plus grandes, plus minces et plus légères utilisant moins d'acier entre autres lors de la construction des structures de bâtiments, des ponts ou des armatures en béton. L'industrie automobile s'intéresse de plus en plus au niobium, car en permettant la diminution du poids des voitures, les émissions de GES se trouvent également réduites entraînant une baisse de consommation de carburant. Le niobium est également utilisé comme supraconducteur et se comporte bien à des températures aussi basses que le zéro absolu (-273°C) ce qui en fait un élément intéressant tant pour les accélérateurs de particules et les appareils d'imagerie par résonance magnétique que pour la confection de fusées et de satellites (Apollo 11 était fait à 60% d'acier au niobium).

Au Canada, le niobium est extrait de la mine Niobec, située à Saint-Honoré, à proximité de la ville de Saguenay (Québec). Cette mine est l'une des trois seules mines de niobium dans le monde, les deux autres étant localisées au Brésil. Il s'agit également de la seule mine souterraine. La minéralisation est constituée de minéraux de forme bipyramidale contenant du niobium, le pyrochlore et accessoirement la colombite ($\text{Fe}^{2+}\text{Nb}_2\text{O}_6$), disséminés à travers une roche hôte d'origine magmatique, de forme annulaire, quasi circulaire, composée à plus de 50% de carbonates (calcite, dolomite), connue sous le nom de complexe de carbonatite* de Saint-Honoré. Une fois extrait, le minerai de pyrochlore est acheminé au concentrateur où, à la suite d'un traitement en nombreuses étapes, un concentré composé à 58% de pentoxyde de niobium (Nb_2O_5) est obtenu. Chaque tonne de minerai (1000 kg) fournit en moyenne 3,4 kg de pentoxyde de niobium. Par la suite, la conversion du concentré en ferroniobium (FeNb), comme utilisé par l'industrie, est effectuée sur place à l'aide d'une réaction aluminothermique, un procédé pyrométallurgique utilisé pour la production de métaux. Ce n'est qu'après une période de refroidissement, que le ferroniobium est concassé aux dimensions exigées par chaque aciérie, emballé dans des contenants de 10 à 1500 kg, et expédié partout dans le monde. (* voir échantillon de carbonatite contenu dans la mallette « Roches magmatiques »)

Sources :

<https://www.magrispm.com/niobec>

SIGÉOM, 2021. Système d'information géominière du Québec, Nom du corps: Mine Niobec; Ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec.

Côté, T., Fradette, N., et Lévesque, R., Module 3 : Les cailloux, des matériaux très modernes. Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Québec, 12 p.

TITANOMAGNÉTITE



Figure 2.15 : Échantillon de titanomagnétite (minéraux gris métallique) provenant de la suite intrusive du Lac Doré localisée à Chibougamau, Québec (don de P. Mercier-Langevin).

Le vanadium (V) est un métal blanc, argenté, dur, ductile et résistant à la corrosion. C'est un bon conducteur de chaleur et d'électricité. Il est présent naturellement dans plus d'une soixantaine de minéraux différents et, en raison de sa nature d'élément trace, il est essentiellement extrait de concentrés de magnétite, un oxyde de fer ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$) ou de titanomagnétite, un oxyde de fer-titane ($\text{FeV}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$ – Figure 2.15), reconnu pour être hautement magnétique.

De 80 à 90% du vanadium est utilisé dans les alliages pour la fabrication d'acier de haute résistance mécanique. Ces aciers sont utilisés à des fins diverses telles que les bâtiments, les ponts, les oléoducs, les gazoducs et les navires. Le vanadium est utilisé dans l'acier en raison de sa solidité, de sa ténacité et de sa résistance à la chaleur et à l'usure. En plus de renforcer de manière

significative les alliages d'acier, le vanadium diminue également les processus de corrosion et d'oxydation.

Le vanadium est également utilisé dans la confection des batteries redox VRB (vanadium redox-flow batteries). Celles-ci sont chimiquement et structurellement différentes des batteries au lithium. Elles ont une durée de vie dix fois plus longue, peuvent se charger et se décharger en même temps, tout en étant capables de libérer d'énormes quantités d'électricité instantanément. Les VRB peuvent tout alimenter, d'une simple maison aux réseaux électriques où elles peuvent stabiliser le flux d'énergie provenant des éoliennes et des panneaux solaires et garantir un approvisionnement énergétique continu. Outre les VRB, les batteries à base de lithium-vanadium-phosphate fournissent plus d'énergie pendant de plus longues périodes et se rechargent plus rapidement que les batteries au lithium-cobalt.

Les magnétites vanadifères se retrouvent principalement dans les roches ignées mafiques stratifiées, principalement en Afrique du Sud, et des gisements d'uranium gréseux en Russie, en Chine et aux États-Unis. Le vanadium est également récupéré dans le pétrole brut vénézuélien, où il est présent en petites quantités. Bien qu'il soit souvent exploité comme sous-produit, le vanadium peut tout de même constituer la commodité principale comme dans l'exemple du projet d'exploration avancé du Lac Doré (VanadiumCorp Resource Inc.) localisé à Chibougamau au Québec. La minéralisation de vanadium d'intérêt économique y est associée à des lits massifs à disséminés de titanomagnétite encaissés dans des horizons de compositions variant d'anorthosite à pyroxénite en passant par des gabbros plus ou moins anorthositiques appartenant à une importante intrusion stratiforme identifiée comme la Suite intrusive du Lac Doré. Avec des zones minéralisées qui peuvent être suivies sur une distance d'environ 3 km et sur une épaisseur qui varie entre 200 et 300 m, le projet du Lac Doré constitue l'une des plus importantes ressources de vanadium en Amérique du Nord.

Sources :

<https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/metaux/metaux-proprietes-vanadium.jsp>

<https://gq.mines.gouv.qc.ca/lexique-stratigraphique/province-du-superieur/suite-intrusive-du-lac-dore/>

<https://mineralseducationcoalition.org/elements/vanadium/>

<https://www.crmalliance.eu/vanadium>

ILMÉNITE

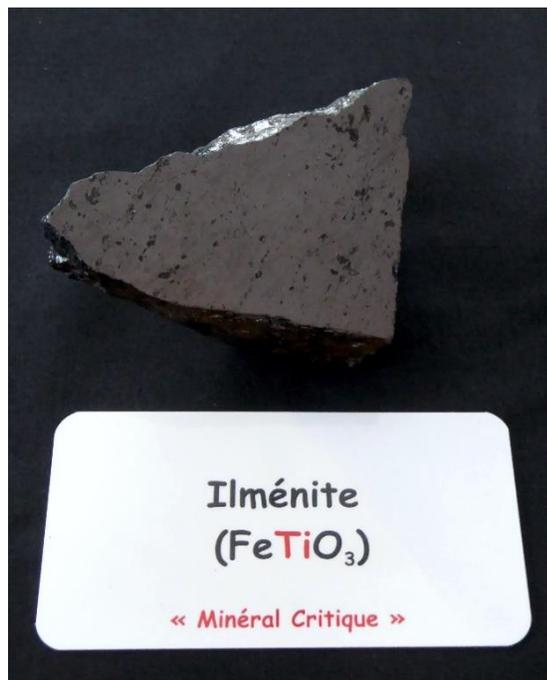


Figure 2.16 : Échantillon d'ilménite provenant des anciennes exploitations dans le secteur de Saint-Urbain, dans la région de Charlevoix, Québec (don de P. Mercier-Langevin).

Tirant son nom des Titans de la mythologie grecque, le titane (Ti) est un métal dur, brillant et blanc. Il est très résistant à la corrosion et n'est généralement pas affecté par l'air, l'eau, les acides ou les bases. Le titane est très commun dans la croûte terrestre, étant le 9^e élément en abondance. On le trouve également dans les météorites, le soleil et la lune. Les spectres de l'oxyde de titane sont d'ailleurs utilisés par les astronomes pour identifier les étoiles naines rouges froides. Le titane est principalement obtenu à partir des minéraux comme le rutile (TiO₂) et l'ilménite (FeTiO₃ – Figure 2.16). Il est exploité en Australie, en Sierra Leone, en Afrique du Sud, en Russie et au Japon.

Le titane a de nombreuses utilisations, notamment dans la production chimique et la création d'alliages légers et solides. Le titane est aussi solide que l'acier, mais 45% plus léger. Sa température de fusion élevée est utile dans les applications à haute température où le poids est important, notamment dans les moteurs et autres pièces des avions et des vaisseaux spatiaux. Le titane est résistant à la corrosion de l'eau de mer, il est donc populaire pour la fabrication d'appareillages qui sont constamment exposés à la mer. L'ancienne Union soviétique a construit plusieurs de ses coques de sous-marins en titane, ce qui en fait des sous-marins très solides et très coûteux. Le dioxyde de titane est utilisé comme colorant dans certaines peintures blanches et comme additif alimentaire jaune. Il est également opaque aux rayons ultraviolets et est souvent utilisé dans les lotions solaires. Le titane est utilisé dans les feux d'artifice, en raison des couleurs qu'il produit lorsqu'il est brûlé.

Le Québec est le seul producteur d'ilménite en Amérique du Nord avec la mine du lac Tio, localisée au nord de Havre-Saint-Pierre au Québec. La compagnie Rio Tinto Fer et Titane y exploite l'un des plus vastes gisements d'ilménite massive au monde encaissé dans un complexe anorthositique, constitué de roches magmatiques plutoniques principalement composées de plagioclases*. D'autres exemples de minéralisations similaires ont été reconnus dans la province, notamment dans le secteur de Saint-Urbain où plusieurs productions artisanales datant du XX^e siècle y sont répertoriées. L'ilménite est également un minéral commun sur la lune et il est fort probable que toute future colonie utilisera le titane comme principal matériau de construction. L'ilménite est également perçue par certains comme une source potentielle pour la production d'oxygène en sol lunaire. (* voir échantillon d'anorthosite contenu dans la mallette « Roches magmatiques »)

Sources :

<https://mineralseducationcoalition.org/elements/titanium/>

<https://gq.mines.gouv.qc.ca/portail-substances-minerales/>

<https://www.space.com/esa-oxygen-from-lunar-regolith-demonstration.html>

SPHALÉRITE



Figure 2.17 : Échantillon de sphalérite provenant de la mine Chisel North, localisée à Snow Lake, Manitoba (don de P. Mercier-Langevin).

La sphalérite (Figure 2.17), un sulfure de zinc (ZnS) de couleur brun-noir à jaune et d'éclat semi-métallique à résineux. Il s'agit du principal minéral exploité pour son contenu en zinc (Zn).

Le zinc sert surtout à plaquer le fer et l'acier afin de leur donner une plus grande résistance à la rouille et à la corrosion par un procédé de galvanisation. C'est environ 48% de la consommation mondiale de zinc qui y est destinée. L'industrie de l'automobile est la principale consommatrice d'acier galvanisé. Le zinc peut également être allié à d'autres métaux et utilisé pour le moulage sous pression de pièces comme des poignées de porte.

Allié au cuivre, il sert à former du laiton et allié avec le cuivre et l'étain, il permet de former du bronze. Des raccords en laiton sont utilisés en plomberie dans les maisons partout au Canada et entrent dans la fabrication d'équipements d'échanges thermiques.

Le zinc est aussi couramment utilisé dans les batteries non rechargeables, dites alcalines. Cependant, il semblerait que des chercheurs aient réussi à créer une batterie rechargeable coûtant beaucoup moins cher qu'une batterie lithium-ion, et ce, en utilisant du zinc et de l'air de comme électrodes. Les recherches sont en cours, mais cette technologie pourrait éventuellement concurrencer la technologie lithium-ion, actuellement largement utilisée dans les véhicules électriques.

Cet élément peut également être ajouté aux engrais afin d'accroître le rendement des cultures et, lorsque transformé en oxyde de zinc, il devient un ingrédient qui entre dans la composition de crèmes pour la peau et de shampoings en plus d'être utilisé dans la fabrication de pneus.

La sphalérite est un minéral communément associé à la chalcopryrite (minerai de cuivre) dans les gisements de type sulfures massifs volcanogènes. Au Canada, de gros et nombreux gisements se retrouvent dans le Bouclier canadien et les Appalaches. Au Québec, le camp minier de Matagami, à quelques 200 km au nord de la ville de Rouyn-Noranda, fut l'un des principaux producteurs de zinc où pas moins de 12 mines y ont été exploitées depuis 1963. La dernière, la mine Bracemac-McLeod, a cessé ses opérations au mois de juin 2022. Le zinc est également un sous-produit, tout comme l'argent et le cuivre, du gisement d'or de la mine LaRonde Penna*, à Preissac en Abitibi. (*voir échantillons dans la mallette « Mines et Minéraux »)

Les matériaux recyclés permettent de répondre à environ 10 % de la demande mondiale de zinc. La ferraille d'acier galvanisé et les piles sont les principales sources de zinc recyclé. Les produits comme l'acier galvanisé ont une longue durée de vie, ce qui a une incidence sur la quantité de matériaux disponibles sur le marché pour le recyclage pour une année donnée.

Sources :

<https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/faits-mineraux-metaux/faits-sur-le-zinc/20632>

Côté, T., Fradette, N., et Lévesque, R., Module 3 : Les cailloux, des matériaux très modernes. Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Québec, 12 p.

From Rock To Technology - Du roc à la technologie

INTERESTING FACTS ABOUT CELL PHONES:

- In 1983, Motorola presented the world with the first smartphone for a mere \$4,000 per phone
- Nokia has sold the most smartphones worldwide – their 1100 model has been purchased by over 250 Million users
- The average person unlocks his/her smartphone 110 times each day
- 80% of the world's population has a smartphone
- Phones today are more powerful than the computer originally used for the moon landing
- Nearly 65% of emails are opened on mobile phone devices

QUE SAIT ON SUR LES « SMARTPHONE » ?

- En 1983, Motorola a présenté au monde entier le premier téléphone intelligent (smartphone) à un prix unitaire de 4 000 \$
- Nokia a vendu le plus de ces téléphones à travers le monde leur modèle 1100 a été acheté par plus de 250 millions d'utilisateurs
- La personne moyenne déverrouille son téléphone intelligent 110 fois chaque jour
- 80% de la population mondiale possède un « smartphone »
- Les téléphones d'aujourd'hui sont plus puissants que l'ordinateur utilisé à l'origine pour l'alunissage
- Près de 65% des courriels sont consultés sur des appareils de téléphonie mobile



SCREEN / ÉCRAN

SILICA SILICE	INDIUM	TIN ÉTAIN
QUARTZ	SPHALERITE SPHALÉRITE	CASSITERITE CASSITÉRITE

SPEAKER / HAUT PARLEUR

IRON OXIDE OXIDE DE FER	STRONTIUM
IRON ORES (Hematite/Goethite)	CELESTITE CÉLESTINE
MINERALS DE FER (Hématite/Goethite)	
COPPER CUIVRE	CERAMICS CÉRAMIQUES
CHALCOPYRITE	KAOLINITE

**CAPACITORS
CONDENSATEURS**

MANGANESE
MANGANÈSE

PYROLUSITE

CASE / BOITIER

STAINLESS STEEL ACIER INOXYDABLE	IRON FER
HEMATITE SPECULARITE L'HÉMATITE SPÉCULARITE	HEMATITE HÉMATITE
CHROMIUM CHROME	CARBON CARBONE
CHROMITE	GRAPHITE

**BUTTONS
TOUCHES**

PETROLEUM
PRODUCTS
PRODUITS
PÉTROLIERS

BITUMINOUS SANDS
SABLES BITUMINEUX

CIRCUIT BOARDS / CIRCUITS IMPRIMÉS

SILICON SILICIUM	NATIVE COPPER CUIVRE NATIF	GOLD OR
QUARTZ		
SILVER ARGENT	PLATINUM PLATINE	CLAYS ARGILE
		KAOLINITE

BATTERY / PILE

LITHIUM	COBALT	SILICON SILICIUM
SPODUMENE SPODUMÈNE	PENTLANDITE	QUARTZ

Section 3 : Ressources complémentaires

Affiches thématiques:		
Ressources naturelles Canada (RNCAN)	Liste des minéraux critiques du Canada 2021	Minéraux critiques (rncan.gc.ca)
Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF)	Les terres rares et leurs usages (GT 2012-01)	https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/l1102_examine?l=F
Ressources gouvernementales :		
RNCAN	Minéraux critiques	Minéraux critiques (rncan.gc.ca)
Gouvernement du Québec	Minéraux d'avenir	Minéraux d'avenir Gouvernement du Québec (quebec.ca)
MRNF	Fascinantes terres rares	https://mern.gouv.qc.ca/mines/trousse-educative/conferences/
Wavrant et al.	Projet terres rares au Québec (MB 2017-17)	https://sigeom.mines.gouv.qc.ca/signet/classes/l1102_examine?l=F
Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)	Ressources minérales : les terres rares	https://www.brgm.fr/fr/actualite/dossier-thematique/ressources-minerales-terres-rares#:~:text=Le%20groupe%20des%20terres%20rares,denn%C3%A9e%20%C3%A9conomique%20et%20m%C3%Aame%20g%C3%A9opolitique.
Sources diverses :		
Radio-Canada	Voitures électriques : le Canada devra développer le secteur minier	Texte de La Presse canadienne du 16 décembre 2021 expliquant qu'il faudra plus de minéraux et de métaux entrant dans la fabrication de batteries pour véhicules électriques. https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1847977/vehicules-electriques-multipliation-production-metaux-mineraux-pour-batteries
Radio-Canada	L'évolution du climat menace la sécurité énergétique, selon une agence onusienne	Texte de Valérie Boisclair du 11 octobre 2022 soulignant qu'avant d'augmenter la production d'énergies renouvelables qu'il faudrait consommer mieux et diminuer la consommation énergétique par habitant au Canada et au Québec. https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1923935/energies-renouvelables-transition-securite-onu-wmo-transformation-systeme
Centre international de référence sur le cycle de vie des produits procédés et services (CIRAIG).	Analyses du cycle de vie comparative des impacts environnementaux potentiels du véhicule électrique et du véhicule conventionnel dans un contexte d'utilisation québécois	Rapport technique préparé pour Hydro-Québec, avril 2016 : https://www.hydroquebec.com/developpement-durable/documentation-specialisee/analyse-cycle-de-vie.html

Parlons Sciences	Les STIM en contexte : Comment fonctionne une batterie lithium-ion?	https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/les-stim-en-contexte/comment-fonctionne-une-batterie-lithium-ion
Vidéos et balados batterie au lithium et terres rares:		
RNCan (balado)	La science simplifiée : Quel type de batterie trouve-t-on dans les véhicules électriques	Vous êtes-vous déjà demandé ce qui se cache sous le capot d'un véhicule électrique? Quel type de batterie on y trouve? À quel point ces batteries diffèrent de celles que l'on trouve dans les véhicules à essence? L'ingénieure Kathleen Lombardi répond à nos questions concernant les batteries de véhicules électriques. https://www.rncan.gc.ca/la-science-simplifiee/balados/quel-type-de-batterie-trouve-t-on-dans-les-vehicules-electriques-elements-naturels/22213
RNCan (vidéo)	La science simplifiée : Séparation des métaux du groupe des terres rares	Petite vidéo portant sur la technique de séparation des métaux terres rares. Belle introduction à la métallurgie et retour sur les propriétés physiques des minéraux (utilisation du magnétisme comme procédé de séparation). Groupes du secondaire et plus. Durée 2:08 minutes, traduction et sous-titres en français. https://www.youtube.com/watch?v=DWDmjwX-CkA
Pitron, G. (vidéo)	TEDxLile : Métaux rares : la face cachée de la transition énergétique	Bonne suggestion pour présentation à des groupes du secondaire et plus. Offre une occasion de réflexion sur le concept des énergies dites « propres » et invite l'auditeur à questionner son mode de consommation. Durée 17:08 minutes, en français avec sous-titres anglais. https://www.youtube.com/watch?v=LVWUDLBYb-Q
Lespagnol, Q. et Marchal, A. (vidéo)	Ressources 21 : La séparation et le traitement des minerais	Vidéo portant sur les diverses techniques de séparation et de traitement du minerai avec application des minéraux recueillis dans les objets de la vie quotidienne. Belle introduction à la métallurgie et retour sur les propriétés physiques des minéraux (p.ex. utilisation du magnétisme comme procédé de séparation). Aperçus des enjeux en approvisionnement des métaux terres rares et ouverture vers le recyclage de nos biens de consommation. Groupes du secondaire et plus. Offre un beau complément à la conférence TED « Métaux rares : la face cachée de la transition énergétique/ G. Pitron » Durée 6:40 minutes, en français. https://www.youtube.com/watch?v=PM39u5B2T9M
Radio-Canada (vidéo)	La voiture électrique, pas si écologique	Reportage de Jean-Sébastien Cloutier diffusé au Télé-Journal 18h30 Montréal de Radio-Canada, accompagné d'un texte signé Thomas Gerbet. Offre une occasion de réflexion sur le véritable aspect écologique de la voiture électrique et invite

Mallette « Minéraux critiques » - Section 3

		<p>l'auditeur à se questionner sur le concept de mobilité et son mode de déplacement.</p> <p>Durée 4 :16 minutes, en français</p> <p>https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1137184/voiture-electrique-pollution-empreinte-environnement-batterie-production-fabrication</p>
Vidéos mines:		
Minalliance	L'exploitation minière à ciel ouvert	<p>Explication détaillée de l'exploitation d'une mine à ciel ouvert, durée 4 :33 minutes (2010), en français : https://www.youtube.com/watch?v=GxLTltXWtA&t=93s</p> <p>Bonne suggestion pour présentation à des groupes du 5-6e année et plus. Aperçu bien détaillée des installations et étapes de l'exploitation minière en fosse, survol des différents corps de métier. Peut-être suivi de la vidéo présentant une visite guidée de la mine Laronde, mine souterraine.</p>
Mines QC	Nous sommes descendus à 3 km de profondeur dans le sous-sol québécois	<p>Visite guidée et présentation des travailleurs à la mine LaRonde, en Abitibi, durée 5 :14 minutes (2018), en français : https://youtu.be/RR22jBcssiE</p> <p>Très bonne suggestion pour présentation à des groupes de 5-6e année et plus. Aperçu des installations, présentation du minerai exploité, du travail sous-terre et des divers corps de métiers œuvrant dans la mine.</p>
AgnicoEagleVideos	The Mining Process - Le processus d'exploitation minière - 2015	<p>Animation portant sur l'exploitation d'une mine sous-terrainne de grande profondeur (~ 3 km), durée 3 :00 minutes (2015), texte français-anglais : https://youtu.be/UCmQKkoVghU</p>
Mines QC	À la rencontre des gens qui travaillent à l'extrémité nord du Québec	<p>Visite et rencontre du personnel de la mine de nickel Raglan, localisée dans le Grand-Nord québécois, durée 6 :28 minutes (2018), en français : https://www.youtube.com/watch?v=r4P9Cyg08Tg</p> <p>Présentation surtout des gens, des rigueurs du climat et de l'horaire de travail selon un horaire fly-in fly-out.</p>
<p>Les vidéos ci-dessous ont été présentées dans le cadre de la Journée Découvertes de Québec Mines en 2018 et à la Tempêtes des Science du Cégep Garneau en 2022. Il s'agit de vidéos sans texte montrant les infrastructures actuelles dans des mines sous-terrainnes exploitée au Québec. Bonnes suggestions de support visuel lors d'expositions :</p>		
AgnicoEagleVideos	Mine LaRonde, Abitibi	<p>Vidéo montrant les installations et les travailleurs à la mine LaRonde, durée 2:55 minutes (2015): https://www.youtube.com/watch?v=5DMf-ly_rM4</p>
AgnicoEagleVideos	LaRonde 3D Animation 2013	<p>Camp minier Doyon-Bousquet-LaRonde, Animation 3D montrant les infrastructures sous-terrainnes, durée 2:07</p>

Mallette « Minéraux critiques » - Section 3

		minutes (2013): https://www.youtube.com/watch?v=91OSfZj8xos
Newmont Goldcorp	Éléonore, Eeyou Istche, Baie James - visite virtuelle souterraine	Éléonore – visite virtuelle souterraine, durée 6:10 minutes (2015): https://youtu.be/F_ssMQQpdtw

Section 4 : Sources citées

Un aluminium sans carbone; une nouvelle ère pour l'aluminium; Elysis. <<https://www.elysis.com/fr>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Bédard, P., 2009 (révision 2014). Clef d'identification visuelle des minéraux communs; Polytechnique Montréal. <<https://cours.polymtl.ca/PBedard/glq1100/mineraux/identification.html>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Bokovay, G., Duchesne, L. and Fong, D.G., 2006 (modification 2013). Molybdène; L'Encyclopédie Canadienne. <<https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/molybene>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Chapman, B., 2019. Les STIM en contexte : Comment fonctionne un batterie lithium-ion?; Parlons Sciences. <<https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/les-stim-en-contexte/comment-fonctionne-une-batterie-lithium-ion>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Chevalier, P. et Baker, N., 2006 (modification 2020). Aluminium au Canada; L'Encyclopédie canadienne. <<https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/aluminium>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Commission géologique du Canada (CGC); RNCAN. <<https://www.rncan.gc.ca/science-et-donnees/centres-de-recherche-et-laboratoires/la-commission-geologique-du-canada/17101>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Côté, T., Fradette, N., et Lévesque, R., Module 3 : Les cailloux, des matériaux très modernes; Département de géologie et génie géologique, Université Laval, Québec, 12 p.

Le crayon à mine graphite; Canson. <<https://fr.canson.com/conseils-dexpert/le-crayon-mine-graphite>
<<https://nmg.com/operations/>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Critical Raw Materials Alliance. <<https://www.crmalliance.eu/critical-raw-materials>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Faits sur les minéraux et les métaux; RNCAN. <<https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/faits-mineraux-metaux/20603>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Fondation géologique du Canada (FGC). <<http://www.canadiangeologicalfoundation.org/>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Foucault, A. et Raoult, J.-F., 1995. Dictionnaire de géologie, 4^e édition; Masson, Paris, 324 p.

Gautier, Y., Malachite; Universalis. <<https://www.universalis.fr/encyclopedie/malachite/>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Hache, E., Les métaux dans la transition énergétique; IFP Energies nouvelles (IFPEN). <<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/climat-environnement-et-economie-circulaire/les-metaux-transition-energetique>> [consulté le 3 mars, 2022]

Hache, E., Barnet, C., et Seck, G.-S., 2020. Le cuivre dans la transition énergétique : un métal essentiel, structurel et géopolitique!; IFP Energies nouvelles (IFPEN), Les métaux dans la transition énergétique, no. 2. <<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/cuivre-transition-energetique-metal-essentiel-structurel-et-geopolitique>> [consulté le 3 mars, 2022]

Hache, E., Barnet, C., et Seck, G.-S., 2021. Le nickel dans la transition énergétique : pourquoi parle-t-on de métal du diable ?; IFP Energies nouvelles (IFPEN), Les métaux dans la transition énergétique, no. 5. <<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/nickel-transition-energetique-pourquoi-parle-t-metal-du-diable>> [consulté le 3 mars, 2022]

Infrastructures essentielles du Canada; Sécurité publique Canada. <<https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/ntnl-scrtr/crtcl-nfrstrctr/cci-iec-fr.aspx>> [consulté le 5 mars, 2022]

Kourimsky, J. et Tvrz, F., 1977. Encyclopédie des minéraux; Gründ, Paris, 352 p.

Lexique stratigraphie du Québec; Ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec. <<https://gq.mines.gouv.qc.ca/lexique-stratigraphique/>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Mineral Inventory for British Columbia (MINFILE), Commodity: Molybdenum; Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources. <[MINFILE Mineral Inventory \(gov.bc.ca\)](https://www.minfile.gov.bc.ca/)> [consulté le 9 novembre, 2022]

Minerals Education Coalition. <<https://mineralseducationcoalition.org/elements/vanadium/>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Mine Raglan; Glencore Canada. <<https://www.glencore.ca/fr/raglan>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Minéraux critiques, RNCAN. <<https://www.rncan.gc.ca/nos-ressources-naturelles/mines-materiaux/mineraux-critiques/23415>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Niobec; Magris. <<https://www.magrispm.com/niobec>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Nouveau Monde Graphite. <<https://nouveau monde.group/fr/operations/>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Perron, L. et Law-west, D., 2006 (modification 2013). Chrome; L'Encyclopédie Canadienne. <<https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/chrome>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Pistilli, M., 2022. Molybdenum Investing: Top 10 molybdenum producers by country (updated 2022); Investing News Network. <<https://investingnews.com/daily/resource-investing/industrial-metals-investing/molybdenum-investing/top-molybdenum-producers/>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Plan canadien pour les minéraux et les métaux (PCMM). <<https://www.minescanada.ca/fr/>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Pultarova, T., 2021. European startup builds oxygen-making machine for 2025 moon mission; Space.com. <<https://www.space.com/esa-oxygen-from-lunar-regolith-demonstration.html>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Robert J. Bowell, Laura Lagos, Camilo R. de los Hoyos, et Julien Declercq, 2020. Classification and Characteristics of Natural Lithium Resources; Elements, v.16 (4), p. 259–264.
doi: <https://doi.org/10.2138/gselements.16.4.259>

Salze, D., Arndt, N., Lopez, L., et Raimbault, L., Gisement de diamant dans les kimberlites; Classification des ressources minérale, RMDI. <https://www.pairform.fr/doc/17/138/500/web/co/grain2_1_2.html> [consulté le 9 novembre, 2022]

La science simplifiée, Balado : Quel type de batterie trouve-t-on dans les véhicules électriques (Éléments naturels); RNCAN. <<https://www.rncan.gc.ca/la-science-simplifiee/balados/quel-type-de-batterie-trouve-t-on-dans-les-vehicules-electriques-elements-naturels/22213>> [consulté le 9 novembre, 2022]

SIGÉOM, 2021. Système d'information géominière du Québec; Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec. <<http://sigeom.mines.gouv.qc.ca>> [consulté le 15 avril, 2021]

Substances minérales au Québec; Ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec. <<https://gq.mines.gouv.qc.ca/portail-substances-minerales/>> [consulté le 9 novembre, 2022]

Thomas, P., 2014. Cube, cubo-octaèdre, octaèdre, dodécaèdre... les différentes formes cristallines de la pyrite (FeS₂); Planet-Terre, École normale supérieure de Lyon. < <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/lmg475-2014-11-10.xml>> [consulté le 13 septembre, 2018]