

Les ressources minérales et l'Homme

Un essai sur l'exploitation par l'Homme des ressources minières que recèle la partie superficielle de notre planète.

Jacques Deferne



Mine de cuivre de Chuquibambilla, Chili

L'homme vit des richesses minières

Avant-propos

Certains minéraux disséminés dans les roches renferment des éléments chimiques dont nous avons besoin pour notre vie courante. Ils sont activement recherchés pour les très nombreux usages que nous en faisons.

Les métallurgistes ont besoin des métaux les plus divers, les industries chimiques ont besoin de substances non métalliques pour confectionner tous leurs produits, l'agriculture a besoin de phosphates, de potasse et d'azote, et les fournisseurs d'énergie ont besoin de charbon, d'hydrocarbure, de gaz et d'uranium. Ces matières premières indispensables au fonctionnement de nos industries comportent :

- les ressources métalliques que sont les métaux ferreux, les métaux non ferreux, les métaux précieux, les métaux légers, d'autres métaux encore qui entrent dans la composition de divers alliages, les métaux des terres rares, les métaux de l'industrie nucléaire;
- les ressources non métalliques représentées par de nombreux minéraux et roches nécessaires aux besoins de la chimie ou de l'industrie de la construction;
- les ressources énergétiques que sont le charbon, le pétrole, le gaz et l'uranium.¹

Nous ne grattons que la partie superficielle de notre planète

Les mines les plus profondes atteignent à peine 3'000 mètres et les forages les plus profonds ne dépassent que rarement 6'000 mètres.

La croûte terrestre, cette partie de notre planète qui nous est à peu près accessible, mesure en moyenne 30 km d'épaisseur. En comparaison, un timbre poste collé sur un ballon de football est encore dix fois plus épais que ne l'est la croûte terrestre sur notre planète.



Tout a commencé il y déjà fort longtemps

Nous exploitons de très nombreuses mines pour nos besoins industriels et pour notre confort. Tout a commencé il y a fort longtemps : les hommes primitifs ont très vite recherché le sel pour leur alimentation. Pour se réchauffer et cuire leurs aliments, il leur a fallu en premier lieu du bois ou du charbon. Le silex leur a permis de confectionner quelques outils primitifs. Puis la découverte fortuite d'un peu de métal au fond d'un foyer les a amenés à rechercher des roches riches en fer, en étain, en cuivre ou en or. La métallurgie balbutiante a permis de confectionner des pointes de flèche, des outils plus perfectionnés et des parures en or.

C'est pour notre confort !

Ainsi, de progrès en progrès, l'exploitation du sous sol de notre planète a pris une ampleur considérable. La seule production de fer représente aujourd'hui environ 3.5 milliards de tonnes par an, celle de l'aluminium est d'environ 45 millions de tonnes.

On estime que la quantité annuelle des roches exploitées uniquement pour les métaux représente une vingtaine de milliards de tonnes ! On exploite encore près de 8 milliards de tonnes de charbon. Quant au pétrole, on en produit 15 milliards de litres chaque jour !

¹ nous ne traiterons pas dans cet ouvrage des ressources énergétiques.

Ces richesses ne sont pas inépuisables

Par notre mode de vie et par l'explosion démographique qui nous submerge, nous sommes devenus tributaires de l'industrie minière et dépendons complètement de l'énergie que nous fournissent le pétrole, le gaz, le charbon et l'uranium. Les réserves de ces richesses minérales ne sont pas inépuisables et pour certaines substances, les réserves connues ne sont que de l'ordre d'une dizaine d'années ! Par ailleurs, elles sont très inégalement réparties dans le monde et des luttes de pouvoir entre pays riches en minerais divers et pays dont l'industrie est fortement demandeuse de ces minerais créent des tensions politiques qui seront de plus en plus difficiles à gérer. L'estimation des réserves des divers minerais disponibles dont nous aurons besoin dans dans l'avenir est difficile à établir. Elle dépend du prix auquel nous sommes prêts à les payer !

Minéral et minerai

Il faut distinguer ces deux termes qui se ressemblent et qui concernent des usagers différents. Un **minéral** est une substance chimique cristallisée qui intéresse les minéralogistes, les collectionneurs de minéraux et et les géologues. Un minéral est une substance cristallisée. Pour le définir, il faut connaître sa composition chimique et sa structure cristalline².

Minerai est un terme de mineur et d'exploitant minier qui désigne la partie économique d'un gisement. Ainsi un minerai de cuivre peut être constitué des divers minéraux de cuivre : chalcopirite $CuFeS_2$, chalcosine Cu_2S ou malachite $Cu_2(CO_3)(OH)_2$, par exemple.



Minerai de cuivre : chalcopirite
disséminée dans du quartz,



Minéral :
cristal de pyrite, Espagne

Le minerai lui même n'est qu'une partie du matériel brut qu'on extrait d'un gisement. Ce matériel brut est souvent appelé le **tout-venant**. L'extraction de la partie utile d'un minerai est suivie de la séparation des minéraux qui le constituent et qui subiront à leur tour les diverses opérations nécessaires pour en extraire le métal recherché.

Taille des exploitations

Tous les minerais facilement accessibles à la surface du sol et dont l'extraction ne nécessite pas de transformation industrielle ont entraîné la création de petites exploitations artisanales. Les dépôts alluvionnaires d'or, les affleurements de pegmatites plus ou moins altérées renfermant des pierres précieuses ou des minéraux facilement exploitables comme la cassitérite ou la colombotantalite, donnent lieu à des exploitations artisanales souvent illégales et, bien souvent, sans aucune mesure de sécurité.

² Voir du même auteur "Au coeur des minéraux" (www.kasuku.ch)



Exploitation artisanale de la colombo-tantalite au Nord Kivu.

Exploitation d'une petite mine d'or, Kola, Cameroun

Coût d'exploitation

C'est souvent le coût des travaux qui conditionne la taille d'une exploitation. Economiquement, il faut que les coûts d'une exploitation soient couverts par la valeur à laquelle le minerai peut être vendu. Dans les exploitations artisanales, ce sont des mineurs indépendants qui vivent de l'espoir d'une bonne trouvaille qui accomplissent un travail dangereux et peu rémunéré. Souvent aussi, la petite taille du gisement ne permet pas d'entreprendre des travaux miniers importants.

A l'opposé, un volume important de la zone minéralisée permet d'envisager de travaux préliminaires importants dont on est certain qu'ils seront rentabilisés par l'exploitation ultérieure du minerai.

Le prix des métaux sont fluctuants

Les prix des matières premières sont dictés par l'offre et la demande. Lorsqu'une crise économique survient, la demande diminue et les prix baissent. Par exemple, si le cours du cuivre baisse, les mines les moins rentables devront cesser leur activité. Elles ne reprendront leur exploitation que lorsque les cours se relèveront.

Les coûts d'exploitation ne doivent donc pas dépasser les coûts de vente du produit. Cela incite beaucoup d'exploitants miniers à faire travailler les mineurs pour des salaires de misère ou dans des conditions de sécurité très insuffisantes.

Mais tout cela, c'est pour notre confort et nous ne voulons pas voir cette réalité lorsque nous achetons un téléphone portable ou d'autres accessoires dont les composants ont souvent été produits au prix de souffrances et de privations pour les mineurs qui ont aidé à les produire.

Gigantisme de certaines mines

Prenons l'exemple de la mine de Chuquicamata située dans le désert d'Atacama au Nord du Chili à une altitude comprise entre 2'700 et 3'000 mètres d'altitude. Cette mine renferme à elle seule 13% des réserves mondiales connues de cuivre. Accessoirement on y extrait aussi du molybdène.

Exploitée à ciel ouvert, la carrière mesure 5 km de longueur, 3 km de largeur et la profondeur atteint 850 mètres. Une noria de camions géants arrachent chaque jours plus de 600'000 tonnes de roches qui sont ensuite dirigées vers de gigantesques usines de traitement.

On y exploite une roche renfermant environ 1% de cuivre, soit 10 kg de cuivre pour une tonne de minerai. C'est un gisement de type dit "porphyrique". Il s'agit d'une roche éruptive, une granodiorite, traversées par de petits filons remplis de sulfures de cuivre (chalcopyrite, tétraédrite, bornite...).

En surface le minerai a subi l'oxydation météoritique et on rencontre alors des minéraux riches en oxygène : carbonates (malachite, azurite), oxydes (cuprite), silicates (chrysocolle) par exemple.



*Mine de cuivre à ciel ouvert de Chuquibambilla au Chili.
Pour donner une idée des dimensions, la hauteur de chaque gradin est de 26 mètres.*

L'extraction

*Le minerai recherché n'est généralement présent qu'en quelques pour cent par rapport à la masse rocheuse. Il faut donc extraire des quantités gigantesques de roche puis séparer le minerai intéressant de sa gangue dans d'immenses installations qui serviront à extraire la partie économiquement recherchée de la masse stérile qui sera ensuite rejetée sur des **terrils**.*

Dans le cas de Chuquibambilla, pour atteindre la zone minéralisée au fond de la carrière, il faut élargir la carrière en enlevant des volumes considérables de roche stérile. Le rapport entre le volume du minerai exploité et le volume des roches stériles déplacé est actuellement de 1 à 3.



Terrils pouvant atteindre 300 mètres de hauteur



Camion d'une capacité de 370 tonnes



Pelleteuse géante utilisée au fond de la carrière

Le coût de l'exploitation en carrière augmente avec la profondeur de l'excavation. On va donc arrêter prochainement l'exploitation en carrière et la poursuivre par une exploitation souterraine.

Les matériaux stériles ainsi que les résidus non utiles des usines de traitement sont entreposés sur de gigantesques terrils. Près de 9'000 ouvriers sont employés dans les divers travaux de la mine et du traitement du minerai.

Le traitement du minerai

Le but est de séparer les minéraux recherchés du tout-venant³ de la mine. Cela commence par l'étape du concassage qui aboutit en une première fragmentation plus ou moins grossière des matériaux.

Le concassage est suivi du broyage qui réduit le minerai en poudre jusqu'à une granulométrie qui permet aux minéraux recherchés d'être libérés de leur gangue.

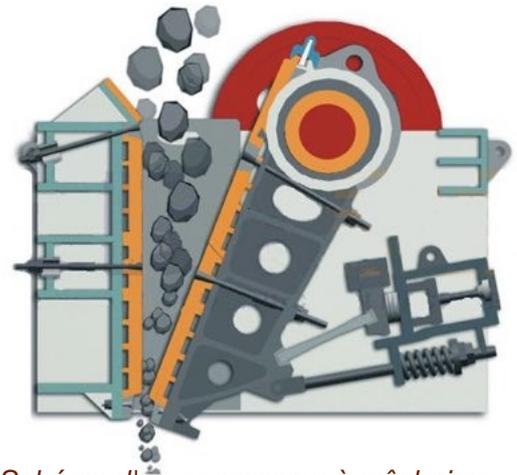
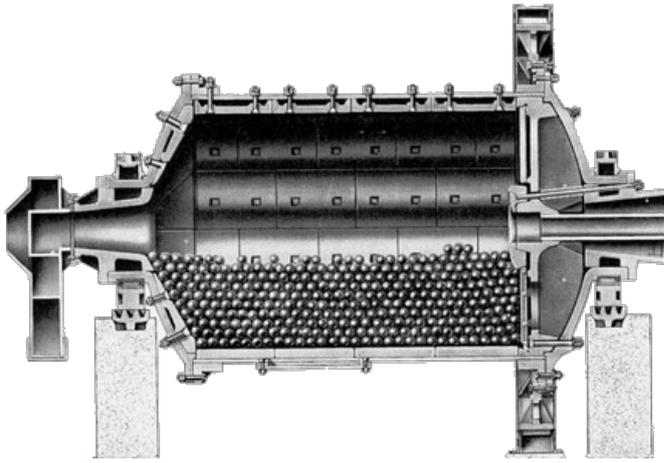


Schéma d'un concasseur à mâchoires

³ On appelle "tout-venant" le matériau brut récolté sur le gisement

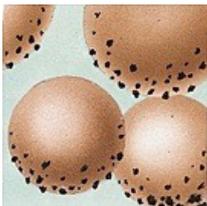


Broyeur à boulets

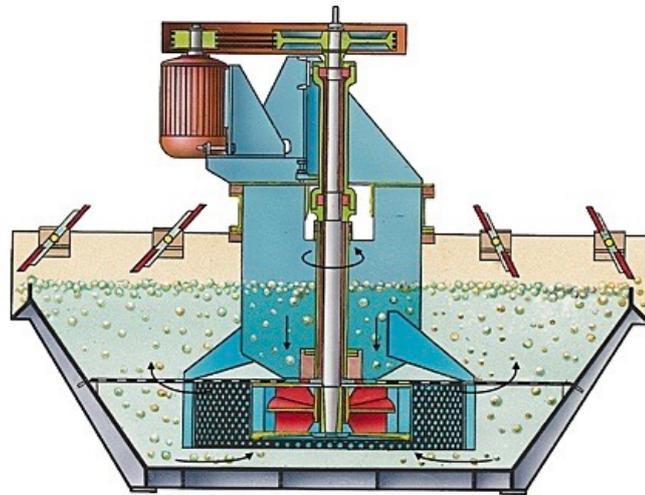
Ce broyeur est constitué d'un grand cylindre rempli de boulets de fonte. En tournant avec une vitesse choisie, les boulets sont entraînés vers le haut et retombent en cascade sur le minerai à broyer.

La flottation

*Dans l'exemple de Chuquicamata, le minerai est séparé de sa gangue par un procédé qu'on appelle **flottation**. Ce procédé est basé sur la capacité de certains produits chimiques de modifier les propriétés de surface de la matière minérale. Minerai et gangue finement broyés sont mélangés à de l'eau pour former une boue liquide à laquelle on ajoute certains additifs chimiques qui rendent les grains du minerai hydrophobes. Puis on injecte à la base de l'air sous pression. Les particules de sulfures de cuivre hydrophobes adhèrent alors aux bulles d'air qui, comme des mini-ballons, montent en surface et forment une mousse riche en cuivre. Ce procédé porte le nom de flottation.*



Minerai adhérant aux bulles



Coupe d'une cellule de flottation

Où trouve-t-on les minerais ?

Abondance des éléments dans la croûte terrestre

Les éléments chimiques sont très inégalement représentés au sein de la croûte terrestre. Dix éléments totalisent à eux seuls plus du 99 % du monde minéral. Selon qu'on exprime leur abondance en poids (ce qui intéresse les mineurs) ou en nombre d'atomes (ce qui intéresse les chimistes), les chiffres diffèrent à cause des masses très différentes des divers atomes.

Ainsi l'hydrogène, qui est extrêmement léger, apparaît en quatrième position si on compare des nombres d'atomes mais seulement en dixième position si on compare les masses. Les atomes d'oxygène sont non seulement les plus nombreux mais ils figurent parmi ceux qui ont le plus grand rayon atomique. On peut presque dire que les atomes d'oxygène forment de gigantesques assemblages compacts entre les interstices desquels prennent place les petits atomes métalliques !

Les 10 éléments les plus abondants dans la croûte terrestre

En poids			En nombre d'atomes		
Oxygène	O	46,1%	Oxygène	O	60,2
Silicium	Si	28,2	Silicium	Si	20,3
Aluminium	Al	8,3	Aluminium	Al	6,2
Fer	Fe	5,6	Hydrogène	He	2,9
Calcium	Ca	4,2	Sodium	Na	2,5
Sodium	Na	2,4	Calcium	Ca	1,9
Potassium	K	2,1	Fer	Fe	1,9
Magnésium,	Mg	2,3	Magnésium	Mg	1,8
Titane	Ti	0,5	Potassium	K	1,3
Hydrogène	H	0,1	Titane	Ti	0,2
Total :		99,8			99,2

Les 82 autres atomes sont donc très rares ou extrêmement rares. Le carbone qui nous paraît si abondant dans notre environnement ne représente que 0.001 % de la croûte terrestre. Le cuivre qui nous est si familier n'est présent qu'à raison de 0.0001% et le plomb que pour 0.000014 %.

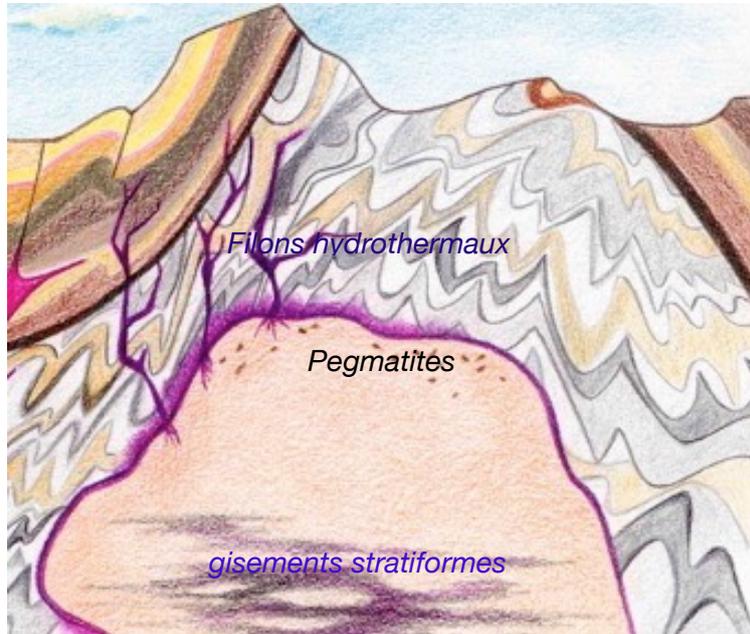
D'où l'intérêt d'avoir de bons géologues qui sauront découvrir où se trouvent les concentrations de minerai suffisantes pour l'exploitation des matériaux dont nous avons besoin.

Gisements primaires

La plupart des minerais que nous recherchons ont pour origine les roches éruptives profondes. Ce sont des roches issues de la cristallisation extrêmement lente d'un magma en profondeur, à une dizaine de km sous nos pieds environ.

Prenons comme exemple un batholite de granite. C'est généralement une masse rocheuse liquide ou pâteuse, d'au moins une dizaine de km³ qui a pénétré d'une manière intrusive dans l'écorce terrestre, sans pouvoir accéder à sa surface. Restée en profondeur, cette masse se refroidit extrêmement lentement. La vitesse de refroidissement est très lente. Elle n'excède pas quelques degrés par millions d'années.

Lors du refroidissement de cette masse magmatique, les minéraux les plus réfractaires, c'est-à-dire ceux qui cristallisent les premiers, ont très souvent un poids spécifique plus élevé que celui du magma. Ils ont alors tendance à sombrer vers le fond de la masse magmatique encore fluide où ils peuvent constituer des accumulations stratiformes. Les grands gisements de fer de Suède (magnétite), ou de chrome de Turquie (chromite), sont le résultat d'accumulations de ce type.



Représentation schématique d'un batholite granitique.

Dans les pegmatites

Vers la fin du processus de cristallisation du magma, alors que presque toute la masse est déjà solidifiée, les composés les plus volatils se condensent dans les parties marginales du massif magmatique sous forme de liquides résiduels silicatés qui ont la particularité d'être riches en bore, fluor, phosphore, lithium et en quelques autres éléments chimiques peu fréquents. En se refroidissant, ils donnent naissance à des associations minérales intéressantes qu'on nomme **pegmatites**.

Le corps principal des pegmatites est constitué des mêmes minéraux que ceux de la roche mère : quartz, feldspaths et micas dans le cas d'une pegmatite issue d'un massif granitique. Les minéraux

sont caractérisés par un certain gigantisme : leurs dimensions peuvent dépasser plusieurs décimètres, voire plusieurs mètres. En outre, les minéraux montrent presque toujours des formes cristallines bien développées.

Ces minéraux constitutifs des pegmatites sont accompagnés de **minéraux occasionnels** parmi lesquels on trouve souvent la cassitérite, le principal minerai d'étain, la wolframite, un minerai de tungstène, la colombo-tantalite minerai de niobium et de tantale ou encore la monazite qui renferme des terres rares.

C'est aussi dans les pegmatites qu'on peut trouver des minéraux précieux : tourmaline, topaze, émeraude, grenats...



Pegmatite, Brésil : on distingue des cristaux d'orthose bien développés dont la taille atteint plus de 20 cm.

Dans les filons hydrothermaux

Après la formation des pegmatites, les liquides résiduels, qui renferment encore de nombreux éléments dissous, s'accumulent sous forme de **solutions hydrothermales**. Ce sont des solutions aqueuses très chaudes, d'une température toutefois inférieure à 500° C, qui, sous l'effet d'une pression élevée, s'infiltrent dans les fractures des roches encaissantes. Leur pression et leur température diminuent au fur et à mesure qu'elles se rapprochent de la surface de la croûte terrestre. Elles déposent sur les parois des fissures une succession de minéraux qui constituent les **filons hydrothermaux**.

La température de formation des minéraux décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du massif magmatique originel.

C'est dans ces filons qu'on trouve la plupart des sulfures métalliques bien connus, comme la pyrite, la galène, la blende, la chalcopryrite, la stibine et bien d'autres encore qui constituent les **minerais** recherchés des industriels. Ces filons renferment encore d'autres minéraux, parmi lesquels ceux que les mineurs appellent la **gangue**, soit les minéraux inintéressants du point de vue économique et qui accompagnent le minerai (calcite, dolomite, sidérite, barytine et quartz).

Tous les minéraux que nous venons de citer se forment dans l'environnement de massifs magmatiques, à des profondeurs qui peuvent dépasser dix kilomètres. Bien évidemment, ils n'apparaîtront en surface que des millions d'années plus tard, lorsque le processus inéluctable de l'érosion aura fait disparaître toutes les roches qui les surmontaient.



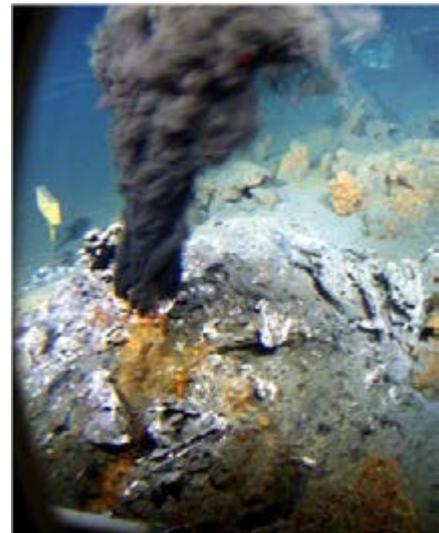
Bandes alternés de blende, chalcopryrite et galène et de quartz dans un filon hydrothermal

Haute température, basse température

Les minéralogistes distinguent encore les minéraux qui se sont formés à haute température de ceux qui ont été déposés par les solutions de basse température. Le tableau ci-dessous donne une idée de l'ordre de dépôt des minéraux dans les filons hydrothermaux. Il n'existe pas une limite bien tranchée entre le processus pegmatitique et le processus hydrothermal, si ce n'est l'apparition de l'eau sous sa forme condensée.

Fumeur noir, émission hydrothermale !

Un fumeur noir est une émission hydrothermale très chaude, environ 350°, riche en sulfures métalliques. elle se manifeste sur les dorsales océaniques à plusieurs milliers de mètres de profondeur. A cause de la forte pression hydrostatique, cette émission reste à l'état liquide.



Un "fumeur noir" au fond de l'océan
(photo viedesabysses.over-blog.com)

Apparition des minéraux dans les filons hydrothermaux

<i>haute température (300 - 500°)</i>	
<i>éléments</i>	<i>or, argent.</i>
<i>halogénures</i>	<i>fluorine.</i>
<i>sulfures</i>	<i>blende, galène, pyrite, chalcopryrite, arsénopyrite, bornite, chalcosine, pyrrhotine, nickéline, molybdénite, cobaltine.</i>
<i>oxydes</i>	<i>quartz, cassitérite, hématite, ilménite, magnétite, wolframite, rutil, anatase, brookite, uraninite.</i>

<i>moyenne température (200°-300°)</i>	
<i>éléments</i>	<i>or, argent, bismuth.</i>
<i>halogénures</i>	<i>fluorine.</i>
<i>sulfures</i>	<i>blende, pyrite, galène, chalcopryrite, bornite, chalcosine, nickéline, arsénopyrite, cobaltine, chloanthite, énergite, boulangérite, bournonite, polybasite, tennantite, tétraédrite.</i>
<i>oxydes</i>	<i>hématite, quartz, goethite, scheelite, wolframite.</i>
<i>carbonates</i>	<i>calcite, dolomite, sidérite, magnésite, whitérite.</i>
<i>sulfates</i>	<i>barytine, célestine.</i>
<i>phosphates</i>	<i>apatite.</i>
<i>silicates</i>	<i>épidote.</i>

<i>basse température (50°-200°)</i>	
<i>éléments</i>	<i>arsenic, antimoine, bismuth, or, argent, tellure.</i>
<i>halogénures</i>	<i>fluorine.</i>
<i>sulfures</i>	<i>argentite, chalcosine, cinabre, marcassite, miargyrite, pyrargyrite, proustite, stéphanite, tétraédrite, stibine, réalgar.</i>
<i>oxydes</i>	<i>calcédoine, opale, hématite, goethite, manganite.</i>
<i>carbonates</i>	<i>calcite, dolomite, sidérite, magnésite, strontianite.</i>
<i>sulfates</i>	<i>barytine, célestine.</i>
<i>silicates</i>	<i>groupe des zéolites.</i>

Gisements secondaires

Les roches éruptives accompagnées de leurs pegmatites et de leurs filons hydrothermaux prennent naissance en profondeur. Ces formations n'apparaîtront à nos yeux qu'après que l'érosion ait fait disparaître toutes les roches qui les recouvraient.

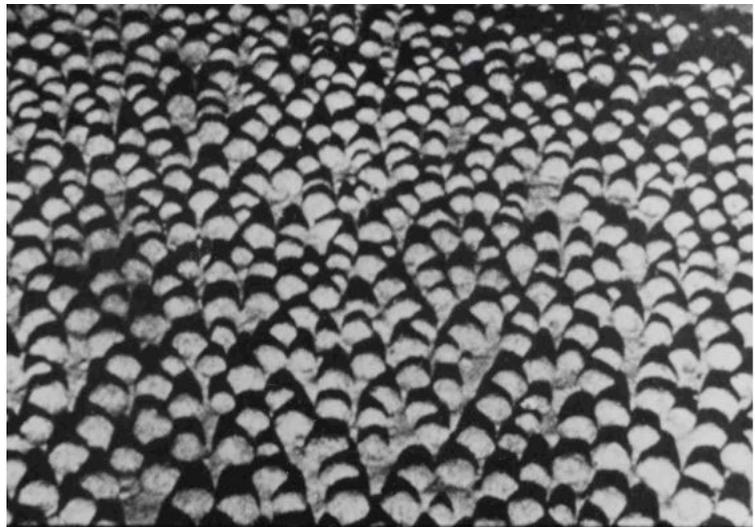
Atteintes à leur tour par l'action de l'érosion ces roches seront désagrégées et les minéraux recherchés se retrouveront libérés et stockés dans les alluvions. L'exploitation des dépôts alluvionnaires peut donner lieu à de petites exploitations artisanales ou à des méthodes plus importantes à l'aide de dragues.



Exploitation semi-artisanales d'or dans des alluvions

Les métaux de la mer

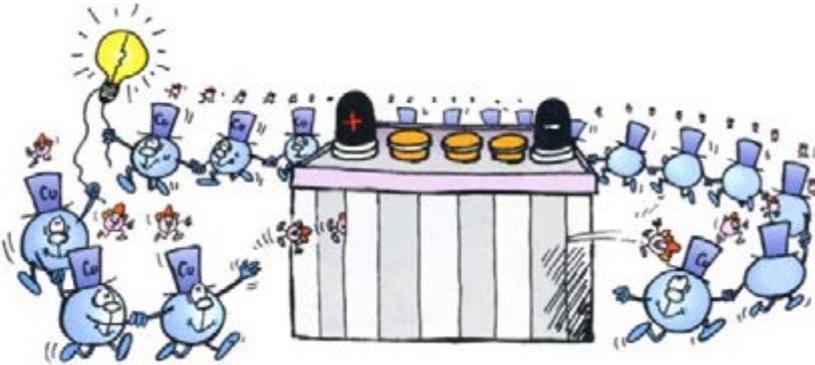
En de nombreux endroits, les fonds des grands océans sont recouverts par des concrétions en forme de nodules, constituées surtout d'hydroxydes de manganèse et de fer. Ils renferment jusqu'à 25% de manganèse, 10% de fer ainsi que des quantités appréciables de cuivre, de nickel et de cobalt. Les réserves de nodules de l'Océan Pacifique seraient supérieures à un millions de milliards de tonnes. L'origine de ces concrétions est à mettre en relation avec les sources hydrothermales sous-marines liées aux épanchements basaltiques qui régénèrent en permanence la croûte océanique



Nodules polymétalliques reposant sur le fond de l'océan

Commençons par les métaux

Les métaux constituent une classe de matériaux indispensables dans de très nombreux domaines. Ce sont des substances élémentaires, c'est à dire constituées d'un seul élément chimique. Les liaisons qui unissent les atomes sont du type métallique. Cela signifie qu'ils mettent en commun tous leurs électrons. Une partie de ces électrons peut circuler librement autour des noyaux atomiques : ce sont eux les vecteurs de l'électricité. Un générateur électrique est une machine qui fait circuler les électrons à l'intérieur d'un conducteur métallique.



Un générateur électrique est comme une "pompe à électrons" qui force ces derniers à circuler à l'intérieur d'un conducteur métallique.

Ce sont généralement de bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité. Ils sont malléables et présentent une densité souvent élevée.

La description des métaux que nous vous présentons ici n'obéit pas au classement habituel du tableau périodique. Puisqu'ils représentent des usages particuliers pour notre industrie, nous avons choisi de les subdiviser, d'une manière un peu arbitraire, en diverses catégories. Pour la commodité de la présentation, nous distinguerons :

Le fer et ses alliés

Le fer est le métal dominant de la civilisation industrielle. Son abondance dans la croûte terrestre, ses minerais à haute teneur et sa métallurgie simple en font le métal le moins coûteux de tous. Un faible ajout de carbone (moins de 2%) permet d'obtenir l'acier. Avec un peu plus de carbone, c'est la fonte.

Associés au fer, le manganèse, le tungstène, le nickel, le chrome, le vanadium et le molybdène permettent d'obtenir les aciers inoxydables ou des aciers spéciaux plus résistants à diverses sollicitations. A ce titre, on peut les considérer comme des alliés du fer.

Les métaux non ferreux

Bien que tous les métaux ne renfermant pas de fer puissent être qualifiés de non-ferreux, nous avons placé dans cette catégorie le plomb, le cuivre, le zinc, l'étain et le cadmium. Nous avons aussi intégré aussi le mercure dans cette catégorie.

Malléables, bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité, résistants à la corrosion, ces métaux sont employés seuls ou sous forme d'alliage, principalement le **bronze** et le **laiton**, pour des usages les plus variés.

Le mercure est le seul métal liquide à température ordinaire. En plus de son emploi dans les thermomètres et les baromètres, ce métal a de nombreux usages dans l'industrie chimique et en électricité.

Les métaux légers

Ces métaux en commun ont un faible poids spécifique. L'aluminium est un des métaux les plus abondants de la croûte terrestre. Malgré une métallurgie complexe et grande consommatrice d'énergie (env. 16'000 kW/h par tonne produite) l'aluminium est l'un des métaux les plus utilisés aujourd'hui.

Le magnésium et le titane constituent avec l'aluminium des alliages légers particulièrement résistants, utilisés principalement dans l'industrie aéronautique. Le béryllium est le plus léger d'entre eux. Son poids spécifique est de 1.84 g/cm³. En dehors de quelques alliages, son usage est limité à cause de sa grande toxicité.

Les métaux précieux

Dans ce groupe, l'or et le platine ont surtout une valeur symbole de richesse et servent de valeur refuge dans les périodes d'incertitude économique. Ils occupent une place prépondérante dans la confection des bijoux. La conductibilité électrique élevée de l'or et son inaltérabilité lui réservent une place de choix dans l'électronique. Le platine a de nombreux usages dans l'industrie à cause de son inaltérabilité et de son insensibilité vis-à-vis des acides et aussi pour ses qualités de catalyseur.

L'argent a perdu un peu de son attrait et la fin de l'industrie des émulsions photographiques à base d'argent lui a fait perdre une partie de sa valeur.

Liés au platine, on associe souvent à ce groupe le palladium, l'iridium, l'osmium, le ruthénium et le rhodium.

Les terres rares

Sous cette appellation on regroupe une petite vingtaine de métaux aux propriétés assez voisines et qui ont presque tous des caractéristiques intéressantes dans les domaines de l'électronique et des aimants permanents. Les terres rares sont devenues des matières hautement stratégiques sans lesquelles les écrans de télévision, les smartphones et les éoliennes ne fonctionneraient pas !

Les métaux de l'industrie nucléaire

Ce sont l'uranium et le thorium, les métaux de base de l'industrie nucléaire ainsi que ceux engendrés artificiellement au cours de phénomènes de fission au cœur des centrales nucléaires ou qui apparaissent dans le cours naturel de la décroissance radioactive de l'uranium.

Les autres métaux

Dans cette catégorie un peu hétéroclite, citons le silicium est nécessaire pour la fabrication des panneaux solaires, le lithium activement recherché pour la confection des batteries lithium/ion qui équipent les voitures électriques, nos ordinateurs et nos téléphones portables.

Le niobium améliore considérablement la qualité de certains aciers, le tantale permet de confectionner les condensateurs miniaturisés de nos téléphones portables. Le germanium occupe une place importante dans l'industrie de l'optique.

Le gallium, le sélénium, l'indium trouvent leur place dans les circuits imprimés, les diodes et l'affichage à cristaux liquides sur les écrans.

Les métalloïdes

On trouve là une demi-douzaine d'éléments dont les propriétés sont intermédiaires entre celles des métaux et des non-métaux, ils ressemblent à des métaux mais ne possèdent pas toutes les propriétés de ceux-ci. On place dans cette catégorie le bore, le silicium, le germanium, l'arsenic, l'antimoine et le tellure.

Le Fer et ses alliés

Fer (Fe)

Poids sp. :	7.87 g/cm ³	Prod. annuelle	1'600'000'000 t.
Dureté :	4	Réserves estimées	150'000'000'000 t.
Point de fusion :	1'538°	Prix approximatif	72 \$ la tonne

Le fer, symbole de la civilisation industrielle

Symbole de la civilisation de l'acier, la Tour construite par Gustave Eiffel pour l'Exposition universelle de 1889, concrétise le rôle dominant du fer, le principal constituant de l'acier, dans notre civilisation industrielle. C'est le métal le plus courant et le moins coûteux parmi ceux que la nature nous offre. C'est l'élément le plus abondant de écorce terrestre après l'oxygène, le silicium et l'aluminium.

Un faible ajout de carbone (2%) permet d'obtenir l'acier. Cet acier est partout : tôle, poutrelles, rails, armatures de béton, coques de navires, carrosseries d'automobiles.

Les météorites métalliques sont constituées d'un alliage de fer et de nickel. Par analogie et à la suite de nombreuses mesures géophysiques, on peut affirmer que le noyau terrestre est lui-même constitué d'un mélange fer/nickel.



Gisements

Les principaux minerais de fer sont constitués d'oxydes et d'hydroxydes de fer. La couleur rougeâtre des hydroxydes se retrouve dans la rouille qui est un mélange complexe d'oxydes et d'hydroxydes de fer. La *latérite*, ce sol rougeâtre typique des régions chaudes et humides, est constituée des oxydes et hydroxydes de fer, résidus insolubles de la dissolution de roches calcaires. Même la couleur rouge du sang est due au fer contenu dans l'hémoglobine.

Les gisements de fer rubanés

Les gisements de fer dits *rubanés* constituent le 90% des minerais exploités dans le monde. Ils sont liés à une transformation majeure de la vie sur Terre⁴ survenue il y a plus de 3'000 Ma⁵. Ce sont des lits alternés d'oxydes de fer et de lits quartziques. Ils proviennent de dépôts très anciens dont le âges sont compris entre 2'000 et 3'500 Ma. Leur origine est due à ce que les géologues appellent "la grande oxydation" liée à la libération de l'oxygène par les premières formes de vie, des bactéries



Bloc de fer rubané âgé de 2.1 milliards d'années.
Amérique du Nord, (photo André Karwath aka Aka)

anaérobies.

⁴ Voir du même auteur: <https://kasuku.ch/la-grande-aventure-de-la-terre/>

⁵ Ma est l'abréviation de un million d'années.

Apparition de l'oxygène libre

Ces dépôts sont liés à l'apparition d'oxygène libre à la surface de la croûte terrestre. Cela a été rendu possible grâce à l'activité des cyanobactéries qui sont apparues il y a environ 3.5 milliards d'années et qui ont inventé la photosynthèse.

A partir de CO_2 , d'eau et d'énergie solaire, ces bactéries ont commencé de capturer le carbone contenu dans le CO_2 , libérant du même coup de l'oxygène⁶ !

Mais l'oxygène a une vocation impérieuse : oxyder tout ce qui passe à sa portée. C'est ainsi que les grandes quantités de fer dissoutes dans les océans ont commencé à s'oxyder et à former de l'hématite et de la magnétite, minéraux insolubles qui se sont déposés alors sur les fonds marins.

Principaux minéraux renfermant du fer



Hématite, Fe_2O_3
Prov. inconnue



Magnétite, Fe_3O_4
Mont St. Hilaire, Québec,
Canada



Goethite, FeO(OH)
U.S.A.



Limonite*, $\text{FeO(OH)} \cdot n\text{H}_2\text{O}$



Pyrite, FeS_2
Grosseto, Toscane, Italie,



Sidérite, FeCO_3
Harz, Allemagne

* la limonite n'est pas un minéral mais un mélange d'hydroxydes de fer plus ou moins hydratés. La limonite colore en rouge les sols en pays chaud et humide.

Usage du fer

Allié avec un peu de carbone il forme l'acier. L'ajout de cobalt, de chrome, de nickel, de manganèse, de molybdène, de titane, de tungstène ou de vanadium en proportions diverses permet d'obtenir les aciers spéciaux dont on a besoin pour de nombreux usages particuliers.

L'industrie de la construction est le premier utilisateur d'acier, que ce soit pour des structures métalliques, des navires, des cuves géantes ou son utilisation dans le béton armé.

L'industrie de l'automobile constitue la deuxième part du marché de l'acier. Plus de la moitié du poids d'une voiture est dû à l'acier.

Le chemin de fer porte bien son nom : pour une ligne à double voie de 100 km de long, il faut environ 24'000 tonne d'acier pour la confection des rails.

Des feuilles d'acier recouvertes d'une mince couche d'étain constituent le fer-blanc de nos boîtes de conserve et de nombreux autres emballages.

⁶ En réalité, les atomes d'oxygènes n'aiment pas rester solitaires. Ils se réunissent deux par deux pour former le dioxygène (O_2) ce gaz que nous respirons.

Production

La production de minerai de fer en 2016 était d'environ 3'300'000'000 de tonnes. Les plus importants producteurs sont l'Australie, le Brésil et la Chine.

Les réserves connues sont estimées à 150 milliards de tonnes de fer.

Principaux pays producteurs de minerai* de fer en 2016					
Australie	824'000'000 t.	Russie	100'000'000 t.	U.S.A.	41'000'000 t.
Brésil	391'000'000 t.	Afrique du Sud	60'000'000 t.	Iran	26'000'000 t.
Chine	353'000'000 t.	Ukraine	58'000'000 t.	Suède	26'000'000 t.
Inde	160'000'000 t.	Canada	48'000'000 t.	Kazakhstan	21'000'000 t.

* La teneur en fer des minerais varie entre 37% et 66% selon le type de gisement.



Mine de fer au Brésil.

Le minerai est constitué d'itabirites, roches constituées d'alternances de lits centimétriques de quartz et d'oxydes de fer (hématite).

Les alliés du fer

Le principal usage de certains métaux est de constituer des alliages avec le fer. Ces associés du fer sont le chrome, le manganèse, le nickel, le molybdène, le titane, le tungstène, le vanadium et le cobalt. L'adjonction de ces divers éléments permet d'obtenir les aciers inoxydables ou des aciers spéciaux résistants aux sollicitations les plus diverses. A ce titre, on peut les considérer comme "les alliés du fer".

Chrome (Cr)

Poids sp. :	7.15 g/cm ³	Prod. annuelle *	29'000'000 t.
Dureté :	7,5	Réserves estimées *	6'600000'000 t.
Point de fusion :	1'907°	Prix approximatif	8'000 € la tonne

* en tonnes de chromite

Le chrome est un métal dur, gris argenté, très résistant à la corrosion. Son nom signifie "couleur" car les divers sels de chrome sont souvent colorés.

Gisements

Dans la nature, la chromite (FeCr_2O_4) est pratiquement le seul minerai de chrome. C'est un minéral accessoire des dunites, des roches magmatiques ultrabasiques très pauvres en silice. Au cours de la mise en place de ces roches, des nodules de chromite s'accumulent parfois à la base du massif lorsque la roche est encore pâteuse.

Dans les zones superficielles d'altération des gîtes de plomb on trouve parfois la crocoïte, un chromate de plomb, un beau minéral coloré qui fait le bonheur des collectionneurs.

Minéraux renfermant du chrome



Chromite, FeCr_2O_4 , dans une dunite altérée, Mugla, Turquie



Crocoïte, PbCrO_4
Tasmanie, Australie (Dakota Matrix)

Usage

Le principal usage du chrome est de constituer, allié au fer, l'acier inoxydable. Grâce à sa résistance à la corrosion, il sert aussi de recouvrement de l'acier par plaquage ou par galvanoplastie : c'est l'acier chromé qui fait briller les pare-chocs et les poignées de nos chères automobiles. Certains sels de chrome sont des colorants et sont utilisés comme pigments pour les peintures (jaune-vert à orange).

Production

En 2015, la production mondiale de chromite a atteint 29 millions de tonnes. L'Afrique du Sud assure, à elle seule, plus de la moitié de la production mondiale grâce aux gisements géants du Bushveld.

Les réserves mondiales connues sont estimées à 500 millions de tonnes de chromite. Elles sont situées majoritairement en Afrique du Sud et au Kazakhstan.

Principaux pays producteurs de chromite en 2015

(source : US Geological Survey)

Afrique du Sud	15'000'000 t.	Inde	3'500'000 t.	Albanie	652'000 t.
Kazakhstan	3'800'000 t.	Finlande	1'035'000 t.	Brésil	490'000 t.
Turquie	3'600'000 t.	Oman	751'000 t.	Iran	400'000 t.

Manganèse (Mn)

Poids sp. :	7.3 g/cm ³	Prod. annuelle	17'000'000 t.
Dureté :	6	Réserves estimées	620'000'000 t.
Point de fusion :	1'246°	Prix approximatif	1'700 € la tonne

Le manganèse est le quatrième métal le plus utilisé après le fer, l'aluminium et le cuivre. C'est un métal dur mais fragile et qui s'oxyde facilement.

Gisements

Les principaux minerais de manganèse sont sous forme d'oxydes. On les trouve dans certaines roches sédimentaires, formant des gisements stratiformes résultant de la précipitation de manganèse d'origine hydrothermale de basse température.

Principaux minéraux de manganèse



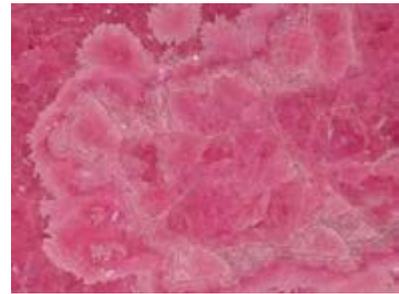
Pyrolusite, MnO₂
Antofagasta, Chili,
(photo Bob Jenkins)



Manganite MnO(OH),
Ilfeld, Harz, Allemagne



Romanèchite,
oxyde complexe de Mn et Ba
Romanèche, France.



Rhodochrosite, MnCO₃
Argentine

Usage

Près de 90% du manganèse est destiné à élaborer des alliages avec d'autres métaux. Pratiquement tous les aciers renferment du manganèse avec des proportions pouvant atteindre 12%. Cela accroît sa dureté et sa résistance à l'usure. Les rails de chemin de fer sont en acier au manganèse. L'adjonction de manganèse dans le bronze accroît sa résistance à la corrosion. Beaucoup d'hélices de bateaux sont en bronze au manganèse pour mieux résister à la corrosion due à l'eau de mer.

Production

En 2015, la production de manganèse a atteint 15.3 millions de tonnes pour 46 millions de tonnes de minerai. Les réserves connues dans le monde sont estimées à 600 millions de tonnes.

Principaux pays producteurs de manganèse en 2015					
Afrique du Sud	4'900'000 t.	Gabon	1'700'000 t.	Kazakhstan	500'000 t.
Australie	3'000'000 t.	Brésil	1'120'000 t.	Ghana	400'000 t.
Chine	2'300'000 t.	Inde	600'000 t.	Ukraine	300'000 t.

Nickel (Ni)

Poids sp. :	8.9 g/cm ³	Prod. annuelle	1'600'000 t.
Dureté :	4	Réserves estimées	67'000'000 t.
Point de fusion :	1'455°	Prix approximatif	10'000 € la tonne

Le nickel est un métal blanc à reflets gris. Plus dur que le fer, il présente une grande résistance à l'oxydation. Dans la nature, les minerais de nickel se trouvent sous forme de sulfures et d'arséniures, presque toujours associés à ceux de cobalt.

Les météorites métalliques, qui nous renseignent sur la composition interne de la Terre, sont composées d'un alliage fer/nickel. La proportion de nickel peut atteindre jusqu'à 50%. C'est un des indices qui nous portent à penser que le noyau interne de notre planète est métallique, constitué d'un alliage Fer/Nickel (80% de fer, 20 % de nickel), une proportion probablement analogue à celle des météorites métalliques.

Principaux minéraux de nickel

Pentlandite	NiS
Millérite	NiS
Nickéline	NiA
Breithauptite	NiSb

On trouve parfois un peu de nickel dans la pyrrhotine et la chalcopyrite.



Mélange de Breithauptite et de nickéline, Ontario, Canada (photo Rob Lavinsky)



Pièce suisse de 20 centimes en nickel. Elles ont été les premières pièces de monnaie émises en nickel.

Usage

Le nickel est un des alliés de l'acier. Il confère à ce dernier une très grande dureté. Il entre aussi, en association avec le cobalt, dans la composition de superalliages d'aciers qui présentent une très grande résistance mécanique aux températures élevées (turbines de réacteurs). Il sert aussi à la fabrication des piles électriques. De nombreux autres usages du nickel sont dus à sa très grande résistance à la corrosion, qualité requise pour la frappe de pièces de monnaie.

Production

La production annuelle mondiale de nickel est actuellement d'environ 1'600'000 t. Les besoins en nickel augmentent rapidement. Les réserves connues, estimées à 67'000'000 sont situées en Australie, en Nouvelle-Zélande et en Russie. Une douzaine d'autres pays possèdent quelques gisements de moindre importance. Le nickel est un métal recyclable.

Principaux pays producteurs de nickel en 2015

Philippines	530'000 t.	Australie	234'000 t.	Brésil	110'000 t.
Russie	240'000 t.	Indonésie	170'000 t.	Chine	102'000 t.
Canada	240'000 t.	Nlle Calédonie	190'000 t.	Colombie	73'000 t.

Molybdène (Mo)

Poids sp. :	10.2 g/cm ³	Prod. annuelle	230'000 t.
Dureté :	5,5	Réserves estimées	15'000'000 t.
Point de fusion :	2'623°	Prix approximatif	12'000 € la tonne

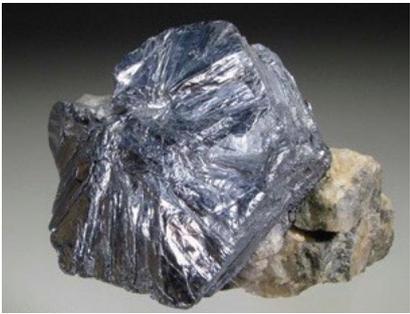
Le molybdène est un métal blanc métallique très dur. Allié en faible quantité à l'acier, il confère à ce dernier une grande dureté et une grande résistance aux températures élevées.

Gisements

La molybdénite est la principale source de molybdène. Elle apparaît dans les filons hydrothermaux de haute température et parfois comme minéral accessoire des roches éruptives. Dans la zone superficielle d'oxydation des gisements on trouve la wulfénite et la powellite, des molybdates de plomb et de calcium.

Une moitié de la production du molybdène est un sous-produit des grands gisements de cuivre.

Principaux minéraux de molybdène

		
Molybdénite, MoS ₂ New South Wales, Australie	Wulfénite PbMoO ₄ Urumqi, Chine (photo R. Lavinsky)	Powellite, CaMoO ₄ Nasik, Inde

Usage

Près du 80% du molybdène entre dans la composition des aciers à haute résistance mécanique. A ce titre, il entre dans la composition des aciers de blindages. Certains composés chimiques du molybdène servent de catalyseur dans les processus de raffinage des hydrocarbures. C'est un métal considéré comme une substance stratégique.

Production

La production mondiale s'est élevée, en 2016, à 227'000 tonnes. Les réserves mondiales sont estimées à 15 millions de tonnes.

Principaux pays producteurs de molybdène en 2016

Chine	90'000 t.	Pérou	20'000 t.	Russie	4'500 t.
Chili	52'000 t.	Mexique	12'300 t.	Iran	3'500 t.
Etats Unis	31'000 t.	Arménie	7'000 t.	Mongolie	2'500 t.

Tungstène (Wo)

Poids sp. :	19.3 g/cm ³	Prod. annuelle	87'000 t.
Dureté :	7,5	Réserves estimées	3'500'000 t.
Point de fusion :	3'422°	Prix approximatif	26'500 € la tonne

Le tungstène était autrefois connu sous le nom de wolfram, qui signifie "pierre lourde" en suédois. C'est un métal gris-acier à blanc, très dur et extrêmement dense. C'est un bon conducteur de l'électricité et de la chaleur. Son point de fusion est le plus élevé de tous les métaux.

Gisements

Les principaux minéraux sont la wolframite et la scheelite. On trouve ces minéraux dans les pegmatites et les filons hydrothermaux de haute température.

Minéraux renfermant du tungstène



Wolframite, (Fe,Mn)WO₄
Paneisquera, Portugal



Scheelite, CaWO₄
Prov. inconnue

Usage

Les filaments des lampes à incandescence ont été, pendant longtemps, un des principaux usages du tungstène. Aujourd'hui c'est un des alliés de l'acier auquel il confère une résistance mécanique et une dureté très élevée. Pour sa densité élevée il est très utilisé dans la confection des obus à forte pénétration. Allié au carbone il constitue le carbure de tungstène (WC), une substance extrêmement dure, 9 sur l'échelle de Mohs. Le carbure de tungstène est utilisé pour la fabrication des outils de coupe et comme abrasif.

Grâce à son très haut point de fusion (3'422°), le tungstène a servi pour confectionner les filaments des lampes à incandescence.



Production

La production annuelle est d'environ 87'000 t. La Chine en est de loin le principal producteur et possède aussi les plus importantes réserves de ce métal.

Principaux pays producteurs de molybdène en 2016

Chine	71'000 t.	Canada	1'700 t.	Autriche	870 t.
Viet Nam	5'000 t.	Bolivie	1'200 t.	Espagne	730 t.
Russie	2'500 t.	Rwanda	1'000 t.	Portugal	630 t.

Vanadium (V)

Poids sp. :	6.0 g/cm ³	Prod. annuelle	80'000 t.
Dureté :	7	Réserves estimées	15'000'000 t.
Point de fusion :	1'910°	Prix approximatif	60'000 € la tonne

Vanadium vient de "Vanadis", une déesse scandinave de la beauté. C'est un métal rare, blanc brillant, de dureté élevée. Les composés chimiques du vanadium sont souvent très colorés.

Gisements

Le principal minerai est la vanadinite qu'on trouve dans la zone d'oxydation des gîtes de plomb. Les hydrocarbures et le charbon peuvent renfermer jusqu'à 5 gr de vanadium par tonne. On estime que la combustion des hydrocarbures rejette annuellement dans l'atmosphère entre 10'000 et 30'000 tonnes de vanadium. On peut en extraire un peu par épuration des pétroles bruts.

Minéraux renfermant du vanadium



Vanadinite, $Pb_5(VO_4)_3Cl$
Mibladen, Maroc



Carnotite
 $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$
Kolwezi, Rép. dém. Congo

Usage

Le 90% du vanadium est utilisé, souvent associé au chrome, dans des alliages avec l'acier. Il confère à l'acier une dureté élevée. Ces alliages sont utilisés pour l'outillage, la coutellerie et les instruments chirurgicaux. Les alliages titane/aluminium/vanadium représentent 5% de l'utilisation du vanadium. Ils sont légers et robustes et indispensables à l'industrie aéronautique et spatiale. La chimie et le développement de batteries consomment le 5% restant.

Production

La production mondiale est d'environ 80'000 tonnes. Elle est assurée principalement par la Chine, la Russie, l'Afrique du Sud et l'Australie. Les réserves mondiales connues sont estimées à 15'000'000 de tonnes.

Principaux pays producteurs de vanadium en 2016

Chine	9'000 t.	Afrique du Sud	3'500 t.
Russie	5'000 t.	Australie	1'800 t.

Cobalt (Co)

Poids sp. :	8.9 g/cm ³	Prod. annuelle	120'000 t.
Dureté :	5	Réserves estimées	7'000'000 t.
Point de fusion :	1'495°	Prix approximatif	70'000 € la tonne

Le cobalt est un métal gris argenté. C'est un métal plutôt rare. Il a des propriétés physiques assez voisines de celles du fer et du nickel.

Gisements

Dans la nature, les minerais de cobalt se trouvent sous forme d'arséniures, de sulfures et d'oxydes, le plus souvent associés à des gisements de nickel ou de cuivre.

Principaux minéraux de cobalt

Linnaeite	Co ₃ S ₄	Chloanthite	NiCoAs ₃
Cobaltite	CoAsS	Safflorite	(Co,Fe)As ₂
Carrolite	CuCo ₂ S ₄	Hétérogénite	CoO OH
Smaltite	} (Co,Ni) As _{2-x}	Sphérocobaltite	CoCO ₃
Skuérodite		Erythrite	Co ₃ (AsO ₄) ₂ .8H ₂ O



Cobaltite



Skuttérodite, Bou Azzer, Maroc

Usage

Le cobalt est un des alliés de l'acier. Il confère à ce dernier une très grande dureté. Il entre aussi, en association avec le nickel, dans la composition de superalliages d'aciers qui présentent une très grande résistance à températures élevées (turbines de réacteurs).

Le cobalt est de plus en plus recherché pour la confection des batteries lithium-ion, une des électrodes étant un oxyde de cobalt. Les sels de cobalt ont la propriété de colorer les verres en bleu.

Production

La production annuelle mondiale de cobalt est actuellement d'environ 120'000 t. Les besoins en cobalt augmentent rapidement. Les réserves connues sont estimées à 6'000'000 de tonnes. Elles sont situées principalement dans la République démocratique du Congo. Une douzaine d'autres pays possèdent quelques gisements de moindre importance.

Principaux pays producteurs de cobalt en 2016 (statistica)

Congo	66'000 t.	Russie	6'200 t.	Cuba	4'200 t.
Chine	7'700 t.	Australie	5'100 t.	Philippine	3'200 t.
Canada	7'300 t.	Zambie	4'600 t.	N ^{elle} Calédonie	3'300 t.

Les métaux non ferreux

On regroupe sous ce terme quelques métaux importants pour les usages que nous en faisons et qui ne rentrent pas dans le cycle de ceux dont la principale qualité est de constituer des alliages avec le fer. Ce sont le cuivre, le plomb, le zinc, l'étain et le cadmium. Parfois on joint le mercure à ce groupe.

Abondance des métaux non ferreux dans la croûte terrestre

Cuivre	68 ppm*	Zinc	80 ppm	Cadmium	0.15 ppm
Plomb	10 ppm	Étain	2 ppm	Mercure	0.05 ppm

* 1 ppm correspond à une partie par million

Gisements

Le cuivre, le plomb et le zinc se trouvent le plus souvent sous forme de sulfures et de sulfosels dans les gisements d'origine hydrothermale, en liaison avec des roches éruptives (granites, granodiorites, basaltes). Plus rarement, dans ces mêmes gisements d'origine hydrothermale, on trouve le mercure sous forme de cinabre (HgS) ou même à l'état natif. L'étain apparaît dans les pegmatites sous forme de cassitérite, SnO_2 . Le cadmium est toujours lié aux gîtes de zinc.

Usages

L'affinité de ces métaux les uns pour les autres permet d'obtenir des alliages très importants pour l'industrie.

- Le **bronze** est un alliage de cuivre et d'étain connu depuis la plus haute antiquité.
- Le **laiton** est un alliage de cuivre et de zinc facile à usiner.

L'airain est un terme utilisé dans l'antiquité pour désigner les alliages de cuivre.



Objets en laiton



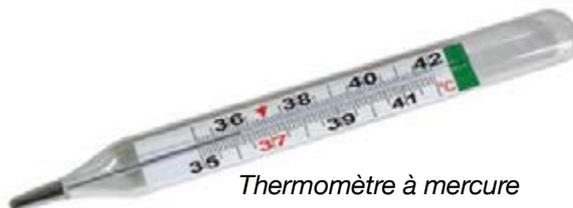
Cloche en bronze



Fils de cuivre



Cafetière en étain



Thermomètre à mercure

Cuivre (Cu)

Poids sp. :	8.96 g/cm ³	Prod. annuelle	4'900'000 t.
Dureté :	3	Réserves estimées	490'000'000 t.
Point de fusion :	1'084°	Prix approximatif	6'000 \$ la tonne

De couleur rouge, le cuivre est un métal ductile et malléable. Il est connu pour sa grande conductibilité électrique qui le rend indispensable dans les technologies liées à l'électricité et l'électronique. Il est connu depuis la plus haute antiquité et il constitue avec l'étain, le bronze qu'on trouve dans de nombreux objets préhistoriques et, un autre alliage important, le laiton, un mélange de zinc et de cuivre.

Gisements

Les concentrations de cuivre sont liées à la genèse des roches éruptives, dans des filons plus ou moins importants, en relation avec l'activité hydrothermale. Ce sont principalement des sulfures, des sulfo-arséniures et sulfo-antimoniures. Ces filons recèlent aussi de nombreux autres métaux : plomb, zinc, cobalt, nickel, molybdène, etc.

Près de la surface, dans la zone d'oxydation, on observe des minéraux riches en oxygène, oxydes, carbonates, silicates etc..

Principaux minéraux de cuivre



Chalcopyrite, CuFeS_2
Guangxi, Chine



Chalcocite, Cu_2S
Butte, Montana, U.S.A.



Bornite, Cu_5FeS_4
Bisbee, Arizona,



Tennantite, $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$
Hunan, Chine



Cuprite, Cu_2O , Tsumeb,
Namibie (photo R. Lavinsky)



Malachite, $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$
Shaba, R. dém. du Congo



Azurite $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$
Chine



Cuivre natif, Cu
Michigan, U.S.A.



Dioptase, $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Tsumeb, Namibie

Production

En 2015 la production mondiale de cuivre a atteint 19'300'000 tonnes. Le principal producteur de cuivre est le Chili. Les réserves mondiales sont estimées à 720 millions de tonnes. C'est encore le Chili qui possède les plus grandes réserves connues avec 210 millions de tonnes.

Principaux pays producteurs de cuivre en 2015 (Soc.chim de France)

Chili	5'764'000 t.	Etats-Unis	1'382'000 t.	Zambie	754'000 t.
Pérou	1'705'000 t.	R. dém du Congo	1'039'000 t.	Russie	720'000 t.
Chine	1'667'000 t.	Australie	971'000 t.	Canada	697'000 t.

Réserves de cuivre connues en 2015

Chili	210'000'000 t.	Mexique	46'000'000 t.	Russie	30'000'000 t.
Australie	88'000'000 t.	Etats Unis	33'000'000 t.	Pologne	28'000'000 t.
Pérou	82'000'000 t.	Chine	30'000'000 t.	Canada	25'000'000 t.

Le taux de recyclage du cuivre est estimé à 35%.

Métaux satellites du cuivre

Associés au cuivre en faibles quantités, de nombreux métaux sont récupérés comme sous-produits de son exploitation. Ainsi plus de la moitié de la production du molybdène est un sous-produit des mines de cuivre. De nombreux autres métaux apparaissent aussi dans les mêmes conditions. Ce sont le nickel, le zinc, le plomb, le cobalt, le germanium, l'or, l'argent, le bismuth, le sélénium, l'uranium et beaucoup de terres rares.



Les cuisiniers aiment les casseroles en cuivre : la chaleur est rapidement et également répartie et le cuivre présente un effet bactéricide.

Plomb (Pb)

Poids sp. :	11.35 g/cm ³	Prod. annuelle	4'600'000 t.
Dureté :	1,5	Réserves estimées	79.000.000 t.
Point de fusion :	327°	Prix approximatif	2'000 \$ la tonne

C'est un métal dense, gris bleuâtre, très malléable. Il est toxique et provoque de nombreux troubles aux personnes exposées à des sels de plomb. On parle alors de saturnisme.

Gisements

Le plomb accompagne le cuivre et le zinc sous forme de sulfures, de sulfo-arséniures et sulfo-antimoniures dans les filons hydrothermaux. Dans la zone superficielle des gisements ces sulfures s'altèrent en minéraux riches en oxygène, en carbonates, sulfates, chromates, molybdates et vanadates.

Principaux minéraux renfermant du plomb



Galène, PbS
Planioles. Lot, France
(Comptoir géologique)



Jamesonite,
Pb₄FeSb₆S₁₅
Zacatecas, Mexique
(Photo R. Lavinsky)



Cérousite, PbCO₃



Anglésite, PbSO₄
Touissit, Maroc



Crocoïte, PbCrO₄
Tasmanie, Australie
(Dakota Matrix)



Wulfénite, PbMoO₄
Xinjiang, Chine
(Photo R. Lavinsky)



Vanadinite, Pb₅Cl(VO₄)₃
Mibladen, Maroc
(Dakota Matrix)

Usages

Les usages du plomb ont beaucoup varié avec le temps. On l'a utilisé pour confectionner des conduites d'eau, pour la confection des caractères d'imprimerie, comme additif dans l'essence, pour la couverture des toits.

Actuellement, plus de 70% du plomb sert à la fabrication des batteries de voiture. Le solde entre dans la confection des pigments, de divers composés chimiques, du verre et de la munition.

Au Moyen Age, les alchimistes associaient le plomb à la planète saturne. C'est pourquoi on a nommé saturnisme les troubles provoqués par l'intoxication au plomb. L'utilisation généralisée de la vaisselle en plomb par les Romains a causé une vague de saturnisme parmi la population.

Production

La production mondiale de plomb s'est élevée, en 2016, à 4'600'000 tonnes. Le principal producteur est la Chine. Mais c'est l'Australie qui recèle les plus importantes réserves. Le taux de recyclage du plomb, essentiellement celui des batteries, est estimé à 56%.

Principaux pays producteurs de plomb en 2016 (Statistica)

Chine	2'900'000 t.	Pérou	266'000 t.	Inde	106'000 t.
Australie	711'000 t.	Mexique	210'000 t.	Bolivie	82'000 t.
Etats Unis	340'000 t.	Russie	195'000 t.	Turquie	78'000 t.

Principales réserves de plomb par pays en 2016 (Statistica)

Australie	35'000'000 t.	Pérou	6'300'000 t.	Inde	2'200'000 t.
Chine	17'000'000 t.	Mexique	5'600'000 t.	Pologne	1'600'000 t.
Russie	6'400'000 t.	Etats Unis	5'000'000 t.	Bolivie	1'100'000 t.



Toiture de Notre Dame de Paris.

Elle est constituée de 1326 tuiles de plomb de 5mm d'épaisseur. Le poids total est évalué à 210 tonnes

Zinc (Zn)

Poids sp. :	7.13 g/cm ³	Prod. annuelle	13'500'000 t.
Dureté :	2,5	Réserves estimées	250'000'000 t.
Point de fusion :	419°	Prix approximatif	2'500 \$ la tonne

Le zinc est un métal gris-bleu qui se ternit rapidement et forme en surface une patine qui le protège de l'altération. Cette propriété est largement utilisée pour la galvanisation de l'acier, c'est à dire le dépôt d'une fine couche de zinc sur le métal à protéger. Avec le cuivre il constitue le laiton.

Gisements

La blende est le minéral primaire de zinc. Il est le plus souvent associé aux sulfures de cuivre et de plomb dans les mêmes filons hydrothermaux. En zone d'oxydation superficielle on trouve la zincite et la smithsonite.

Usages

Principaux minéraux renfermant du zinc



Blende, ZnS
Schemnitz, Slovaquie



Zincite, ZnO
Zacatecas, Mexique
(Photo R. Lavinsky)



Smithsonite, ZnCO₃

Un des principaux usages du zinc est la protection anti-corrosion de l'acier par le processus de la galvanisation. Allié au cuivre il constitue le laiton, un alliage facile à usiner et aux nombreuses applications.



Toiture recouverte de zinc

Production

Principaux pays producteurs de zinc en 2015 (Soc.chim de France)

Chine	4 900 000 t.	Etats-Unis	712 000 t.	Bolivie	430 000 t.
Australie	1 580 000 t.	Inde	830 000 t.	Kazakhstan	340 000 t.
Pérou	1 370 000 t.	Mexique	660 000 t.	Canada	300 000 t.

Principales réserves de zinc par pays en 2016 (Statistica)

Australie	63'000'000 t.	Mexique	17'000'000 t.	Inde	10'000'000 t.
Chine	40'000'000 t.	Kazakhstan	11'000'000 t.	Canada	5'700'000 t.
Pérou	25'000'000 t.	Etats Unis	11'000'000 t.	Bolivie	4'000'000 t.

Étain (Sn)

Poids sp. :	7.29 g/cm ³	Prod. annuelle	370'000 t.
Dureté :	1,5	Réserves estimées	6'000'000 t.
Point de fusion :	232°	Prix approximatif	18'000 \$ la tonne

C'est un métal gris-argent, malléable, relativement résistant à la corrosion. Il a été utilisé dès l'Antiquité pour produire le bronze, en association avec le cuivre. On allait chercher la cassitérite (SnO₂) en Cornouailles, appelée à l'époque "îles Cassiterides".

Gisements

La cassitérite se trouve dans les pegmatites des roches éruptives de la famille du granite. Elle se retrouve aussi dans les alluvions provenant de la destruction des roches des gisements primaires. On trouve aussi un sulfure d'étain, la stannite dans les filons hydrothermaux de haute température.

Minéraux d'étain



Cassitérite, SnO₂, La Paz,
Bolivie



Stannite, Cu₂(Fe,Zn)SnS
Zinnwald, Bohême

Usage

En dehors de sa participation dans les alliages des diverses sortes de bronze, grâce à son innocuité, l'étain a été utilisé dans la confection de vaisselle et dans la protection des denrées alimentaires. Le fer-blanc de nos boîtes de conserves est constitué d'une fine tôle d'acier recouverte d'une fine couche d'étain. Les tubes qui renferment des produits alimentaires étaient en étain. Les casseroles de cuivre étaient étamées, c'est à dire dont l'intérieur était recouvert d'étain. Les capsules en étain protègent les bouchons des bonnes bouteilles de vin ! L'étain est aussi indispensable pour effectuer les soudures des circuits électroniques. Les tuyaux de façade des orgues sont en étain. Autrefois on utilisait l'étain pour la confection des miroirs.

Objets en étain



Tuyaux d'orgue



Cafetière



Etamage d'une casserole

Production

La production annuelle d'étain est d'environ 370'000 tonnes par an. Les trois grands producteurs de cassitérite, le minéral d'étain, sont la Chine, l'Indonésie et le Pérou. Gejiu est une ville minière du sud de la province du Yunnan en Chine, proche de la frontière avec le Viêt Nam. Elle est le principal centre d'extraction minière d'étain de Chine et l'un des plus importants du monde.

Les réserves connues sont estimées à 5.2 millions de tonnes. Le taux de recyclage est d'environ 31 %.

Principaux pays producteurs d'étain en 2012 (Soc.chim de France)

Chine	116'000 t.	Bolivie	19'000 t.	Malaisie	4'000 t.
Indonésie	91'000 t.	Brésil	11'000 t.	Ruanda	3'500 t.
Pérou	26'000 t.	Australie	6'000 t.	Congo	2'500 t.

Cadmium (Cd)

Poids sp. :	8.69 g/cm ³	Prod. annuelle	23'000 t.
Dureté :	2	Réserves estimées	500'000 t.
Point de fusion :	321°	Prix approximatif	2'500 \$ la tonne

Le cadmium est un métal rare. Il est blanc, ductile et très malléable. Sa grande toxicité en limite l'usage.

Gisement

On ne connaît guère qu'un seul minéral de cadmium, la greenockite, CdS. Il est présenté dans les filons hydrothermaux de haute température et, parfois, dans les cavités des basaltes. Mais c'est surtout dans les minerais de zinc que le cadmium est disséminé, à raison d'environ 3 kg de cadmium par tonne de zinc produite.

Greenockite, CdS
Tsumeb, Namibie



Usage

Les batteries nickel/cadmium constituent le principal usage du cadmium. Toutefois, cet usage est limité à cause de sa grande toxicité. Pour cette raison les batteries nickel/cadmium pour appareils portables ont été interdites. Mais, en raison de leur fiabilité et de leur robustesse vis-à-vis des conditions extérieures, leur utilisation reste indispensable comme batteries de secours dans les domaines des réseaux de communication, des transports ferroviaires et des usages médicaux.

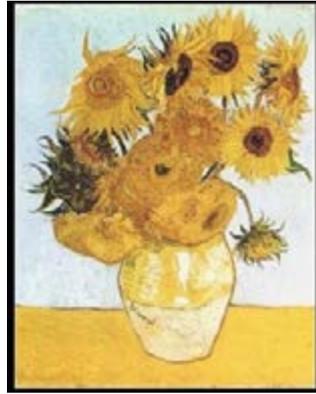
Comme pigment jaune très lumineux, il est utilisé dans les casques de chantier et les gilets de signalisation. La couleur jaune des tournesols peints par Vincent van Gogh est à base de cadmium.

Production

En 2016, la production de cadmium métal a été de 23'000 tonnes. La Chine est de loin le premier producteur et le pays qui renferme les plus importantes réserves connues. Les réserves étaient estimées à 500'000 t. en 2013

Principaux pays producteurs de cadmium en 2016 (U.S.G.S.)

<i>Chine</i>	<i>7'400 t.</i>	<i>Kazakhstan</i>	<i>1'500 t.</i>	<i>Canada</i>	<i>1'140 t.</i>
<i>Corée du Sud</i>	<i>4'500 t.</i>	<i>Russie</i>	<i>1'350 t.</i>	<i>Pérou</i>	<i>760 t</i>
<i>Japon</i>	<i>1'900 t.</i>	<i>Mexique</i>	<i>1'250 t.</i>	<i>Pays bas</i>	<i>640 t. t.</i>



Le jaune utilisé par van Gogh pour ses tournesol est à base de sels de cadmium

Mercure (Hg)

<i>Poids sp. :</i>	<i>13.54 g/cm³</i>	<i>Prod. annuelle*</i>	<i>2'300 t.</i>
<i>Dureté :</i>	<i>1,5</i>	<i>Réserves estimées</i>	<i>600'000 t.</i>
<i>Point de fusion :</i>	<i>-38.8°</i>	<i>Prix approximatif</i>	<i>200 \$ le kg</i>

C'est le seul métal qui soit à l'état liquide à température ordinaire. Il ne devient solide qu'en-dessous de -39°. Son symbole Hg, provient du latin "hydrargyrum" qui signifie argent liquide. Autrefois, son principal usage était la confection des baromètres et des thermomètres. Ce n'est que tardivement qu'on s'est aperçu de sa dangerosité. C'est un puissant neurotoxique sous ses formes organiques. A cause de cette toxicité, son usage est devenu très limité et la production de mercure diminue chaque année.

Gisements

Le cinabre, HgS, est pratiquement le seul minéral renfermant du mercure. Plus rarement on le trouve aussi sous forme de mercure natif ou de calomel, Hg₂Cl₂. Le cinabre apparaît dans les filons hydrothermaux de basse température.



Cinabre, HgS, prov. inconnue



Gouttelettes de mercure natif, Almaden, Espagne

Usages

L'usage principal du mercure est de servir de catalyseur dans la production de chlorure de vinyle. On l'utilise dans les tubes fluorescents, improprement appelés tubes au néon alors qu'en réalité ce sont des tubes à vapeur de mercure. Dans le secteur minier, on l'utilise pour l'amalgamation, un procédé d'extraction de l'or et de l'argent. Il sert aussi à fabriquer les piles plates.

Les amalgames dentaires, appelés faussement plombages, étaient constitués de 50% de mercure auxquels on ajoute de l'argent, de l'étain, du cuivre et du zinc.



Tube fluorescent à vapeur de mercure

Production

La production annuelle de mercure s'est élevée en 2015 à 2'340 tonnes. Les deux principaux producteurs sont la Chine et le Mexique.

Réserves mondiales d'étain en 2015 (Soc. chim. de France)

Chine	1'600 t.	Russie	50 t.
Mexique	500 t.	Pérou	40 t.
Kirghistan	70 t.	Tadjikistan	30 t.

La région d'Almaden près de Ciudad Real, en Espagne, a été autrefois la plus grande concentration de mercure du monde. Depuis l'Antiquité, on y a produit plus de 300'000 tonnes de mercure. Autrefois, la teneur en mercure pouvait atteindre jusqu'à 20%. Aujourd'hui toutes les mines de la région sont fermées.

Les métaux légers

On regroupe un peu arbitrairement sous ce terme des métaux dont le poids spécifique est très faible. A l'exception du béryllium, ils sont très abondants dans la croûte terrestre. Ils peuvent constituer entre eux des alliages dont la légèreté et la haute résistance en font des matériaux qui intéressent l'aéronautique et l'industrie de la construction.

Teneur des métaux légers dans la croûte terrestre

Aluminium	28%	Magnésium	2,3%
Titane	0,5%	Béryllium	1.2 ppm

* 1 ppm correspond à une partie par million

Aluminium (Al)

Poids sp. :	2.69 g/cm ³	Prod. annuelle	45'000'000 t.
Dureté :	1,5	Réserves estimées	25 milliards de t.
Point de fusion :	660°	Prix approximatif	2'000 \$ la t.

L'aluminium est l'élément le plus répandu dans la croûte terrestre après l'oxygène et le silicium. C'est le métal dont nous faisons le plus grand usage après le fer dans de très nombreuses applications. C'est un métal léger, très malléable, ductile, montrant une conductibilité électrique élevée. Exposé à l'air, il se forme à sa surface une très fine couche d'oxyde d'aluminium qui le protège de la corrosion.

De très nombreux minéraux renferment de l'aluminium, en particulier les aluminosilicates dans lesquels les atomes d'aluminium remplacent partiellement les atomes de silicium. Mais c'est la **bauxite** qui constitue le principal minerai d'aluminium.

La bauxite

C'est une roche issue de l'altération, en climat chaud et humide, de calcaires marneux lessivés par l'érosion. Le calcaire est dissout et il ne subsiste que les minéraux insolubles, les oxydes de fer et des minéraux argileux riches en aluminium. Si c'est l'oxyde de fer qui domine, c'est la **latérite** caractérisée par sa couleur rouge. Si ce sont les hydroxydes d'aluminium qui domine, on parle de alors de **bauxite**.



Route en latérite (photo M. Horenbeek)



Une exploitation de bauxite à Paragominas, Brésil

Les principaux minéraux d'aluminium de la bauxite sont :

*la gibbsite, $Al(OH)_3$, la boehmite, $AlO(OH)$
le diaspore, $AlO(OH)$ la kaolinite, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
le corindon, Al_2O_3*

Ce sont des minéraux extrêmement petits, non visibles à l'œil nu, détectables uniquement par des méthodes de laboratoire. Seuls le diaspore et le corindon montre parfois de grands cristaux.

Le corindon, plus rare, est de l'alumine pure cristallisée. Rubis et saphir sont des variétés colorées de corindon.



Diaspore, Aydun, Turquie



Corindon, var. rubis, Madagascar

Traitement de la bauxite

La bauxite est broyée et on lui ajoute de la soude (NaOH). Portée à haute température et soumise à une forte pression, la soude transforme les hydroxydes en aluminates de sodium.

On élimine les déchets insolubles (les fameuses boues rouges) et, après refroidissement, il y a formation d'alumine (Al_2O_3) qui se sépare de la soude. Il faut traiter un peu plus de 4 tonnes de bauxite pour obtenir 2 tonnes d'alumine qui, à leur tour, permettront de produire une tonne d'aluminium. Le prix de l'alumine oscille entre 200 et 300 \$ la tonne.



Alumine prête pour l'électrolyse

L'alumine c'est du corindon

L'alumine (Al_2O_3) synthétisée au travers de ces opérations est, en fait, du corindon en poudre. Une grande partie l'alumine va être réduite en aluminium. L'alumine est aussi utilisée directement comme abrasif, c'est l'émeri, et comme poudre de polissage en raison de sa grande dureté. C'est la substance la plus dure après le diamant.

L'alumine peut aussi être transformé en rubis et saphirs synthétiques⁷ destinés à l'horlogerie et à la joaillerie.

Le procédé Verneuil consiste à faire tomber de la poudre d'alumine sur un fragment de corindon à travers un chalumeau oxyhydrique. La poudre en fusion cristallise sur le fragment épousant son orientation cristallographique.



Traitement de l'alumine

La séparation de l'aluminium de l'oxygène se fait par électrolyse. On mélange l'alumine avec de la cryolite (Na_3AlF_6), un minéral rare découvert au Groenland. Pour les besoins de l'industrie de l'aluminium la cryolite est produite synthétiquement à partir de la fluorine (CaF_2). L'ajout de cryolite permet d'abaisser le point de fusion de l'alumine de $2'070^\circ$ jusqu'à 960° . Ce mélange est chauffé à près de $1'000^\circ$ dans des cuves et traversé par un courant électrique continu intense.

Le fond de la cuve qui constitue la cathode (-) est généralement en carbone. L'anode (+) est constituée de barres de carbone qui plongent dans le bain en fusion. L'oxygène et les gaz fluorés s'échappent du côté de l'anode et l'aluminium liquide s'accumule au fond de la cuve d'où il est régulièrement soutiré. La consommation d'électricité est considérable : il faut compter environ $16'000$ kWh par tonne d'aluminium produite. La nouvelle usine d'électrolyse Alouette à Sept-îles au Québec a besoin d'une puissance électrique de 500 mégawatts, soit la moitié de la puissance d'une centrale nucléaire.

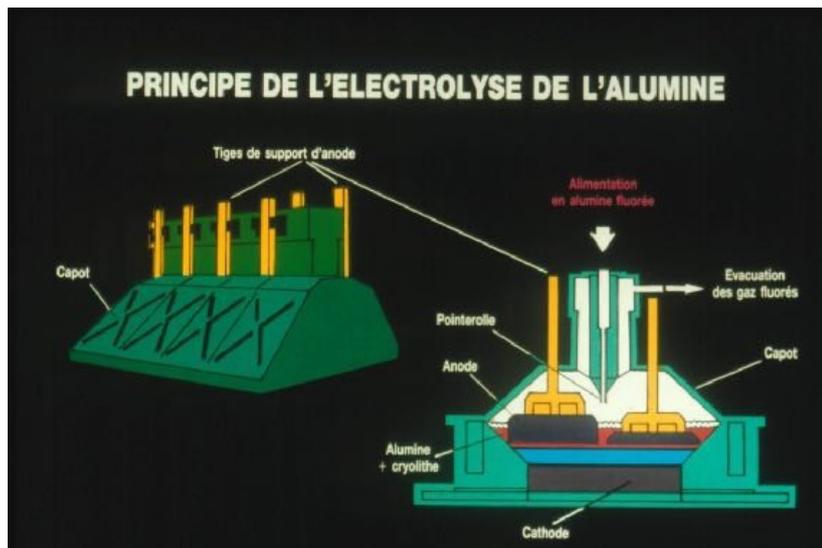


Schéma d'une cellule d'électrolyse de l'alumine (Péchiney)

Usage de l'aluminium

⁷ Voir du même auteur : <https://kasuku.ch/le-monde-merveilleux-des-pierres-precieuses/>



Une salle des cuves d'électrolyse au Québec (Alouette Inc.)

L'usage de l'aluminium se répand à toutes les industries. Ce métal accompagne notre vie de tous les jours : casseroles, canettes pour nos nombreuses boissons, boîtes diverses, papier d'emballage, échelles légères, remorques, caravanes, bicyclettes.

L'excellente conductibilité électrique de l'aluminium est mis à profit dans les lignes à haute tension et les bobinages des transformateurs.

Dans la construction, on apprécie sa légèreté, sa résistance aux intempéries, sa facilité d'être travaillé et sont recyclage final qui atteint presque 100 %. On l'utilise pour les façades, les toitures, les encadrements de fenêtres, les vérandas. L'aluminium contribue à alléger tous les véhicules : avions, automobiles, trains, bateaux.



Gourde et canettes en aluminium

Production



Structure d'un câble pour ligne aérienne à haute tension : âme centrale en acier pour la résistance mécanique, conducteur électrique extérieur en aluminium.

mondiale

Il faut distinguer les producteurs de bauxite des producteurs d'aluminium. La bauxite est directement transformée en alumine dans les pays producteurs. L'alumine est généralement exportée vers les pays consommateurs qui disposent des ressources électriques abondantes et peu coûteuses nécessaires aux opérations d'électrolyse.

En 2015, la production mondiale de bauxite a atteint 273 millions de tonnes pour une production d'aluminium métal de 118 millions de tonnes.

Principaux producteurs de bauxite en 2015 (en tonnes)

<i>Australie</i>	<i>80'000'000 t.</i>	<i>Malaisie</i>	<i>21'000'000 t.</i>	<i>Jamaïque</i>	<i>10'700'000 t.</i>
<i>Chine</i>	<i>60'000'000 t.</i>	<i>Inde</i>	<i>19'200'000 t.</i>	<i>Russie</i>	<i>6'600'000 t.</i>
<i>Brésil</i>	<i>35'000'000 t.</i>	<i>Guinée</i>	<i>17'700'000 t.</i>	<i>Kazakhstan</i>	<i>5'200'000 t.</i>

Principaux producteurs d'aluminium en 2015 (en tonnes)

<i>Chine</i>	<i>57'000'000 t.</i>	<i>Inde</i>	<i>5'470'000 t.</i>	<i>Irlande</i>	<i>1'983'000 t.</i>
<i>Australie</i>	<i>20'000'000 t.</i>	<i>Etats Unis</i>	<i>4'000'000 t.</i>	<i>Jamaïque</i>	<i>1'950.000 t.</i>
<i>Brésil</i>	<i>10'300'000 t.</i>	<i>Russie</i>	<i>2'580'000 t.</i>	<i>Espagne</i>	<i>1'633'000 t.</i>

Les réserves connues de bauxite sont estimées à 28 milliards de tonnes

Principales réserves connues de bauxite dans le monde

<i>Guinée</i>	<i>7'400'000'000 t.</i>	<i>Viet Nam</i>	<i>2'100'000'000 t.</i>	<i>Guyane</i>	<i>850'000'000 t.</i>
<i>Australie</i>	<i>6'200'000'000 t.</i>	<i>Jamaïque</i>	<i>2'000'000'000 t.</i>	<i>Chine</i>	<i>830'000'000 t.</i>
<i>Brésil</i>	<i>2'600'000'000 t.</i>	<i>Indonésie</i>	<i>1'000'000'000 t.</i>	<i>Inde</i>	<i>590'000'000 t.</i>

Magnésium (Mg)

Poids sp. :	1.74 g/cm ³	Prod. annuelle	950'000 t.
Dureté :	2,5	Réserves estimées	immenses
Point de fusion :	650°	Prix approximatif	2'000 \$ la t.

C'est un métal très léger, blanc-gris argenté. Ses propriétés mécaniques ne sont pas excellentes, aussi on l'utilise dans des alliages, surtout avec l'aluminium.

Gisements

L'eau de mer renferme 1.3 kg de magnésium par m³. La mer morte ou le lac Assal en renferme jusqu'à 30 kg par m³. Les minerais principaux dont est extrait le magnésium sont la magnésite, la dolomite, la brucite et divers minéraux des évaporites, tels la carnallite et l'epsomite.

Quelques minéraux de magnésium



Magnésite, MgCO₃
Vermont, U.S.A.



Dolomite (Ca,Mg)CO₃
Guanajuato, Mexico



Brucite. Mg(OH)₂
Oural, Russie



Carnallite, KMgCl₃.6H₂O
Eddy County, New Mexico
(R. Weller, Cochise College)



Epsomite, MgSO₄.7H₂O
Prov. inconnue

Usage

L'alliages de magnésium avec env. 10% d'aluminium est très utilisé dans tous les secteurs où l'allègement du poids est important : carters de moteurs, roues et sièges d'avion, cadres de vélos, boîtiers d'ordinateurs.

Le magnésium est aussi un oligo-élément indispensable à l'organisme humain.

Principaux producteurs de magnésium

Chine	800'000 t.	Israël	25'000 t.
U.S.A.	60'000 t.	Brésil	16'000 t.
Russie	30'000 t.	Corée du Sud	10'000 t.

source : U.S. Geological Survey

Titane (Ti)

Poids sp. :	4.51 g/cm ³	Prod. annuelle	100'000 t.
Dureté :	6	Réserves estimées	2 x 10 ⁹ t.
Point de fusion :	1'668°	Prix approximatif	3'500 \$ la t.

Le titane est un élément très abondant dans la croûte terrestre. C'est un métal relativement léger, résistant, blanc métallique, résistant à la corrosion.

Gisements

La plupart des roches renferment de petites quantités de titane, principalement sous forme d'ilménite ou de son dérivé par altération, le leucoxène. L'oxyde de titane est un exemple de polymorphisme : le rutile, l'anatase et la brookite ont la même formule chimique mais des structures différentes. Le rutile cristallise dans le système quadratique, l'anatase et l'ilménite dans le système rhomboédrique. Ce sont les conditions de pression et de température lors de leur formation qui conditionnent l'appartenance à l'une ou l'autre structure.

Principaux minéraux de titane



Rutile, TiO₂
Binntal, (Patrick Voilot)



Brookite, TiO₂
Sibérie, Russie



Titanite, CaTiSiO₅
Val Russein. Grisons



Anatase, TiO₂
Norvège



Ilménite, FeTiO₃
Prov. inconnue



Perovskite, CaTiO₃
Magnet Cove, Arkansas,
photo Kelly Nash,

Usages

Plus de 90% du titane est utilisé directement sous forme d'oxyde de titane, TiO₂, un pigment blanc très opaque et très réfléchissant qui, grâce à son indice de réfraction très élevé (>2.5), se révèle indispensable pour les peintures et pour le blanchiment de la pâte à papier. Moins de 10% du minerai est transformé en titane métal. Mais son usage se développe rapidement particulièrement dans l'industrie aéronautique à cause de sa légèreté et de sa très grande résistance aux hautes températures. Le titane représente 13% du poids d'un Airbus 350. Grâce à son innocuité vis-à-vis du corps humain, les prothèses de hanches et les implants dentaires sont aujourd'hui en titane.

Principaux producteurs d'oxydes de titane en 2015 (en tonnes)

Chine	900'000 t.	Kenya	480'000 t.	Ukraine	303'000 t.
Viet-Nam	540'000 t.	Norvège	420'000 t.	Madagascar	249'000 t.
Afr. du Sud	535'000 t.	Canada	360'000 t.		

Béryllium (Be)

Poids sp. :	1.85 g/cm ³	Prod. annuelle	env. 320 t.
Dureté :	5,5	Réserves estimées	80'000 t.
Point de fusion :	1'287°	Prix approximatif	500 \$ le kg

C'est un métal plus léger que l'aluminium et plus dur que l'acier. Il est non magnétique, sa conductivité électrique est grande. Plus rigide que l'acier, il conserve ses propriétés physiques même à une température élevée. Sa métallurgie est complexe et il présente une toxicité élevée.

Gisements

Le béryl et la bertrandite sont les deux seuls minéraux renfermant du béryllium. Ils sont assez fréquents dans les pegmatites dans lesquelles ils peuvent atteindre une grande taille. L'émeraude et l'aigue-marine sont des variétés de qualité gemme de béryl de couleur vert ou bleu.

Actuellement 85% de la production mondiale est assurée par la mine de Spor Mountain aux U.S.A. La Chine et le Mozambique exploitent quelques petits gisements.

Minéraux renfermant du béryllium



Béryl, $Be_3Al_2Si_6O_{18}$
Provenance inconnue



Bertrandite, $Be_4Si_2O_7(OH)_2$
Annaberg, Saxe, Allemagne

Usage

Le béryllium entre dans la composition de nombreux alliages principalement avec le cuivre, l'aluminium et le nickel auxquels il confère une grande rigidité même à des températures élevées.

Les alliages aluminium-béryllium sont utilisés pour des structures d'avion et pour réaliser certaines pièces de fusées. Les alliages nickel-béryllium sont utilisés pour la confection de ressorts dans les appareils domestiques.

On l'utilise dans la confection des tubes à rayons X à cause de sa grande perméabilité aux courtes longueurs d'onde.

Mais c'est dans les installations nucléaires que le béryllium trouve un de ses usages les plus importants où on utilise ses propriétés de modérateur et réflecteur de neutrons.

Les métaux précieux

On regroupe sous ce terme des métaux rares dont le prix est très élevé. Les plus connus sont l'or, l'argent et le platine. Leur usage a longtemps été la confection de bijoux coûteux, symboles de richesse et de puissance. Ils servent aussi de valeur refuge pendant les périodes d'incertitude économique.

Ces métaux sont très rares dans la croûte terrestre. L'argent qui est le moins rare d'entre eux ne représente que un dix millionième parmi les autres éléments. Dans la nature, ils sont souvent liés les uns aux autres, entrant en faible quantité dans des alliages avec le platine.

Teneur des métaux précieux dans la croûte terrestre (exprimée en ppm*)

Or	0,003	Palladium	0,015	Ruthénium	0,001
Argent	0,1	Iridium	0,001	Rhodium	0,001
Platine	0,004	Osmium	0,001		

* 1 ppm correspond à une partie par million

Sous l'appellation "groupe du platine" on associe aux métaux précieux le rhodium, le ruthénium, le palladium, l'osmium et l'iridium. Ces derniers apparaissent souvent en relation avec les gîtes de platine mais surtout comme sous-produits de l'exploitation des gisements de nickel. Ces métaux ont la propriété commune d'être de puissants catalyseurs dans de nombreuses réactions chimiques.

Les gisements des métaux du groupe du platine sont en relation avec des roches ultrabasiques très pauvres en silice et riches en éléments ferro-magnésiens.

Prix des métaux précieux

Les prix mentionnés ne sont valables qu'à un instant donné. Les fluctuations sont grandes et dépendent de l'offre et de la demande. Par ailleurs la production minière annuelle est largement inférieure à la demande qui ne peut être alimentée qu'avec le recyclage. Ainsi la production annuelle d'or est d'environ 3'000 t. alors que la consommation est d'environ 4'800 t. La différence est assurée par le recyclage de vieux bijoux et les variations de la thésaurisation.



Statère en or représentant Alexandre le Grand frappée vers 325 avant J.-C. à Mysie.

Or (Au)

Poids sp. :	19.3 g/cm ³	Prod. annuelle	3'000 t.
Dureté :	2,5	Réserves estimées	42'000 t.
Point de fusion :	1'064°	Prix approximatif	40'000 \$ le kg

C'est un métal dense, très mou de couleur jaune doré, facile à travailler, utilisé depuis la plus haute antiquité pour confectionner des bijoux et des pièces de monnaie. La principale utilisation de l'or est la thésaurisation. Les banques centrales de nombreux pays détiennent d'importantes réserves d'or. Ces réserves sont estimées à près de 30'000 tonnes.

Gisements

On trouve l'or sous forme native dans certains filons d'origine hydrothermale de haute et moyenne température. Libéré par l'érosion, l'or se concentre dans les alluvions qui constituent alors des gisements secondaires appelés placers.



Fimiston Open Pit, est la plus grande mine d'or d'Australie. Longue d'environ 3,8 km et large de 1,5 km, sa profondeur atteindra bientôt 600 mètres. Depuis son ouverture en 1989, 15 millions de tonnes de roches sont déplacées chaque année (environ 240.000 tonnes par jour), pour une production moyenne annuelle d'or de 28 tonnes.

Usage

En plus de son usage en joaillerie et en contrepartie monétaire, l'or a de nombreux usages industriels. Grâce à son inaltérabilité et son excellente conductivité électrique, on l'utilise pour les contacts électriques en électronique. Il trouve encore son emploi dans les microprocesseurs et comme catalyseur dans les piles à combustible.

En 2015, 57 % de la demande d'or était destinée à la joaillerie, 14% aux banques centrales, 21% à la thésaurisation et 8 % à l'électronique.



Orpillage sur la Bagoé, Mali

Pépite d'or, 8.65 g.
Karlgoolie, AustralieRéserve d'or d'une
banque nationale

Production

En 2014, la production d'or a atteint 3'314 tonnes. La demande est bien supérieure et elle assurée par le recyclage des vieux bijoux et les variations des réserves des banques nationales.

Principaux producteurs d'or en 2014 (en tonnes)

Chine	462	U.S.A.	211	Canada	151
Australie	272	Pérou	171	Mexique	110
Russie	266	Afrique du Sud	168	Ghana	104

Réserves d'or estimées par pays (en tonnes)

Australie	9 500	Indonésie.	3 000	Brésil	2 400
Russie	8 000	Etats Unis	3 000	Chine	2 000
Afrique du Sud	6 000	Pérou	2 400	Canada	2 000

Les métaux du joaillier

L'or et l'argent sont des métaux beaucoup trop mous pour être utilisés à l'état pur. On leur adjoint d'autres métaux. Le titre de l'or dans ces alliages est indiqué en carats, un carat exprimant 1/24ème. Ainsi 18 carats correspondent donc à 75% d'or pur. C'est l'or 18 carats qui est habituellement utilisé en bijouterie. Pour le platine et l'argent on parle de millièmes. Les alliages les plus utilisés par les joailliers :

Or jaune 18 carats : 75% d'or + 12.5% d'argent + 12.5 % de cuivre

Or blanc 18 carats : 75% d'or + 25% de palladium (ou 10% d'argent et 15% de palladium)

Or rose 18 carats : 75% d'or + 20% de cuivre + 5% d'argent

Platine 950 millièmes : 95% de platine + 5% d'iridium

Argent 925 millièmes : 92.5% d'argent + 7.5% de cuivre

Argent (Ag)

Poids sp. :	22.56 g/cm ³	Prod. annuelle	23'000 t.
Dureté :	6,5	Réserves estimées	300'000 t.
Point de fusion :	961°	Prix approximatif	500 \$ le kg

C'est un métal très malléable et ductile, blanc brillant. Il est connu depuis la plus haute antiquité pour la confection de bijoux et de monnaies.

Gisements

Dans la nature, l'argent se combine avec le soufre, l'arsenic et l'antimoine pour constituer divers minéraux qu'on retrouve dans les filons hydrothermaux. On le trouve aussi sous forme d'argent natif. Les principaux minéraux sont l'argentite, la proustite, la pyrargyrite, et la stephanite.

Ces minéraux sont très souvent associés à d'autres minerais sulfurés : pyrite (FeS₂), chalcopyrite (CuSeS₂), blende (ZnS), galène (PbS).

Minéraux d'argent



Argentite, Ag₂S
Maroc



Acanthite, Ag₂S, Maroc
(forme dimorphe de l'argentite)



Pyrargyrite, Ag₃SbS₃
Pribram Rép. tchèque



Proustite, Ag₃AsS₃
Maroc



Stephanite, Ag₅SbS₄
Freiberg, Allemagne



Argent natif, Copiapo, Chili
(Photo Rob Lavinsky)

Usage

L'argent a longtemps été aussi une réserve de richesse. Il prend une part importante dans la fabrication des bijoux et était autrefois utilisé pour la frappe de la monnaie. L'argent est devenu une expression courante dans les échanges économiques. Le prix de l'argent subit de grandes fluctuations. En 1967, la Banque nationale suisse a arrêté la frappe des pièces en argent car la valeur de l'argent contenu dans ces pièces était supérieure à leur valeur nominale ! En plus de son usage en bijouterie, l'argent a été abondamment consommé dans l'industrie photographique. On l'utilise aussi dans la construction des panneaux solaires et dans la médecine grâce à son action anti-bactérienne.



Platine (Pt)

Poids sp. :	21.45 g/cm ³	Prod. annuelle	230 t.
Dureté :	3,5	Réserves estimées	13'000 t.
Point de fusion :	1'768°	Prix approximatif	42'000 \$ le kg

Le platine est un métal blanc extrêmement dense, très malléable et de faible dureté. Il est très résistant à la corrosion.

Gisements

Les gisements des métaux du groupe du platine se trouvent généralement dans des roches magmatiques qui sont remontées en surface au travers de la croûte terrestre. C'est le cas du principal gisement mondial, celui du complexe du Bushveld, en Afrique du Sud. On le trouve à l'état natif sous forme de pépites arrondies en relation avec des roches ultrabasiques. Il apparaît aussi comme sous-produit de l'exploitations des gîtes de nickel-cuivre. Le platine natif renferme très souvent du palladium, de l'iridium, de l'osmium, du ruthénium et du rhodium.

Usage

La joaillerie a été pendant longtemps été la principale consommatrice du platine. Mais par ses affinités avec de nombreux éléments, le platine est un excellent catalyseur et son principal usage aujourd'hui se trouve, au côté du palladium, dans les catalyseurs des pots d'échappement des automobiles qui peuvent renfermer jusqu'à 5 g. de ces métaux précieux,



Pépité de platine natif,
Khabarovsk, Russie



Creuset en platine

Production

En 2016, la production de platine a atteint 172 tonnes. L'Afrique du Sud en est le principal producteur grâce à son gigantesque complexe minier du Bushveld.

Principaux producteurs de platine (en 2016)

Afrique du Sud	120 t	Zimbabwe	13 t.	Etats Unis	4 t.
Russie	23 t.	Canada	9t.		

Palladium (Pd)

Poids sp. :	12.2 g/cm ³	Prod. annuelle	280 t.
Dureté :	4,5	Réserves estimées	4'500 t.
Point de fusion :	1'555°	Prix approximatif	25'000 \$ le kg

Dans la croûte terrestre, le palladium est cinq fois plus abondant que l'or. C'est un métal blanc argenté, mou et malléable comme le platine. On le rencontre sous forme native accompagnant le platine.

Gisements

On le trouve surtout comme sous-produit dans les gisements de nickel-cuivre. Il n'y a que quelques rares minéraux renfermant du palladium. Parmi ces derniers, citons la stibiopalladinite, Pd₅Sb₂, la Coopérite (Pt,Pd,Ni)S et la Polarite Pd(Bi,Pb).

Usage

Le palladium a de multiples usages. Près de la moitié du palladium produit sert à la fabrication des pots catalytiques. Les bijoutiers l'utilisent de plus en plus en alliage avec l'or (or blanc). Il présente aussi un grand intérêt dans l'industrie électronique. Sa faculté d'absorber 900 fois son propre volume en hydrogène permet de sécuriser le stockage de ce gaz. Les pays producteurs sont la Russie (44%), l'Afrique du Sud (40%), le Canada (6%) et les Etats-Unis (5%).

Production

La production de palladium est un peu plus abondante que celle du platine. Sa production atteint 280 tonnes en 2016. La Russie et l'Afrique du Sud en sont les principaux pays producteurs

Principaux pays producteur de palladium (en 2016)

Russie	82 t	Canada	23 t.	Zimbabwe	10 t.
Afrique du Sud	73 t.	Etats Unis	13 t.		

Ruthénium (Ru)

Poids sp. :	10.5 g/cm ³	Prod. annuelle	30 t.
Dureté :	2,5	Réserves estimées	5'000 t.
Point de fusion :	1'064°	Prix approximatif	5'000 \$ le kg

Sous-produit de l'extraction du platine, du palladium ou du nickel, le ruthénium a la propriété, en faible quantité, de durcir des superalliages destinés aux pales de moteurs à réaction. Il intervient dans la fabrication des disques durs d'ordinateur en formant des revêtements de quelques atomes d'épaisseur entre deux couches magnétiques.

Rhodium (Rh)

Poids sp. :	12.4 g/cm ³	Prod. annuelle	23 t.
Dureté :	6	Réserves estimées	3'000 t.
Point de fusion :	1'964°	Prix approximatif	50'000 \$ le kg

C'est un métal blanc argenté très brillant, dur et cassant, difficile à extraire.

Usage

On l'utilise surtout pour ses propriétés de catalyseur dans les pots d'échappement. Il est utilisé comme revêtement des miroirs des télescopes à cause sa dureté élevée et son grand pouvoir réflecteur.

Production

En 2016, la production de rhodium a atteint 23.2 tonnes

Principaux producteurs de rhodium (en 2016)			
Afrique du Sud	18.5 t.	Zimbabwe	1.2 t.
Russie	2.5 t.	Canada	0.6 t.

Osmium (Os)

Poids sp. :	22.6 g/cm ³	Prod. annuelle	100 kg.
Dureté :	7	Réserves estimées	
Point de fusion :	3'033°	Prix approximatif	60'000 \$ le kg

Métal associé à l'iridium dans les gisements platinifères et aussi un sous-produit des gisements de nickel. C'est le métal le plus dense connu. Sa toxicité est élevée. Il constitue avec divers métaux des alliages extrêmement durs. Sa production annuelle ne dépasse pas une centaine de kilos.

Iridium (Ir)

Poids sp.	22.56 g/cm ³	Prod. annuelle	6 t
Dureté :	6,5	Réserves estimées	non connues
Point de fusion :	2'446°	Prix approximatif	42'000 \$ le kg

Métal blanc extrêmement dense et de dureté élevée. Très peu réactif chimiquement, c'est le métal le plus résistant à la corrosion. Dans la nature, on le trouve parfois à l'état natif mais, le plus souvent, c'est un des alliés du platine. Élément rare sur Terre, il est par contre présent en quantités appréciables dans les météorites métalliques. La limite délimitant le passage de l'ère secondaire à l'ère tertiaire est marquée par une fine couche argileuse riche en iridium. Il est presque certain que c'est la chute d'une météorite métallique géante qui est à l'origine de cet enrichissement.

Le platine iridié (90% Pt, 10% Ir), un alliage extrêmement stable et inoxydable a servi à l'élaboration du mètre étalon et à la définition du kilogramme. Par ses exceptionnelles qualités de dureté, il entre dans des alliages très spéciaux pour l'industrie aérospatiale.

Les terres rares

Les terres rares ne sont pas des terres et leur rareté n'est que toute relative. Le terme rareté qui leur est attribué provient de la grande difficulté de les isoler chimiquement.

Sous l'appellation de terres rares, on regroupe des métaux dont les propriétés électromagnétiques, très voisines les unes des autres, sont dues à une configuration électronique particulière. Leur importance croît de jour en jour car ils jouent un rôle indispensable dans les composants des ordinateurs et des smartphones, dans les écrans de télévision, dans l'industrie des éoliennes, dans l'aviation et dans l'industrie de l'armement. Les terres rares sont devenues des matériaux hautement stratégiques. Ils comprennent les 15 métaux du groupe des lanthanides auxquels on joint habituellement le scandium et l'yttrium qui ont des propriétés très semblables.

21Sc Scandium														
39Y Yttrium	Groupe des Lanthanides													
57La Lanthane	58Ce Cérium	59Pr Praséodyme	60Nd Néodyme	61Pm Prométhium	62Sm Samarium	63Eu Europium	64Gd Gadolinium	65Tb Terbium	66Dy Dysprosium	67Ho Holmium	68Er Erbium	69Tm Thulium	70Yb Ytterbium	71Lu Lutécium

Minerais des terres rares

Les terres rares ne sont pas si rares dans la croûte terrestre. Le cérium est plus abondant que le cuivre. Le thulium, qui est le plus rare parmi les terres rares, est tout de même quatre fois plus abondant que l'argent.

Mais voilà, les terres rares sont très disséminées dans les roches et il n'existe que peu de minéraux qui en renferment des quantités appréciables. Ce sont principalement la monazite, la bastnaesite, le xénotime, la gadolinite et l'euxénite. Le plus fréquent d'entre eux est la monazite qui, selon l'élément dominant dans sa composition, présente plusieurs variétés.

Minéraux renfermant des terres rares

Monazite-Ce	$(Ce,La,Pr,Nd,Th,Y)PO_4$	Bastnaesite	$(La,Sc,Y)CO_3F$
Monazite-La	$(La,Ce,Nd,Pr)PO_4$	Xénotime	$(Y,Ln)PO_4$
Monazite-Pr	$(Pr,Nd,Ce,La)PO_4$	Gadolinite	$(Ce,La,Nd,Y)FeBe_2Si_2$
Monazite-Nd	$(Nd,La,Ce,Pr)PO_4$	Euxénite	$(Y,Ca,Ce)(Nb,Ta,Ti)_2O_6$



Monazite, Brésil
(photo Arkenstone)



Xénotime, Brésil,
(photo Lavinsky)



Gadolinite,
Washington Pass, U.S.A.



Bastnaesite,
Pakistan



Euxénite
Madagascar

Usages

Les métaux des terres rares ont des usages multiples en l'électronique dans la miniaturisation des circuits électroniques, dans l'industrie automobile, en aéronautique, pour des besoins militaires et dans la construction des éoliennes. Leur présence est indispensable pour la fabrication des aimants permanents puissants, pour les écrans de télévision, les éclairages LED. Les terres rares les plus consommées sont le **lanthane**, le **cérium**, le **néodyme** et le **praséodyme**.

Le **lanthane** est indispensable dans les batteries des voitures hybrides, dans les piles à combustibles et dans l'électronique.

Dans les écrans de télévision, le rouge est produit par la luminescence d'un mélange **europium-yttrium**, le bleu par l'**europium** seul et le vert par le **terbium**.

Le **cérium** est un composant des panneaux solaires, des ampoules led et montre de larges applications dans le domaine de la chimie. Les pierres à briquet sont faites d'un alliage **cérium/lanthane/néodyme/praséodyme**.

Le **néodyme**, le **dysprosium**, le **cérium** et le **praséodyme** sont indispensables dans la confection des aimants permanents très puissants. Les aimants d'une éolienne nécessitent l'utilisation de 600 kg de néodyme. Une voiture hybride renferme 1 kg de néodyme et 10 kg de lanthane. Le **dysprosium** a aussi la propriété d'absorber les neutrons thermiques dans les installations nucléaires. Les commerçants utilisent des lampes halogènes dopées au néodyme qui avivent les couleurs de la viande, des fruits et des légumes.

Le **samarium** entre dans la composition des puissants aimants samarium-cobalt qui conservent leurs propriétés magnétiques à haute température.

Le **gadolinium** forme avec le fer et le chrome des alliages d'aciers spéciaux. Il entre dans la composition des disques compacts, dans les techniques d'imagerie IRM et dans les systèmes d'arrêt d'urgence des réacteurs nucléaires.

L'**holmium** permet d'obtenir les champs magnétiques les plus élevés connus jusqu'à ce jour. Il entre aussi dans la composition des barres de contrôle des réacteurs nucléaires.

L'**erbium** participe à l'élaboration des lasers et sert d'amplificateur de lumière dans les fibres optiques. Dans l'industrie nucléaire, on utilise sa forte capacité d'absorber les neutrons.

L'**ytterbium** participe à la construction de certains panneaux solaires. On l'utilise aussi comme dopant dans les lasers de grande puissance.

Le **scandium** participe, sous forme d'oxyde, à la confection de lampes halogènes dont le spectre lumineux est proche de celui du soleil. Allié en petite quantité (2%) à l'aluminium, il renforce ses propriétés mécaniques.

Le **thulium** est le plus rare parmi les terres rares. Son prix est supérieur à celui de l'or. Quelques rares applications : phosphorescence bleue pour les tubes cathodiques et magnétrons des fours à micro-ondes.

Le **lutécium** n'a que de très rares usages. Il sert de catalyseur dans certaines opérations de l'industrie pétrolière.



Aimant au néodyme ($Nd_2F_{14}B$) pour rotor de moteur.

Production et réserves de terres rares dans le monde

Le tableau ci-dessous montre la production annuelle de terres rares. Il est approximatif et n'a qu'une valeur indicative. La production annuelle est très fluctuante et dépend de négociations entre pays producteurs et pays utilisateurs. Pour les mêmes raisons, les prix peuvent subir des fluctuations très importantes.

	<i>Prod. annuelle</i>	<i>teneur dans la croûte terrestre</i>	<i>prix approximatif</i>
Scandium	quelques tonnes	26 ppm	10'000 \$ le kg
Yttrium	9'000 t.	31 ppm	30 \$ le kg
Lanthane	30'000 t.	140 ppm	8 \$ le kg
Cérium	75'000 t.	48 ppm	9 \$ le kg
Praséodyme	13'000 t.	8 ppm	130 \$ le kg
Neodyme	30'000 t.	30 ppm	85 \$ le kg
Promethium	<i>Élément radioactif qui n'existe plus dans la nature en raison de sa courte demi-vie (3.7 ans). Il apparaît comme isotope instable éphémère des produits de fission de l'uranium.</i>		
Samarium	4'500 t	190 ppm	25 \$ le kg
Europium	500 t.	2 ppm	700 \$ le kg
Gadolinium	2'000 t.	5 ppm	52 \$ le kg
Terbium	400 t.	1 ppm	1'000 \$ le kg
Dysprosium	1'500 t.	6 ppm	520 € le kg
Holmium	env. 100 t.	1 ppm	90 \$ le kg
Erbium	500 t.	3 ppm	700 \$ le kg
Thulium	50 t.	0.5 ppm	1'800 \$ le kg
Ytterbium	1'500 t.	2.2 ppm	22 \$ le kg
Lutecium	10 t.	0.5 ppm	10'000 \$ le kg

Les réserves connues aujourd'hui sont d'une centaine de millions de tonnes. Elles se répartissent de la manière suivante :

Réserves mondiales de terres rares estimées en 2009)

Chine	36'000'000 t.	Brésil	48'000 t.
U.S.A.	13'000'000 t.	Malaisie	30'000 t.
Australie	5'400'000 t.	Autres pays	41'000'000 t.
Inde	3'100'000 t.	Total	99'000'000 t.

La Chine détient le monopole des terres rares.

La Chine assure aujourd'hui près de 95% de la production mondiale de terres rares. Ses mines, situées pour la plupart en Mongolie intérieure, sont exploitées sans trop tenir compte de l'importante pollution engendrée par ses travaux ni de l'intégrité physique de ses travailleurs.



Mine de terres rares de Bayan Obo (Mongolie intérieure, Chine).

Cette position dominante inquiète beaucoup les industriels occidentaux. C'est ainsi que la Chine souhaite conserver le monopole de la production des produits finis nécessitant l'utilisation des terres rares. De petites quantités de terres rares sont produites en Inde, au Brésil, en Malaisie et en Russie. Des recherches intenses sont menées en vue de diversifier l'approvisionnement des ces matières. Elles sont menées aux U.S.A., au Canada, en Australie et en Russie.

Métaux de l'industrie nucléaire

Deux métaux assez largement répandus dans la croûte terrestre présentent non seulement une radioactivité naturelle mais peuvent participer au phénomène de la fission nucléaire qui permet de produire une énergie colossale. Ce sont l'uranium et le thorium.

Radioactivité et fission

Dans la nature, on trouve deux isotopes de l'uranium : 99.3% de ^{238}U et 0.7% de ^{235}U . Ces deux isotopes se transforment lentement en plomb en passant par divers éléments intermédiaires. C'est le phénomène de la radioactivité qui affecte les atomes dont le noyau est instable.

Ainsi ^{238}U se désintègre successivement en divers isotopes instables du thorium, du protactinium, du radium, du radon, du polonium pour aboutir finalement à un isotope stable de plomb : ^{206}Pb . Chaque 4.5 milliards d'années, la moitié de l'uranium 238 se transmute en plomb 206.

L'autre isotope, ^{235}U , suit un chemin semblable mais il ne lui faut que 700 millions d'années pour que la moitié de ses atomes se transforment en un autre isotope du plomb : ^{207}Pb . La vitesse de ces transmutations est immuable et il est impossible de ralentir ou d'accélérer ces processus.

Le thorium, ^{232}Th , se transforme très lentement en un autre isotope stable du plomb : ^{208}Pb , passant lui aussi par divers éléments instables (Ra, Ac, Ra, Rn, Po, Bi). Le thorium n'est pas très radioactif et il faut 14 milliards d'années pour qu'une moitié de ses atomes se transforment en plomb.

Mais l'intérêt principal de l'uranium c'est qu'il est susceptible de se scinder brutalement en deux atomes plus légers en émettant une quantité colossale d'énergie. C'est le phénomène de la **fission**. Les atomes ^{238}U peuvent subir la fission spontanément mais, heureusement, c'est un phénomène ultra rare. Par contre on peut provoquer à loisir la fission des atomes ^{235}U en les bombardant avec des neutrons. Les scientifiques peuvent donc provoquer cette fission à la demande et c'est ce qu'ils font dans les centrales nucléaires. A la limite, on peut même fabriquer des bombes atomiques.⁸

Bien que faiblement radioactif, le thorium est un élément qui intéresse l'industrie nucléaire car il est « fertile », c'est à dire qu'il se transforme facilement en ^{233}U qui est fissile. L'utilisation du mélange thorium-uranium sous la forme de sel fluorés fondus est susceptible de servir de base à de réacteurs dits de quatrième génération.

Uranium (U)

Poids sp. :	19.1 g/cm ³	Prod. annuelle	60'000 t.
Dureté :	6	Réserves estimées	3'500'000 t.
Point de fusion :	1'135°	Prix approximatif	300 \$ le kilo

Comme nous l'avons mentionné plus haut, l'uranium est composé de 2 isotopes : l'Uranium 238 dont le noyau comporte 92 protons et 146 neutrons et l'Uranium 235 qui comporte 92 protons et 143 neutrons. L'un et l'autre subissent la décroissance radioactive, mais à des vitesses différentes. La proportion de l'isotope 235 n'est aujourd'hui que de 0.7 %. Mais il y a 2 milliards d'années cette proportion avoisinait 3.5%.

Autre usage

⁸ Pour plus de détails voir du même auteur « Le Monde étrange des Atomes » et « Au Cœur de l'Atome » sur www.kasuku.ch

En dehors de son usage dans l'industrie nucléaire, on utilise l'uranium appauvri, c'est à dire ^{238}U débarrasser de son cousin très radioactif ^{235}U , pour son poids spécifique élevé (19.1 g/cm^3). Il permet pour fabriquer des obus très pénétrants, voir même comme lest de bateaux à voile.



L'uranium métallique n'est pas très radioactifs et peut être manipulé sans grand danger.

Eric Tabarly avait même équipé son Pen Duick VI d'une quille en uranium appauvri.

Ce sont les produits de désintégration, radium, radon, polonium qui sont très fortement radioactifs.

Gisements

L'uranium est relativement abondant dans la croûte terrestre, en particulier dans les roches granitiques qui en renferment 3 g/tonne. L'uraninite (ou pechblende) est un oxyde UO_2 . Elle apparaît dans les formations soumises à des imprégnations d'origine hydrothermale. Dans les zones oxydées des gisements, on trouve de très nombreux minéraux secondaires riches en oxygène (phosphates, sulfates, carbonates, vanadates...

Principaux minéraux d'uranium



Uraninite, UO_2



Autunite,
 $\text{Cu}(\text{UO}_2)(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$



Torbernite,
 $\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$



Sklodovsvite*,
 $\text{Mg}(\text{UO}_2)_2(\text{HSiO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
(en l'honneur de Marie Skłodowska)

Production

L'uranium est un métal hautement stratégique et sa commercialisation est très surveillée. Son prix est très fluctuant et dépend des tensions politiques. Les gisements les plus importants se situent au Kazakhstan et en Indonésie. Mais les réserves se situent principalement en Australie

Principaux pays producteurs d'uranium en 2014 (Soc.chim de France)

Kazakhstan	23'000 t.	Niger	4'000 t.	Ouzbékistan	2'400 t.
Indonésie	9'100 t.	Namibie	3'200 t.	Etats Unis	1'900 t.
Australie	5'000 t.	Russie	2'300 t.	Chine	1'500 t.

Réserves mondiales d'uranium par pays en 2009 (Wikipedia)

Australie	1'700'000 t.	Russie	480'000 t.	Brésil	278'000 t.
Kazakhstan	650'000 t.	Afrique du Sud	296'000 t.	Niger	272'000 t.
Canada	485'000 t.	Namibie	284'000 t.	Etats Unis	308'000 t.

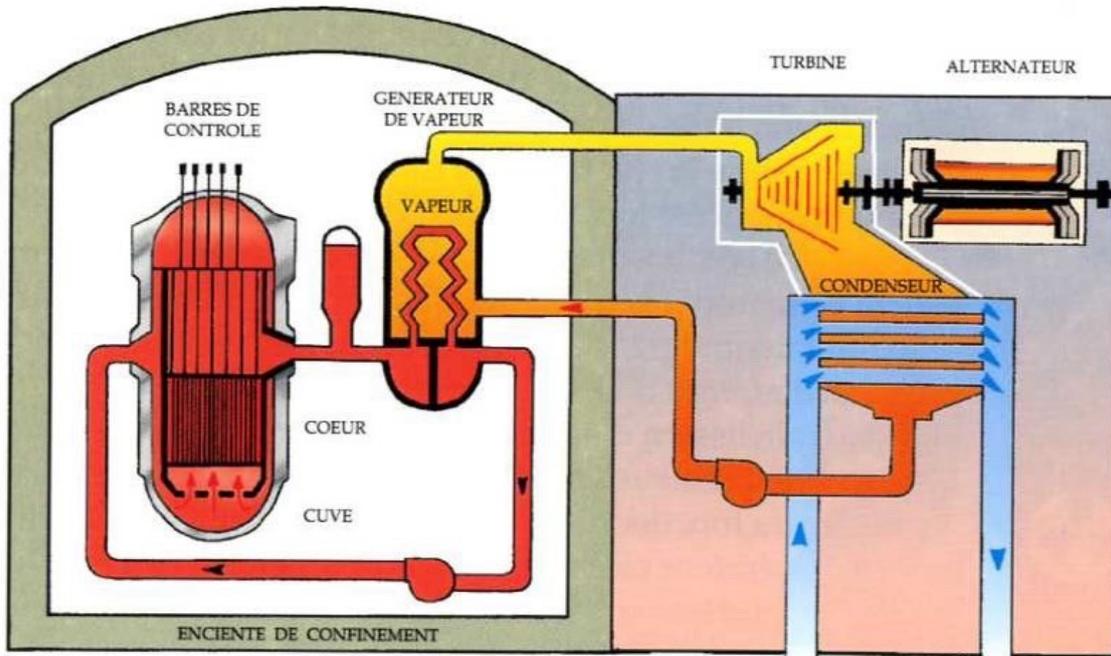


Schéma simplifié du fonctionnement d'une centrale nucléaire

Thorium (Th)

Poids sp. :	11.72 g/cm ³	Prod. annuelle	60'000 t.
Dureté :	3	Réserves estimées	3'500'000 t.
Point de fusion :	1'750°	Prix approximatif	300 \$ le kilo

Le thorium est un métal gris-blanc qui est protégé de l'altération grâce à l'oxyde qui le recouvre. L'oxyde de thorium (ThO₂) est l'un des meilleurs matériaux réfractaires existant avec une point de fusion de 3'300°.

Gisements

Le thorium est un élément assez bien réparti dans la croûte terrestre. Il est quatre fois plus abondant que l'uranium et environ aussi abondant que le plomb. On trouve le thorium dans la thorianite, ThO₂, la thorite, ThSiO₄ est, surtout dans la monazite, (Ce,La,Nd,Th)PO₄. Ce sont des minéraux des pegmatites et des filons hydrothermaux.

Minéraux renfermant du Thorium



Monazite,
(Ce,La,Nd,Th)PO₄
Brésil, photo Arkenstone



Thorianite, ThO₂
Madagascar, (coll.
Peter Haas)



Thorite, ThSiO₄
Ontario, Canada

Usage

La construction de centrales nucléaires utilisant la filière du thorium est l'objet de nombreuses recherches et l'avenir de ce métal est très prometteur. Le thorium constitue donc une énorme réserve potentielle d'énergie pour l'avenir.

Accessoirement, le thorium entre dans la composition d'alliages avec le magnésium. Dans le domaine de l'optique, le thorium permet de confectionner des lentilles à indice de réfraction élevé et faible dispersion, ce qui améliore la qualité des objectifs des appareils photo. Les manchons très lumineux des lampes à pétrole sont constitués d'oxyde de thorium.

Dans le sillage de l'Uranium

La transmutation lente des divers isotopes de l'uranium et du thorium provoque l'apparition temporaire de divers éléments trop instables pour subsister de façon pérenne dans notre environnement. Ceux dont la période de demi-vie est suffisante pour leur assurer une existence temporaire sont principalement le radium et le protactinium.

Radium (Ra)

Poids sp. :	5.5 g/cm ³
Point de fusion :	696 °

Le radium est un élément extrêmement radioactif qui aurait dû disparaître de la croûte terrestre en raison de sa courte période (1'600 ans). Mais c'est un élément important de la chaîne de désintégration de l'uranium et, pour cette raison, il se crée en permanence. Il est le responsable de l'importante radioactivité des minerais d'uranium.

Le radium a été longtemps la source principale de la radiothérapie et des peintures lumineuses des cadrans et aiguilles de montre. Sa production annuelle n'est que de quelques dizaines de grammes.

Après sa découverte par Marie Curie en 1898, on a cru que la radioactivité serait bénéfique pour la santé et on a vu apparaître des boissons, des crèmes et divers autres préparations au radium !

**Protactinium (Pa)**

Poids sp. :	15.37 g/cm ³
Point de fusion :	1'572°

C'est un métal dense gris argenté. En raison de sa rareté, de sa forte toxicité et de son importante radioactivité, le protactinium n'a pas d'utilisations pratiques actuelles autres que la recherche scientifique de base.

Au delà de l'uranium

L'uranium est le dernier élément relativement stable du tableau périodique. Des éléments nouveaux dits transuraniens sont apparus dans les produits de fission des centrales nucléaires. Ils sont produits par absorption de neutrons par ^{238}U . La plupart de ces nouveaux éléments n'ont qu'une espérance de vie très limitée et leur existence est anecdotique pour la plupart d'entre eux. Toutefois le plus abondant d'entre eux est le plutonium produit en relative abondance au cours du cycle des centrales nucléaires. On compte 5 isotopes du plutonium. On trouve encore du Neptunium, ^{237}Np , divers isotopes de l'Américium et du Curium en petites quantités.

Dans une centrale classique, le combustible est de l'uranium enrichi à 3.5 %. Une tonne de combustible nucléaire renferme donc : 967 kg d' ^{238}U et 33 kg d' ^{235}U .

Après avoir produit de l'énergie grâce principalement par la fission d' ^{235}U , le combustible usagé "usagé" renferme :

Eléments transuraniens et leurs divers isotopes

Uranium		Plutonium		Neptunium		Curium	
^{238}U	940.6 kg	^{239}Pu	5.67 kg	^{237}Np	0.43 kg	^{242}Cm	0.1 gr
^{235}U	10.3 kg	^{240}Pu	2.21 kg	Américium		^{243}Cm	0.3 gr
^{234}U	0.2 kg	^{241}Pu	1.19 kg	^{241}Am	0.22 kg	^{244}Cm	24 gr.
^{236}U	4.4 kg	^{242}Pu	0,49 kg	^{243}Am	0.10 kg		

Plutonium, Pu

Poids sp. :	19.8 g/cm ³	Réserves stockées	env. 1'000 t.
Point de fusion :	640 °	Prix approximatif	3'000 € le gr.

Le plutonium est produit en abondance au coeur des réacteurs nucléaires. Considéré comme déchets par les uns, il constitue pour d'autres des sources intéressantes de combustible nucléaire pour certains types de réacteurs. C'est évidemment un des constituants principaux des armes nucléaires. Les stocks actuels sont estimés à un millier de tonnes. C'est un métal hautement stratégique et les quantités produites sont sévèrement surveillées.

Neptunium, ^{237}Np

Poids sp. :	20.25 g/cm ³	Réserves stockées	non connues
Point de fusion :	644 °	Prix approximatif	non connu

Le Neptunium n'existe qu'à l'état de traces dans les minerais d'uranium. Des quantités non négligeables sont produites dans les centrales nucléaires. La demi-vie du principal isotope est de 2.14 millions d'années. Il n'existe pas d'usage civil connu de cet élément. Les militaires l'utilisent pour la confection d'armes nucléaires.

Américium, Am

Poids sp. :	12 g/cm ³	Réserves stockées	non connues
Point de fusion :	1'176 °	Prix approximatif	1500 \$ le gr.

L'isotope le plus fréquent, ²⁴¹Am a une demi-vie de 142 ans. Sa particularité est d'émettre en abondance des rayons α . On l'utilise pour cette propriété dans les détecteurs de fumées : une pastille d'Américium entretient un léger courant électrique grâce à l'émission de ses particules α . Les particules de fumées perturbent ce courant et donnent l'alarme.

Curium (Cm)

Poids sp. :	13.51 g/cm ³	Réserves stockées	env. 1 t.
Point de fusion :	1'345 °	Prix approximatif	²⁴⁴ Cm : 1'450 € le gr. ²⁴² Cm : 125 € le gr

Le Curium est présent dans les déchets nucléaires. On trouve de nombreux isotopes. Deux d'entre eux ont une application : ²⁴⁴Cm est une source de rayonnement gamma très intense nécessaire pour les spectromètres dans l'exploration spatiale et ²⁴²Cm est la source de chaleur des générateurs thermoélectriques des sondes spatiales.

Autres métaux

Dans cette catégorie un peu hétéroclite on a placé des métaux qui n'ont pas nécessairement une parenté chimique, mais qui ne trouvent pas vraiment leur place dans les catégories précédentes.

Parmi ceux-ci, le lithium prend une part croissante dans la confection des batteries lithium-ion. Malgré leur faible production, les inséparables niobium et tantale sont indispensables dans certains alliages légers de haute résistance et dans la fabrication de condensateurs miniaturisés nécessaires aux téléphones portables. L'indium entre dans la conception ces écrans tactiles, le zirconium sert à confectionner les gaines de combustible dans le cœur des centrales nucléaires et le gallium est un excellent semi-conducteur.

Lithium (Li)

Poids sp. :	0.53 g/cm ³	Prod. annuelle (2015)	32'500 t.
Dureté :	1	Réserves estimées	25'000'000 t.
Point de fusion :	180°	Prix approximatif	12'000 \$ la tonne

C'est un métal mou, gris-argenté et dont le poids spécifique est extrêmement faible. Très réactif, il s'oxyde très rapidement dans l'air et réagit brutalement avec l'eau. Sous sa forme métallique on doit le conserver dans une huile minérale.

Gisements

On trouve le lithium principalement dans deux minéraux, le spodumène et la pétalite qui apparaissent dans les pegmatites granitiques. On le trouve aussi sous forme de chlorure (LiCl) mélangé à d'autres sels dans les anciens lacs asséchés (salars) du Chili et de Bolivie.

Principaux minéraux de lithium



Spodumène, $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$
Afghanistan



Pétalite, $\text{Li}(\text{AlSi}_4\text{O}_{10})$
Minas Gerais, Brésil

Usage

Les sels de lithium entrent dans la composition de certains verres et céramique. On trouve le lithium aussi dans les régénérateurs d'air des sous-marins et des capsules spatiales.

Mais c'est la capacité du lithium d'emmagasiner de l'énergie qui est devenu son principal intérêt. C'est dans la fabrication des piles et des batteries au lithium que ce métal voit sa production augmenter. Tous les téléphones et ordinateurs portables sont équipés de batterie lithium-ion.

Production

Le développement des voitures électriques augmente considérablement la demande en lithium. La construction par Tesla Motors d'une usine géante pour produire les batteries nécessaires à ses automobiles participe largement à la demande de lithium. Cette demande est extrêmement forte et son prix explose. En 2017, la production mondiale s'est élevée à 43'000 tonnes

Principaux pays producteurs de lithium en 2015 (USGS)

<i>Australie</i>	<i>18'700 t.</i>	<i>Chine</i>	<i>3'000 t.</i>	<i>Portugal</i>	<i>300 t.</i>
<i>Chili</i>	<i>14'300 t.</i>	<i>Zimbabwe</i>	<i>900 t.</i>	<i>Brésil</i>	<i>160 t.</i>
<i>Argentine</i>	<i>5'800 t.</i>	<i>Canada</i>	<i>480 t.</i>		

Réserves mondiales de lithium par pays en 2009 (Wikipedia)

<i>Bolivie*</i>	<i>9'000'000 t.</i>	<i>Argentine</i>	<i>2'000'000 t.</i>	<i>Portugal</i>	<i>60'000 t.</i>
<i>Chili</i>	<i>7'500'000 t.</i>	<i>Australie</i>	<i>1'500'000 t.</i>	<i>Brésil</i>	<i>48'000 t.</i>
<i>Chine</i>	<i>3'200'000 t.</i>	<i>Canada</i>	<i>180'000 t.</i>	<i>Zimbabwe</i>	<i>23'000 t.</i>

Le plus grand gisement au monde de lithium se trouve dans le Salar de Uyuni, situé dans le département de Potosí, au sud-ouest de la Bolivie. Ce gisement représente un tiers des ressources mondiales de lithium. Son exploitation à venir fait l'objet des convoitises de nombreux exploitants.



Grand salar d'Uyuni, Bolivie

C'est le plus grand désert de sel du monde grand lac salé du monde situé à 3'600 m. d'altitude. Il renferme les plus grandes réserves de lithium au monde.

Niobium (Nb) (anc. columbium)

Poids sp. :	8.57 g/cm ³	Prod. annuelle (2015)	56'000 t.
Dureté :	6	Réserves estimées	4'300'000 t
Point de fusion :	2'477°	Prix approximatif	40 \$ le kg

Tantale (Ta)

Poids sp. :	16.4 g/cm ³	Prod. annuelle (2015)	1'200 t.
Dureté :	6	Réserves estimées	100'000 t.
Point de fusion :	3'017 °	Prix approximatif	250 \$ le kg

On ne peut pas dissocier le niobium du tantale car ils se trouvent ensemble dans la nature. Ils sont associés au sein du même minéral, la colombo-tantalite, $(Fe,Mn)(Ta,Nb)_2O_6$. La proportion de tantale/niobium est très variable, allant de la pure tantalite $(Fe,Mn)Ta_2O_6$ à la pure columbite $(Fe,Mn)Nb_2O_6$.

On en trouve encore dans la samarskite, la lueshite, et le pyrochlore.

Minéraux renfermant du Niobium et du Tantale



Colombo-tantalite
 $(Fe,Mn)(Ta,Nb)_2O_6$
Madagascar



Lueshite,
 $NaNbO_3$
Luesche, Kivu, Congo



Pyrochlore
 $(Ca,Na)Nb_2O_6(OH,F)$
Madagascar



Samarskite,
 $(YbFe_3U)_2(Nb,Ta)_2O_8$
Connecticut, U.S.A.

Ces minéraux apparaissent dans les pegmatites issues de roches granitiques. Dans le Nord du Kivu, il est facile de récolter la colombo-tantalite, appelée familièrement «coltan», d'une manière artisanale dans les pegmatites désagrégées. Le prix du coltan récolté rapporte environ 35 \$ le kg aux divers groupes armés qui rançonnent le pays.

Usage du niobium

Près de 90% du niobium entre dans la production d'alliages pour des aciers à haute résistance. Cela permet de diminuer significativement le poids des ponts, des gratte-ciels et des automobiles. Le niobium est devenu indispensable pour la construction des oléoducs. Les alliages niobium-germanium et niobium-titane sont supraconducteurs à 27° K. On les utilise pour créer les énormes champs magnétiques nécessaires tant aux appareils d'imagerie magnétique des hôpitaux qu'aux accélérateurs de particules.

Usage du tantale

La moitié de la consommation de tantale est destinée à la production de condensateurs miniaturisés pour les téléphones portables. Le tantale entre aussi dans la composition de superalliages à base de nickel pour les pales des turbines des réacteurs.

Production

La production mondiale de tantale s'est élevée à 1'200 t. en 2015, celle du niobium de 56'000 t.

Principaux pays producteurs de niobium en 2015 (USGS)

Brésil	50'000 t.	Ruanda	200 t.	Burundi	30 t.
Canada	5'000 t.	R. d.Congo	90 t.	Mozambique	20 t.

Principaux pays producteurs de tantale en 2015 (USGS)

Ruanda	600 t.	Brésil	150 t.	Chine	60 t.
R. d. Congo	200 t.	Nigéria	60 t.	Australie	50 t.

Gallium (Ga)

Poids sp. :	5.9 g/cm ³	Prod. annuelle (2015)	435 t.
Dureté :	1,5	Réserves estimées	non connues
Point de fusion :	29.7°	Prix approximatif	250 \$ le kg

Propriétés et usage

Le Gallium est un métal argenté très cassant et dont le point de fusion est très bas. Il n'existe pas de gisement de Gallium, mais cet élément se trouve en très faible quantité (30 à 80 ppm), dans certaines bauxites. L'arséniure de gallium, un excellent semi-conducteur, est largement utilisé dans les circuits électroniques et les panneaux photovoltaïques. Il participe aussi à la confection de diodes luminescentes. En raison de son faible point de fusion, le gallium remplace aujourd'hui le mercure dans les thermomètres médicaux.

Production

La production mondiale est d'environ 300 tonnes. On l'extrait au cours de la transformation de la bauxite en alumine. En 2015, la Chine a récupéré 120 tonnes de Gallium dans le traitement de la bauxite importée d'autres pays. Les productions ukrainienne et allemande de gallium proviennent des bauxites venant surtout de Guinée.

Indium (In)

Poids sp. :	7.31 g/cm ³	Prod. annuelle (2015)	755 t.
Dureté :	1	Réserves estimées	12'000 t.
Point de fusion :	156 °	Prix approximatif	550 \$ le kg

Propriétés et usage

L'indium est un métal gris brillant, très mou, ductile et malléable, à bas point de fusion. C'est un sous-produit qu'on récupère au cours du raffinage du zinc. On le trouve en quantité infime à l'état de traces dans les sulfures de zinc, de plomb et de cuivre. Son usage principal est la confection des écrans à cristaux liquides et des écrans tactiles. Grâce à son bas point de fusion, il est utilisé comme soudure froide entre les métaux et le verre. L'alliage comprenant 24 % d'indium et 76 % de gallium est liquide à température ambiante et on l'utilise alors dans les thermomètres médicaux. Il entre aussi dans la composition des barres de contrôle des réacteurs nucléaires.

Production

La production mondiale a été de 755 tonnes en 2015. La demande est beaucoup plus forte et le solde est issu du recyclage. Le pays producteurs sont surtout ceux qui raffinent les minerais sulfurés.

Principaux pays producteurs d'indium en 2015 (Soc. chim. de France)

Chine	350 t.	Canada	65 t.	Pérou	15 t.
Corée	150 t.	France	41 t.	Russie	10 t.
Japon	72 t.	Belgique	25 t.	Allemagne	10 t.

Zirconium (Zr) (métal)

Poids sp. :	6.52 g/cm ³	Prod. annuelle de zircon	1'460'000 t.
Dureté :	5	Réserves estimées	75'000'000 t.
Point de fusion :	1'855 °	Prix approximatif	80 \$ le kg

Gisements

Le zirconium est un élément relativement abondant dans la croûte terrestre. Il apparaît le plus souvent sous forme de zircon, ZrSiO₄, beaucoup plus rarement sous forme de baddeleyite, ZrO₂.



Zircon, ZrSiO₄,
Madagascar



Baddeleyite, ZrO₂
Phalaborwa, Afrique du Sud

Usage

Le zircon a de nombreuses utilisations dans l'industrie et la bijouterie et ce n'est que 1% du zircon exploité qui est transformé en zirconium métal.

L'industrie nucléaire représente 70 % des utilisations du zirconium. Il est employé sous forme d'alliage avec un peu d'étain pour la réalisation des gaines de combustible. Le zirconium entre aussi dans la composition de certains alliages pour l'aéronautique.

Sélénium (Se)

Poids sp. :	4.79 g/cm ³	Prod. annuelle (2015)	3'000 t.
Dureté :	2	Réserves estimées	120'000 t.
Point de fusion :	221°	Prix approximatif	40 \$ le kg

Le sélénium, tout comme le tellure, accompagne les minerais sulfurés de cuivre et de plomb. Il est récupéré au cours du traitement de ceux-ci. On compte 200 gr de sélénium par tonne de cuivre traité. La clausenthalite, PbSe, est un des très rares minéraux renfermant du sélénium.

Usage

Le sélénium améliore la qualité de l'acier inoxydable et du cuivre. Il est utilisé également dans le processus de production de manganèse électrolytique. Dans l'industrie du verre, il permet de faire disparaître la coloration verte due aux impuretés de fer. C'est également un excellent semi-conducteur et, à ce titre, il participe à la construction des panneaux solaires.

Production

La production mondiale de sélénium en 2015 a été d'environ 3'000 tonnes. Les réserves connues sont estimées à 120'000 tonnes. Elles se répartissent principalement entre la Chine, le Chili et la Russie.

Principaux pays producteurs sélénium en 2015 (Soc. chim. de France)

Japon	790 t.	Belgique	200 t.	Finlande	100 t
Allemagne	700 t.	Canada	160 t.	Pologne	90 t.
Chine	500 t.	Russie	150 t.	Chili	50 t.

Métalloïdes

On classe sous cette appellation une demi douzaine d'éléments chimiques dont les propriétés sont intermédiaires entre celles des métaux et des non métaux. Ils ressemblent à des métaux mais ne sont pas de bons conducteurs de l'électricité et leurs propriétés mécaniques sont faibles. Ils sont généralement utilisés à travers leurs alliages avec d'autres métaux. Dans cette classe, on place le bore, le silicium, le germanium, l'arsenic, l'antimoine et le tellure.

Bore (B)

Poids sp. :	2.08 g/cm ³	Prod. annuelle	2'000'000 t.
Dureté :	9	Réserves estimées	1'200'000'000 t.
Point de fusion :	2'076°	Prix approximatif	500 \$ la tonne

Le bore est assez abondant dans la croûte terrestre. L'eau de mer en renferme env. 5 mg/l. Il se concentre dans les évaporites principalement sous forme de tinkalite (borax), de colémanite, de kernite et d'ulexite,

Minéraux renfermant du bore

			
tinkalite (borax) $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ Boron, Californie (photo John Betts)	colémanite $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ Death Valley, California	kernite $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ Kern County, Californie (photo John Betts)	Ulexite $\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ Boron, Californie

Usage

Sous forme de borate de sodium, le bore il entre dans la composition du verre dont il abaisse le point de fusion et permet de produire des verres à faible coefficient de dilatation thermique (pyrex).

Dans l'industrie nucléaire sa propriété de capture des neutrons thermiques permet de régulariser et d'arrêter le fonctionnement des réacteurs.

Les divers composés du bore sont utilisés dans l'industrie pharmaceutique, pour les peintures, les détergents, les insecticides.

Production

La production mondiale exprimée en B_2O_3 est d'environ 2 millions de tonnes. La Turquie est le plus important producteur suivi par les Etats-Unis. En Amérique du Sud, la production vient d'Argentine, de Chili, du Pérou et de la Bolivie . Les réserves connues sont estimées à plus d'un milliard de tonnes dont près de 75% sont localisées en Turquie.

Principaux pays producteurs de bore (B_2O_3) en 2012

Turquie	914'000 t.	Amérique du Sud	300'000 t.	Chine	60'000 t.
Etats-Unis	520'000 t.	Russie	100'000 t.		

Silicium (Si)

Poids sp. :	2.33 g/cm ³	Prod. annuelle (2015)	2'600'000 t.
Dureté :	6,5	Réserves estimées	considérables
Point de fusion :	1'414 °	Prix approximatif	2'000 \$ la tonne

Le silicium est, après l'oxygène, l'élément le plus abondant de la croûte terrestre. Il est partout mais il n'existe pas dans la nature à l'état de corps simple. Sous forme d'oxyde c'est le **quartz**, minéral omniprésent dans les roches granitiques. Après dissolution de ces dernières il subsiste sous forme de grains et constitue le sable des rivières et des océans.

Du point de vue des chimistes, le quartz est la forme cristallisée de la silice, SiO₂. Les diatomées et les radiolaires, organismes microscopiques vivant dans les mers froides, sécrètent un squelette en silice plus ou moins amorphe.

Les gisements fossiles de diatomées constituent une roche blanchâtre appelée diatomite. Elles sont une source importante de silice. Les constructeurs de panneaux solaires ont besoin de **silicium métal** qu'il faut produire à partir de la silice.

Silice et silicium



Cristaux de quartz,
SiO₂



Diatomite
Roche siliceuse faite d'accumulation
de squelettes de diatomées



Sable de quartz
(source de silice pour
l'industrie du verre.)



Lingots et pastilles de
silicium métal

Usage

Plus de 50% de l'usage du silicium métal est de constituer avec l'aluminium un alliage léger et résistant qui permet de réaliser des pièces moulées très légères pour l'aéronautique. A l'état pur il sert à produire des pièces pour micro-mécanismes, des spiraux de montres mécaniques haut de gamme. Une partie importante de ce métal sert à fabriquer les silicones qui regroupent des huiles spéciales utilisées dans les transformateurs, les élastomères et les résines.

Ses qualités de semi-conducteur en font le composant principal des cellules solaires photovoltaïques.

Producteurs

La production mondiale de silicium métallurgique était de 2'600'000 t. en 2014. La Chine est le premier raffineur de silicium et possède le quasi monopole de la fabrication des panneaux photovoltaïques.

Principaux pays producteurs de silicium métallique en 2014 (USGS)

Chine	2'000'000 t.	Etats-Unis	150'000 t.	Brésil	92'000 t.
Norvège	150'000 t. t.	France	100'000 t.	Russie	50'000 t.

Germanium (Ge)

Poids sp. :	5.32 g/cm ³	Prod. annuelle (2015)	150 t.
Dureté :	6	Réserves estimées	non connues
Point de fusion :	938°	Prix approximatif	2'000 \$ le kg

Gisements

C'est un semi-métal gris-blanc, cassant, semi-conducteur qui n'existe que dans quelques rares minéraux, des sulfures qu'on trouve occasionnellement dans les filons hydrothermaux associés généralement aux gisements de zinc et de plomb. Ce sont l'Argyrodite, la Germanite, et la Reniérite.



*Argyrodite, Ag₈GeS₆
Freiberg, Allemagne*



*Germanite, Cu₁₃Fe₂Ge₂S₁₆
Tsumeb, Namibie*



*Reniérite, (Cu,Zn)₁₁Fe₄(Ge,As)₂S₁₆
Kipushi, Rép. dém. Congo*

Usage

Le germanium est indispensable dans l'industrie de l'optique. Il est utilisé surtout dans les fibres optiques dont il améliore l'efficacité. Il est utilisé aussi dans la fabrication des lentilles transparentes aux rayons infrarouges nécessaires pour les caméras thermiques à vision nocturne.

Le dioxyde de germanium (GeO₂), dont l'indice de réfraction est très élevé, est employé, toujours en optique, dans la fabrication des objectifs à grand angle. Les alliages de silicium-germanium sont employés pour la fabrication de circuits intégrés à grande vitesse.

La production mondiale de germanium est environ de 150 tonnes. Les principaux pays producteurs sont la Chine, la Russie, les Etats Unis et la République démocratique du Congo.

Arsenic (As)

Poids sp. :	5.72 g/cm ³	Prod. annuelle (2016)	130'000 t.
Dureté :	3,5	Réserves estimées	1'500'000 t.
Point de fusion :	817°	Prix approximatif	12'000 \$ la tonne

L'arsenic a des propriétés intermédiaires entre les métaux et les non métaux. A l'état natif, c'est un minéral gris-noir, gris à éclat métallique à la cassure. Chauffé à pression ordinaire, il se volatilise vers 450° et dégage une fumée blanche toxique à forte odeur d'ail. Connue aussi sous le terme peu flatteur de "poudre de succession", l'arsenic est un poison violent. Cette toxicité en restreint l'usage.

Origine

On trouve l'arsenic dans les filons hydrothermaux de basse température sous forme d'arsenic natif ou de sulfo-arséniures de fer, de nickel ou de cobalt.

Minéraux renfermant de l'arsenic



arsenic natif, Pérou



réalgar AsS
Hunan, Chine



orpiment As₂S₃
Yakutia Sibérie, Russia



arsénoopyrite FeAsS
Panasqueira, Portugal



cobaltite CoAsS
Ontario, Canada



nickéline NiAs
Ontario, Canada

Usage

Ce sont les composés chimiques de l'arsenic qui intéressent les industriels.. Sous forme d'arséniate de cuivre il est utilisé pour ses qualités de fongicide et d'insecticide pour l'imprégnation des traverses de chemin de fer, des poteaux électriques. D'autres composés sont utilisés comme herbicides.

Production

La production mondiale, exprimée en As₂O₃, est d'environ 36'000 tonnes.

Principaux pays producteurs d'arsenic* en 2015 (USGS)

Chine	25'000 t.	Russie	1'500 t.	Bolivie	50 t.
Maroc	8'500 t.	Belgique	1'000 t.	Japon	45 t.

* exprimés en As₂O₃

Antimoine (Sb)

Poids sp. :	0.53 g/cm ³	Prod. annuelle (2015)	135'000 t.
Dureté :	1	Réserves estimées	14'000'000 t.
Point de fusion :	630°	Prix approximatif	14'000 \$ la tonne

L'antimoine est une substance brillante de couleur argentée. C'est un mauvais conducteur de la chaleur et de l'électricité. Connu dès la plus haute antiquité, l'antimoine était utilisé comme fard pour accentuer le contour des yeux et dans la confection de récipients de cuivre recouvert d'antimoine. Il a été pendant longtemps l'élément magique des alchimistes qui pensaient pouvoir transformer un alliage de mercure et d'antimoine en or !

Gisements

Comme son cousin l'arsenic, l'antimoine apparaît dans de nombreux minéraux des filons hydrothermaux sous forme de sulfo-antimoniures de plomb, de cuivre, de zinc et d'argent. Tout comme l'arsenic, il est toxique.

Minéraux renfermant de l'antimoine



stibine, Sb₂S₃
Herja, Roumanie



jamesonite
Pb₄FeSb₆S₁₄
Hunan, Chine



bournonite, CuPbSbS₃
Bolivie



tétraédrite,
(Cu,Fe,Ag,Zn)₁₂Sb₄S₁₃
Pérou

Usage

Rarement utilisé seul, l'antimoine est souvent utilisé comme additif dans certains métaux dont il augmente la dureté, en particulier dans les plaques des batteries au plomb, les balles de fusil, les plombs de chasse et, jadis, dans le plomb des imprimeurs. On l'utilise encore pour la soudure sous forme d'alliage plomb/antimoine/étain. Mais c'est surtout comme retardateur de flamme, sous forme de Sb₂O₃ que son usage est le plus important.

Production mondiale

En 2016, la production mondiale d'antimoine métal se montait à 130'000 tonnes. Les réserves connues sont estimées à 1'500'000 tonnes.

Principaux pays producteurs d'antimoine en 2016 (USGS)

Chine	100'000 t.	Bolivie	4'000 t.	Turquie	2'500 t.
Russie	9'000 t.	Australie	3'500 t.	Viet-Nam	1'000 t.
Tadjikistan	8'000 t.	Birmanie	3'000 t.		

Tellure (Te)

<i>Poids sp. :</i>	<i>6.23 g/cm³</i>	<i>Prod. annuelle</i>	<i>250 t.</i>
<i>Dureté :</i>	<i>2</i>	<i>Réserves estimées</i>	<i>22'000 t.</i>
<i>Point de fusion :</i>	<i>988°</i>	<i>Prix approximatif</i>	<i>400 \$ le kg</i>

C'est un éléments très rare dont l'usage est restreint. On extrait le tellure des résidus de traitement des minerais de plomb et de cuivre.

En faible quantité, il améliore l'usinage de l'acier. Il entre aussi dans la composition d'explosifs, de cellules photovoltaïques, de pigments, de fongicides et de pesticides. Sa production n'excède pas 250 t. par an.

Quelques minéraux exploités par l'Homme

De nombreux minéraux sont exploités pour un usage direct ou transformés à des fins industrielles. Par exemple le talc et la halite (sel de cuisine) sont consommés quasiment sans transformation. Le kaolin est nécessaire pour confectionner la porcelaine, le gypse pour produire le plâtre et la sylvine et le principal ingrédient des engrais potassiques.



Dépôts de sel sur le lac Assal, Djibouti

Situé à plus de 150 mètres au-dessous du niveau de la mer, ce lac renferme plus de 350 gr. de sel par litre.



Cubes de halite,

Halite ou sel gemme NaCl

Cubes fréquents, masses informes, filons compacts. Transparent à translucide, habituellement incolore, parfois teinté en bleu ou rouge, éclat vitreux. Soluble dans l'eau, saveur salée.

Densité : 2.16

Dureté : 2.5

Produit dans les salines à partir de l'eau de mer et dans les roches sédimentaires issues d'anciens bassins lagunaires riches en sels et dans les lacs salés en voie d'évaporation.

Usages :

L'industrie chimique est le plus gros consommateur de NaCl qu'elle transforme en soude caustique (NaOH), en carbonate et en sulfate de sodium (Na_2CO_3 et Na_2SO_4) utilisés en verrerie et dans l'industrie du papier. Le déneigement en consomme encore près de 15% et l'alimentation humaine ne consomme que le 10% du sel produit.

Production annuelle :

Elle s'élève à 255 millions de tonnes

Les principaux pays producteurs sont la Chine, l'Inde, les Etats-Unis et le Maroc.

Prix variable entre 50 et 100 \$ la tonne suivant la qualité.



Sylvine KCl

Masses informes souvent rubanées de teinte rougeâtre

Densité : 2

Dureté : 2.5

Dans les roches sédimentaires issues d'anciens bassins lagunaires riches en sels et dans les lacs salés en voie d'évaporation.

Usages :

La sylvine est la principale source de potassium. La potasse est aussi un terme qui désigne l'engrais potassique nécessaire à l'agriculture.

Production annuelle :

Elle s'élève à environ 65 millions de tonnes produites principalement par la Canada, la Russie et la Biélorussie qui détiennent 70% du marché mondial et 90% des réserves mondiales connues.

Le prix est d'environ 220 \$ la tonne.



Fluorine, Illinois.

Fluorine CaF_2

Minéral généralement bien cristallisé en cubes, octaèdres et dodécaèdres ou remplissage massif de fissures. Eclat vitreux incolore, bleu, vert ou rouge.

Densité : 3.18

Dureté : 4

Son origine est hydrothermale. On la trouve dans les filons hydrothermaux de basse température souvent associée à la barytine.

Usages :

La fluorine sert à synthétiser la cryolite (Na_3AlF_6), un minéral rare utilisé lors du processus d'électrolyse de l'alumine pour la production d'aluminium. Elle sert aussi à la production de l'acide fluorhydrique (HF) et à la production d'hexafluorure d'uranium (UF_6) qui est utilisé pour l'enrichissement en ^{235}U des combustibles nucléaires. La fluorine a encore de nombreuses utilisations dans l'industrie chimique.

Production annuelle :

La production s'élève à 7 millions de tonnes. Les réserves estimées à 240 millions de tonnes. Les principaux pays producteurs sont la Chine, le Mexique, la Mongolie et l'Afrique du Sud.

Prix : environ 300 \$ la tonne.



Barytine $BaSO_4$

Minéral incolore, blanc laiteux, gris, parfois teinté de couleurs diverses. Eclat vitreux.

Prismes aplatis associés en feuillets épais

Densité : 4.5

Dureté : 3

Son origine est hydrothermale. On la trouve dans les filons hydrothermaux de basse température et dans des dépôts stratiformes.

Barytine, St. Laurent le Minier, Gard, France

Usages :

On utilise la barytine pour sa densité élevée, pour sa blancheur et son opacité. Son principal usage est son adjonction dans les boues à densité élevée des forages pétroliers. On l'utilise comme opacifiant dans les peintures et dans le papier. Elle est aussi opaque aux rayons X. Elle entre aussi dans la composition de bétons de forte densité qui peuvent servir de barrières aux radiations dans les installations nucléaires.

Production annuelle :

La production annuelle s'élève à 8.5 millions de tonnes. Les principaux pays producteurs sont la Chine, l'Inde, les Etats-Unis et le Maroc. Le prix varie entre 200 et 1000 \$ la tonne suivant la qualité.



Soufre, S

Cristaux tabulaires épais, dépôt massif, enduits. Jaune, éclat résineux à adamantin.

Densité : 2.1

Dureté : 1 à 2

Origine sédimentaire. On trouve aussi le soufre en encroûtements autour des fumerolles volcaniques. On extrait le soufre principalement au cours de la désulfuration des hydrocarbures.

Soufre natif, Sicile

Usages

Le soufre est destiné principalement (90%) à la fabrication de l'acide sulfurique, produit de base de nombreux composés de l'industrie chimique, en particuliers les sulfates. Le soufre entre aussi dans la composition du caoutchouc dont il améliore l'élasticité.

Production

La production s'élève à 70 millions de tonnes. Une partie importante du soufre provient de la désulfuration des hydrocarbures.

Prix variable entre 200 et 1000 \$ la tonne suivant la qualité.

Les principaux pays producteurs sont la Chine, l'Inde, les Etats-Unis et le Maroc.



Gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Cristaux tabulaires incolores, transparents avec présence fréquente de la macle en "fer de lance". Masses blanchâtres, parfois habitus fibreux à éclat nacré.

Densité : 3.18

Dureté : 4

Son origine est soit les roches sédimentaires issues d'anciens bassins lagunaires riches en sels et dans les lacs salés en voie d'évaporation. On le trouve aussi dans les filons hydrothermaux de basse température souvent associée à la barytine.

Usages :

Son principal usage est la fabrication du plâtre.

Production annuelle :

La production s'est élevée en 2016 à 263 millions de tonnes. Les réserves connues sont considérables.

Les principaux pays producteurs sont la Chine, l'Iran, les Etats-Unis et la Turquie.

Prix : environ 40 \$ la tonne.



Graphite C

C'est la forme cristallisée stable du carbone. Masse compacte noire à gris acier à l'éclat métallique, onctueuse au toucher.

Densité : 2,1 à 2.2

Dureté : 1 à 2

Point de fusion : 3'550°

On trouve le graphite dans certaines veines d'origine hydrothermale, dans des roches sédimentaires exposées au métamorphisme de contact.

Usage :

Les mines de crayon en sont l'usage le plus connu. Il entre aussi dans la fabrication des piles alcalines, dans celle des anodes et cathodes des fours électriques, des disques de freins et dans la confection des creusets de hauts fourneaux.

Production annuelle :

Elle est d'environ 650'000 tonnes. La Chine assure les deux tiers de cette production suivie du Brésil, du Canada, de la Corée du Nord et de l'Inde.

Le prix du graphite varie entre 600 et 1'000 \$ la tonne.



Kaolin $Al_2Si_2O_5(OH)_4$

Très rares cristaux lamellaires à éclat nacré. Le plus souvent en masses argileuses blanchâtres à l'aspect terreux. L'accumulation de kaolin forme les gisements de kaolinite.

Densité : 2.5

Dureté : 2.5

Il provient de l'altération des feldspaths abondants dans les roches granitiques.

Usages :

Dans l'industrie papetière, il augmente l'opacité, la blancheur et l'éclat du papier. On l'utilise aussi comme charge dans les peintures. Le kaolin est surtout le principal constituant de la porcelaine.

Production annuelle :

La production s'est élevée en 2016 à 37 millions de tonnes.

Les principaux pays producteurs sont les Etats-Unis, le Brésil, l'Ukraine et la Chine

Prix : environ 200 \$ la tonne.



Talc $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$

Masse compacte ou feuilletée. Le talc est sécable et très mou. Toucher onctueux. Vert pâle à éclat nacré.

Densité : 2,7

Dureté : 1

C'est un minéral de faible métamorphisme issu de l'altération par hydratation des roches magnésiennes.

On lui associe généralement la pyrophyllite, $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$ dont les propriétés sont très voisines et dont les usages sont semblables

Usage :

Il entre dans la composition des céramiques, des peintures dont il améliore le pouvoir couvrant. Il est utilisé dans la fabrication de la pâte à papier, du caoutchouc. Il est surtout connu pour son usage dans les cosmétiques

Production annuelle :

Elle est d'environ 7 millions de tonnes (talc et pyrophyllite). Parmi les principaux producteurs on trouve la Chine, l'Inde, le Brésil, les Etats-Unis, la France, l'Afghanistan et la Finlande.

Le prix du talc varie entre 100 et 1'000 € la tonne suivant sa qualité.



Magnésite $MgCO_3$

Masse compacte blanche Très rares cristaux rhomboédriques

Densité : 2,95

Dureté : 4

C'est un minéral d'altération de roches sédimentaires riches en magnésium.

Usage :

Transformée par calcination en MgO , c'est la magnésie dont les gymnastes s'enduisent les mains. La magnésie entre dans la production de briques réfractaires. Elle est utilisée comme amendement agricole pour stabiliser l'acidité des sols, comme fondant dans le métallurgie, comme abrasif doux dans le polissage des métaux et dans les dentifrices et, en médecine, pour calmer les brûlures d'estomac.

Production annuelle :

Elle est d'environ 8 millions de tonnes. Les principaux producteurs sont la Chine avec 5.8 millions de tonnes suivie de la Turquie et de la Russie.

Le prix de la magnésite est d'environ 300 € la tonne.

Les matériaux de construction

Le domaine de la construction est un gros consommateur de matériaux divers, sable, graviers, ciment, fer à béton, pierres de construction, briques, tuiles, marbres, bois, plâtre.

Le béton

On produit environ 6 milliards de m³ de béton par an dans le monde. Avec une densité moyenne de 2,4 g/cm³, cela représente plus de 14 milliards de tonnes. C'est le matériau le plus consommé au monde.

Pour confectionner ce volume de béton, il faut environ :

- 4.6 milliards de tonnes de ciment
- 2.5 milliards de m³ de sable
- 4.2 milliards de m³ de gravier

Pour le béton armé, il faut compter encore 80 à 100 kg d'acier par m³ de béton.



Six millions de mètres-cubes de béton !

Le barrage de la Grande Dixence est le plus haut barrage poids du monde. Sa hauteur atteint 285 mètres. L'épaisseur du barrage est de 193 mètres à la base et de 15 mètres au sommet. Il a fallu 6 millions de m³ de béton pour le réaliser soit plus du double du volume de la Pyramide de Chéops.

Ciment

Le ciment est un liant qui durcit sous l'action de l'eau. C'est l'ingrédient indispensable à la production du béton. Il se présente sous forme de poudre qui va durcir progressivement par adjonction d'eau. Le ciment est constitué de minéraux obtenus par la calcination de calcaires argileux dans d'immenses fours rotatifs. Les phases minérales obtenues sont des aluminates et des silicates de calcium anhydres. Ce sont principalement la alite, Ca_3SiO_5 , la bélite, Ca_2SiO_4 , un aluminat tricalcique, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$, ou encore $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ et de la chaux, CaO .

L'ajout d'eau forme une pâte à l'intérieur de laquelle ces substances vont s'hydrater et former des phases minérales solides qui entraînent le durcissement de la la masse pâteuse.



Exploitation de calcaire argileux pour la production de ciment. Carrière Lemay, Belgique



Four à ciment de plus de 150 mètres de long à Hagerstown (Maryland, U.S.A.)

Production mondiale

En 2016 la production de ciment s'est élevée à 4.6 milliards de tonnes. La production et la consommation sont plus ou moins proportionnelles à la population d'un pays.

Production et consommation mondiale de ciment en 2016

Chine	2'511.000.000 t.	Brésil	78'000'000 t.	Indonésie	61'000'000 t.
Inde	280'000'000 t.	Russie	73'000'000 t.	Arabie séoudite	57'000'000 t.
Etats-Unis	93'000'000 t.	Turquie	64'000'000 t.	Egypte	52'000'000 t.

Sables et granulats

La charge du béton est assurée par un mélange de gravier et de sable. Ce dernier prend place dans les interstices laissés libres par le gravier. Les graviers destinés au béton sont désignés sous le terme général de granulats.

Le volume annuel des granulats destinés à la confection du béton est estimé à 4.2 milliards de m³ et celui du sable à 2.5 milliards de m³.



Exploitation de sables et graviers dans la Meuse, Belgique

Autres usages

Plus généralement, le terme de granulat s'applique à toute roche fragmentée. Son usage dépasse très largement son emploi pour le béton. Suivant sa granulométrie on aura les ballasts pour chemins de fer, les assises des routes et des remblais divers. A ce titre, les sables font partie des granulats. Sables et granulats sont actuellement surexploités.

La consommation de sables et granulats, en dehors de leur utilisation pour le béton, est d'environ 50 milliards de tonnes par année. Par exemple, un km d'autoroute nécessite l'emploi de 30'000 tonnes de sable et granulat. Il faut 2'000 tonnes de ballast par km de voie de chemin de fer.



Ballast de chemin de fer constitué de granulats entre 20 et 63 mm

Briques et tuiles

Une partie importante des constructions dans le monde se font en briques et les toits sont toujours recouverts de tuiles. Les briques et les tuiles nécessitent l'exploitation de très nombreuses carrières d'argile. La production annuelle de briques dépasse 2 milliards de tonnes.



Briques et tuiles en terre cuite sont largement utilisées en architecture.

Production et consommation de briques en terre cuite.

Chine	1'300'000'000 t.	Europe	90'000'000 t.	Pakistan	18'000'000 t.
Inde	360'000'000 t.	Iran	23'000'000 t.	Russie	16'000'000 t.
Brésil	100'000'000 t.	U.S.A.	19'000'000 t.	Afrique du Nord	14'000'000 t.

Marbres, granites et autres pierres décoratives

Le secteur de la marbrerie est aussi un gros consommateur de produits naturels. La consommation mondiale est d'environ d'un milliard et demi de m³ de produits finis. De gigantesques saignées sont réalisées pour produire les pierres décoratives.



Aperçu de l'exploitation du marbre près de Carrare



Découpage du marbre dans une carrière



Découpage d'un bloc de roche



Découpage du granite dans une carrière

Prix et épuisement des ressources minérales

Épuisement des réserves

Oui, nous piochons allègrement dans les ressources minérales que nous offre notre planète. Nous obtenons encore assez facilement le cuivre, le plomb, l'aluminium et tous les autres métaux dont nous avons besoin pour garantir notre confort et le niveau de vie auquel nous autres occidentaux sommes habitués.

Pour garantir ce niveau de vie à une population qui croît à grande vitesse et pour assouvir les besoins des centaines de millions d'humains qui n'ont pas encore atteint ce même niveau de vie, il faut évidemment augmenter considérablement la production minière.

De nombreux sites alarmistes prospèrent sur internet et sur les réseaux sociaux. Ils mettent en regard les réserves connues de minerai et la consommation mondiale actuelle. Ils divisent le premier terme par le second et prédisent dans combien d'années il n'y aura plus rien. C'est un calcul simpliste qui ne résiste pas à une vision plus large du problème.

Réserves prouvées, réserves probables

*Les sociétés minières, dans un but de prospective, mesurent la quantité des réserves sur lesquelles elles peuvent compter à coup sûr pour poursuivre leur activité. Sur la base d'études géologiques conduites par des campagnes de sondages plus ou moins profonds, elles calculent la quantité des réserves bien identifiées sur lesquelles elles peuvent compter. Ce sont les **réserves prouvées**.*

*A plus large échelle, sur un contexte géologique plus étendu, elles peuvent faire aussi une estimation des réserves sur lesquelles elles pourraient raisonnablement compter dans un avenir plus lointain. Ce sont les **réserves probables**.*

Ces calculs sont faits sur la base de la rentabilité. Si le cours du métal exploité augmente, les parties les moins rentables des gisements entrent alors dans le calcul des réserves. Ainsi, pour faire rouler nos voitures, il n'y a presque plus d'essence à un euro le litre mais il y en a encore beaucoup à 5 ou 10 euro le litre ! Il en est de même pour les ressources minières : si le prix des métaux augmente, les gisements non rentables aujourd'hui le seront sûrement demain !

Prix des métaux

Les prix des matières premières minérales obéissent à la loi de l'offre et de la demande. Les contrats à plus ou moins longs termes s'établissent généralement de gré à gré entre le producteur et l'utilisateur. Les prix ne sont généralement pas publics mais sont disponibles par le biais de divers organismes payants qui les diffusent à leurs clients.

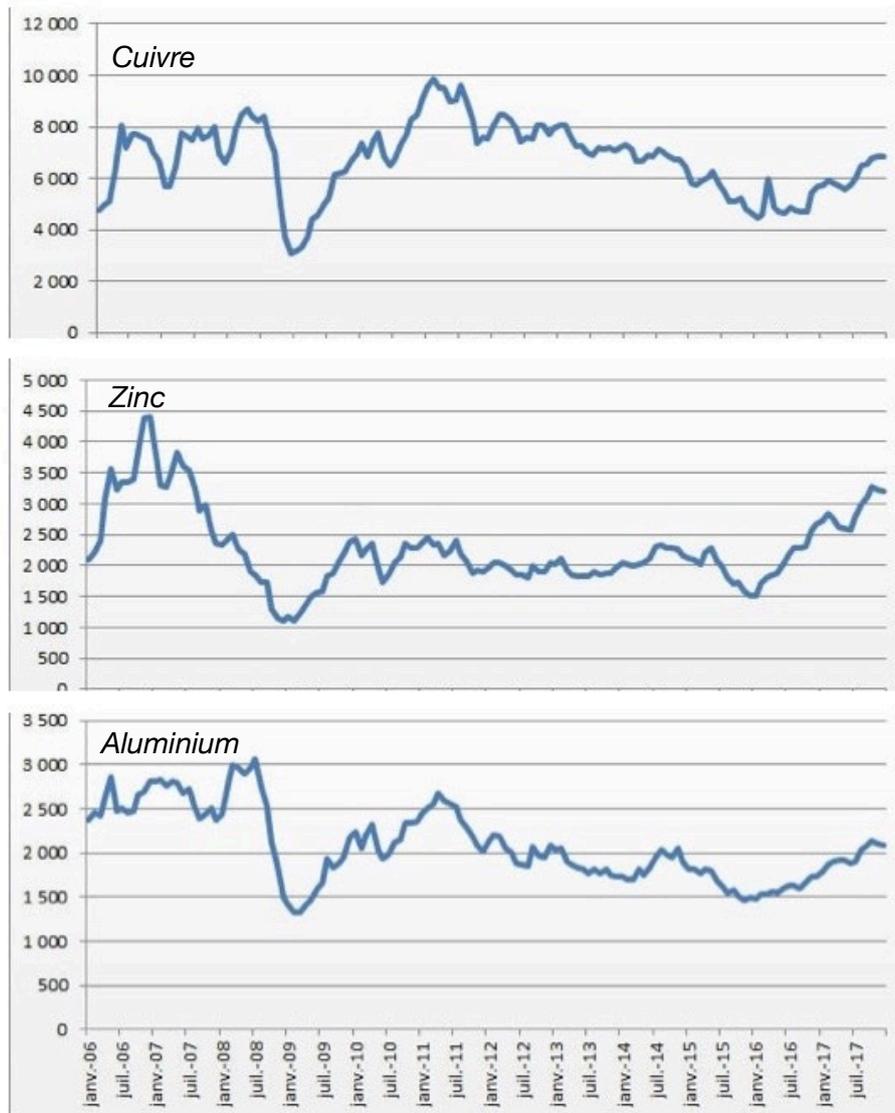
Une dizaine de métaux importants (aluminium, étain, cuivre, plomb, zinc, nickel, molybdène, cobalt et billettes d'acier⁹) sont cotés chaque jour au "London Metal Exchange" (LME). Les métaux précieux (or, argent, platine, palladium) font également l'objet d'une cotation journalière auprès du "London Bullion Market Association" et du "London Platinum and Palladium Market".



Billettes d'acier

⁹ les billettes d'acier sont des lingots d'acier de plusieurs mètres de longueur et de section carrée

Prix du cuivre, du zinc et de l'aluminium en dollars par tonne entre janvier 2006 et juillet 2017



(réf: journaldunet.com)

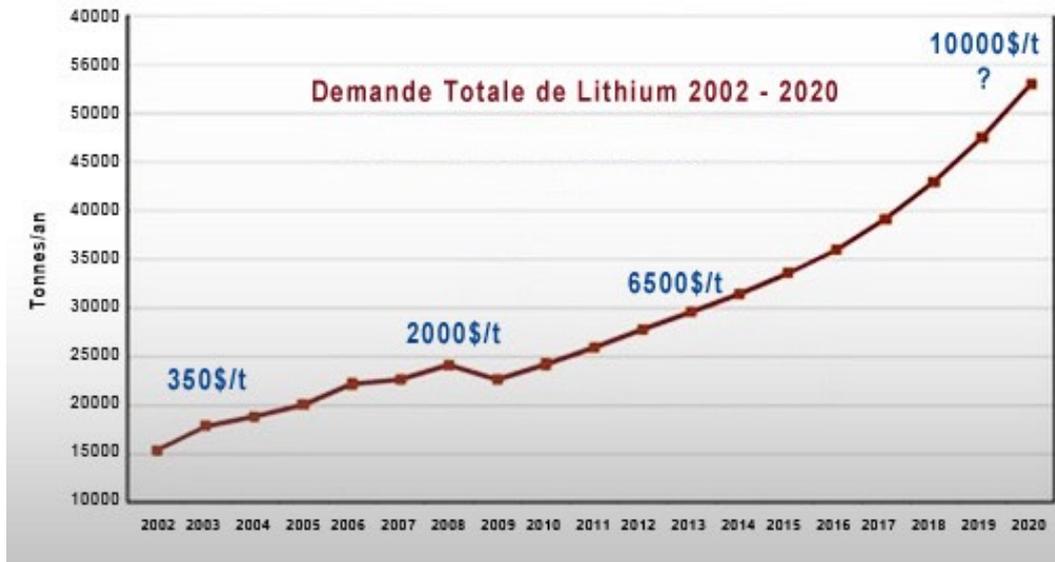
Les prix dépendent de la conjoncture économique

La demande est fortement influencée par le contexte économique. Durant la crise 2008-2009, le prix des principaux métaux se sont effondrés comme le montrent les graphiques ci-dessous.

Le prix du cuivre est tombé à 3'000 \$ la tonne en 2009 puis a rebondi à près de 10'000 \$ la tonne en 2011 pour se stabiliser actuellement aux alentours de 6'000 \$ la tonne. Les cours du zinc et de l'aluminium ont suivi des variations analogues. Les prix indicatifs mentionnés dans cet opuscul ne sont donc que des ordres de grandeur. Ils peuvent changer du simple au double en relativement peu de temps La demande pousse les cours à la hausse

Sous la pression des milieux écologiques, on encourage l'usage des voitures électriques. Cela nécessite la production accélérée de batteries lithium/ion. La firme Tesla construit une usine gigantesque pour produire ces batteries en masses. La demande en lithium augmente rapidement et le cours du lithium, un métal plutôt rare, s'envole. En 2003 le carbonate de lithium valait 350 \$ la tonne pour atteindre 6'500 \$ la tonne dix ans plus tard. Selon les économistes, le prix du lithium pourrait atteindre 10'000 \$ la tonne en 2020.

Evolution du prix du lithium en fonction de la demande



Taux de recyclage

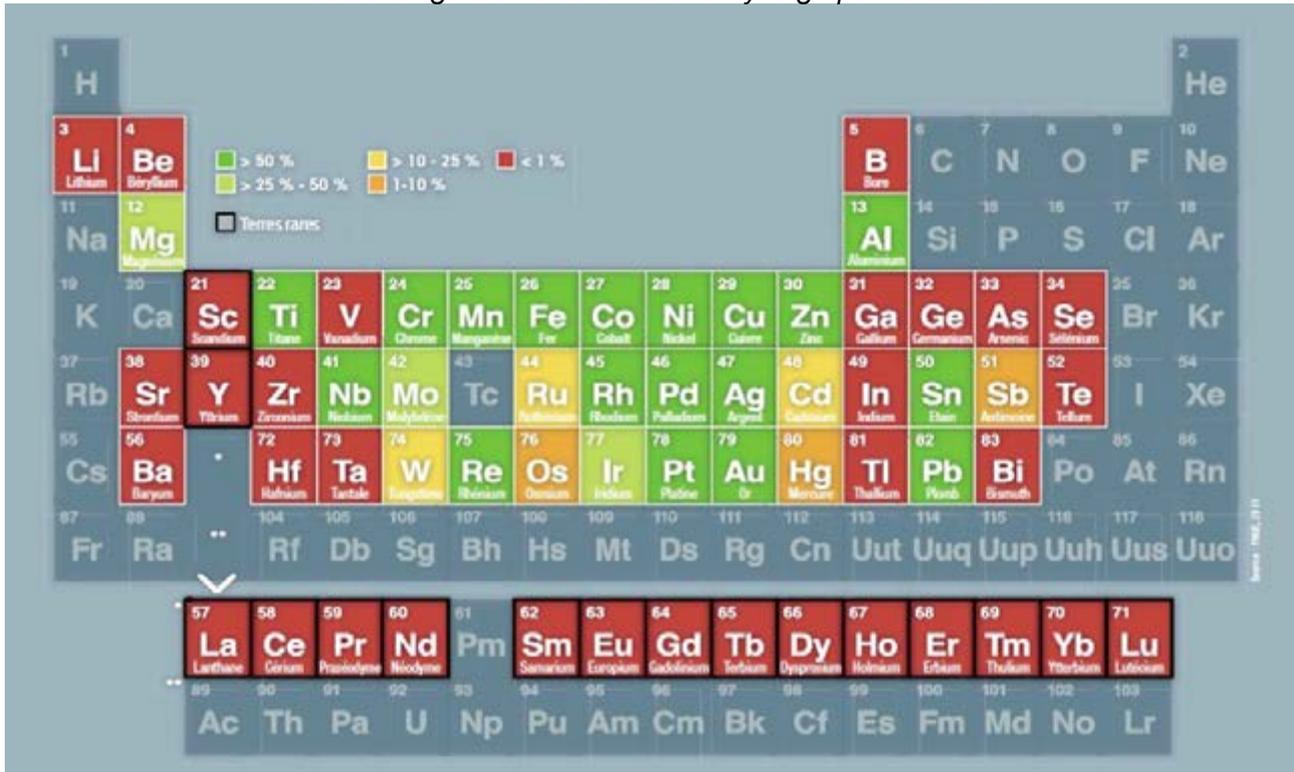
Si on compare la production mondiale d'un métal donné et la demande des consommateurs, on constate souvent une différence entre les chiffres de la production minière et ceux de la demande des utilisateurs. Par exemple, en 2015, la production mondiale d'or a atteint 3'158 tonne. La demande de ce même métal a été d'environ 4'300 tonnes. La différence s'explique par le recyclage de l'or. Le taux de recyclage de l'or a été d'environ 26% de la consommation. Ce recyclage provient à 90% de la fonte des vieux bijoux et pour 10% du recyclage des circuits électroniques usagés.

Aujourd'hui, le taux de recyclage varie d'un métal à l'autre. L'acier abandonné dans la nature est détruit par la rouille en une dizaine d'année, Mais la ferraille récupérée peut être transformée facilement et acier.

Actuellement, 40% de la production de l'acier provient du recyclage de la ferraille. Si le fer, le cuivre, l'aluminium et divers autres métaux sont facilement récupérables après usage, il n'en est pas de même pour certains métaux dont les processus de récupération sont plus complexes et coûteux. Ainsi, il est difficile de récupérer les terres rares, le tungstène, le cadmium ou l'antimoine. Les batteries lithium/ion sont présentes dans la quasi totalité de nos appareils électroniques. Une société française récupère 130 kg de cobalt, 290 kg d'acier, 85 kg de lithium et 80 kg de cuivre par tonne de batteries recyclées.

Le tableau ci-dessous montre le taux de recyclage actuel des différents métaux.

Ordre de grandeur du taux de recyclage par éléments



(Source : alternatives-économiques.fr)



Récupération de la ferraille



Nos téléphone portables peuvent être recyclés : ils renferment beaucoup de métaux intéressants

Problèmes sociaux

L'exploitation minière perturbe l'environnement

L'exploitation intensive des ressources minières entraîne inévitablement des perturbations et des pollutions de l'espace naturel. Dans certaines carrières gigantesques, des norias de camions déplacent plusieurs centaines de milliers de tonnes de matériaux chaque jour. Pour faciliter ces exploitations, on doit parfois déboiser des forêts entières. Des quantités importantes d'eau sont nécessaires pour effectuer les premiers traitements des minerais. Elles sont souvent prélevées au détriment de populations locales.

C'est le prix à payer pour alimenter nos usines et assurer notre bien être. Nous ne le voyons pas car, le plus souvent, ces mines sont dans des régions lointaines que nous ignorons complètement.



Mine d'or à ciel ouvert de Malartic, Canada, (photo Lawrence Côté-Collins).

Le projet d'implanter dans le voisinage de Lalartic une nouvelle exploitation géante en Abitibi est en cours de réalisation. On y extraira journallement jusqu'à 400'000 tonnes de tout venant et cela nécessitera l'utilisation de 100'000 m³ d'eau chaque jour.

Près de chez nous, en Allemagne, on rase complètement certains villages qui sont malheureusement au-dessus de gisements de charbon. On les reconstruit plus loin, au-dessus des parties déjà exploitées et qui ont été remblayées. L'exploitation du site de Garzweiler est prévue jusqu'en 2045. Elle entraînera le déplacement d'une vingtaine de villages et hameaux, soit environ 8000 habitants. Un tronçon de l'autoroute A44 a dû être détruit, et une partie de l'A61 devra l'être également.

Les quelque 700 habitants, leurs maisons, le chemin de croix du XVIIIe siècle et d'autres monuments du village ont été déplacés vers Immerath-Neu, une ville nouvelle construite de toutes pièces dans cette région rurale, pour laisser la place à une mine de lignite.



Mine de lignite à ciel ouvert de Garzweiler, Allemagne



Eglise St. Lambertus d'Immerath en cours de démolition

Les conditions de travail sont parfois problématiques

Les conditions de travail des mineurs sont difficiles et les salaires ne sont que rarement à la hauteur de la pénibilité de l'emploi. En 2012, dans les mines de platine sud africaines, les conflits entre travailleurs et employeurs ont paralysé l'activité des mines pendant près de quatre mois et ont déchainé des violences qui ont provoqué la mort de 34 mineurs.



Manifestation de grévistes de la mine de platine de Marikana en 2012.

En République démocratique du Congo, les organisations non gouvernementales dénoncent régulièrement les conditions de travail déplorables des mines de cobalt ainsi que la dangerosité et précarité qui règne sur les petites exploitations artisanales souvent illégales.

En Chine, on dénonce aussi les conditions de travail précaires et dangereuses dans les exploitations de terres rares situées en Mongolie.

Le travail des mineurs est difficile et les mines situées dans des pays où les réglementations sociales sont souvent insuffisantes voire inexistantes et où la corruption règne de manière endémique exposent les travailleurs à des situations souvent insoutenables.

Mais en faisant installer nos panneaux photovoltaïques et en achetant nos téléphone portables, nous ne nous rendons pas compte de la souffrance des mineurs qui ont produits les substances nécessaires à notre confort !

Conclusions personnelles

Nous voulons tous sauver la planète. C'est le nouveau dogme que les prophètes verts secondés par les médias nous martèlent tous les jours. Oui, l'Homme est une espèce invasive qui envahi toutes parties la planète aux détriments des prairies, des forêts et de toutes les espèces qui les peuplaient librement avant notre arrivée.

Oui, pour survivre, nous avons suivi le conseil : croissez et multipliez. Mais nous avons oublié aussi "Heureux les pauvres en esprit" des Homo sapiens qui vivaient de ce que leur offrait la nature, cultivaient leurs champs et ignoraient tout des autos, des ordinateurs, des téléphones portables, des médias et des appareils électro-ménagers.

L'hygiène, la vaccination, l'évolution de la médecine, les religions ont entraîné une explosion démographique catastrophique qui nous a obligé à imaginer un "vivre ensemble" basé sur une organisation implacable qui, pour se maintenir, nous oblige à pratiquer une culture intensive basée sur des machines, des engrais, des pesticides, nous oblige à travailler, payer des impôts, à cotiser pour notre retraite.

Les médias nous persuadent que le superflu est devenu dispensable et nous courons acheter le dernier téléphone portable, l'ordinateur, l'écran TV géant. Nous aimons que la lumière s'allume lorsque nous actionnons l'interrupteur, que l'eau coule lorsque nous ouvrons un robinet, que nos excréments s'en aillent lorsque nous tirons la chasse d'eau. Nous voulons être au contact instantanément avec qui nous voulons, savoir ce qui est arrivé aux antipodes en temps réel, avoir chaud quand il fait froid, avoir frais quand il fait trop chaud.

Mais il faut payer le prix du confort qu'on nous assure en échange de notre asservissement. Par l'intermédiaire de nos muscles, notre corps peut développer tout au plus 1 à 2 kWh par jour. Or, pour notre bien être, toutes énergies confondues, nous dépensons allègrement presque 100 kWh par jour que ce soit pour notre chauffage, notre transport ou l'énergie grise nécessaire à façonner tout ce que nous achetons.

C'est également pour notre confort que arrachons à la Terre les minerais dont il a été question dans ce petit ouvrage.

Mais où cette évolution vertigineuse que nous qualifions de progrès va-t-elle nous conduire ? Nous préférons ne pas le savoir et consommer allègrement ce que la Terre nous a abondamment fourni jusqu'à aujourd'hui !

Annexes

Production annuelle et prix approximatif des principaux métaux industriels

	<i>prod. annuelle</i>	<i>réserves mondiales</i>	<i>teneur croûte terrestre</i>	<i>prix approximatif</i>
<i>Fer</i>	1'600'000'000 t.	très abondantes	5,6%	72 \$ la tonne
<i>aluminium</i>	45'000'000 t.	très abondantes	23%	2'000 \$ la tonne
<i>chrome (chromite)</i>	29'000'000 t.	7.600.000.000 t.	400 ppm	8'000 \$ la tonne
<i>cuivre</i>	20'000'000 t.	490'000'000 t.	68 ppm	6'000 \$ la tonne
<i>manganèse</i>	17'000'000 t.	620'000'000 t.	1'000 ppm	1'700 \$ la tonne
<i>zinc</i>	13'000'000 t.	250'000'000 t.	80 ppm	2'500 \$ la tonne
<i>plomb</i>	4'600'000 t.	79'000'000 t.	10 ppm	2'000 \$ la tonne
<i>nickel</i>	1'600'000 t.	67'000'000 t.	190 ppm	10'000 \$ la tonne
<i>magnésium</i>	970'000 t.	très abondant	2,3%	2'000 \$ la tonne
<i>étain</i>	370'000 t.	6'000'000 t.	2.2 ppm	18'000 \$ la tonne
<i>molybdène</i>	250'000 t.	11'000'000 t.	1.2 ppm	15'000 \$ la tonne
<i>antimoine</i>	170'000 t.	14'000 t.	0.2 ppm	7'000 \$ la tonne
<i>titane</i>	100'000 t.	2'000'000'000 t.	6'000 ppm	3'500 \$ la tonne
<i>cobalt</i>	120'000 t.	7'000'000 t.	30 ppm	70'000 \$ la tonne
<i>tungstène</i>	87'000 t.	3'500'000 t.	1.2 ppm	26'500 \$ la tonne
<i>vanadium (V₂O₅)</i>	80'000 t.	15'000'000 t.	190 ppm	60'000 \$ la tonne
<i>thorium</i>	60'000 t.	6'500'000 t.	9 ppm	?
<i>uranium</i>	60'000 t.	3'500'000 t.	1.8 ppm	300 € le kg
<i>niobium</i>	56'000 t.	4'300'000 t.	20 ppm	40 \$ le kg
<i>arsenic</i>	36'000 t.	1'500'000 t.	2 ppm	3'000 \$ la tonne
<i>lithium</i>	32'500 t.	25'000'000 t.	20 ppm	12'000 \$ la tonne
<i>cadmium</i>	23'000 t.	500'000 t.	0.15 ppm	2'500 \$ la tonne
<i>argent</i>	23'000 t.	300'000 t.	0.08 ppm	500 \$ le kg
<i>bismuth</i>	12'000 t.	370'000 t.	0.02 ppm	11.000 \$ la tonne
<i>mercure</i>	2'300 t.	600'000 t.	0.05 ppm	200 \$ le kg
<i>sélénium</i>	3'000 t.	120'000 t.	0.05 ppm	40 \$ le kg
<i>or</i>	3'000 t.	42'000 t.	0.004 ppm	40'000 \$ le kg
<i>iridium</i>	2'700 t.	42'000 t.	0.001 ppm	30'000 \$ le kg
<i>tantale</i>	1'200 t.	100'000 t.	2 ppm	250 \$ le kg
<i>béryllium</i>	320 t.	80'000 t.	3 ppm	500 \$ le kg
<i>palladium</i>	280 t.	4'500 t.	0.005 ppm	25'000 \$ le kg
<i>platine</i>	230 t.	13'000 t.	0.005 ppm	42'000 \$ le kg

Production annuelle et prix approximatif des métaux précieux

	<i>prod. annuelle mondiale</i>	<i>réserves mondiales</i>	<i>teneur croûte terrestre</i>	<i>prix approximatif</i>
Or	2'700 t.	42'000 t.	0.004 ppm	40'000 \$ le kg
Argent	23'000 t.	300'000 t.	0.1 ppm	500 \$ le kg
Platine	230 t.	13'000 t.	0.005 ppm	42'000 \$ le kg
Palladium	300 t.	3'500 t.	0.015 ppm	25'000 \$ le kg
Osmium	100 kg	non connues	0.001 ppm	60'000 \$ le kg
Ruthénium	12 t.	5'000 t.	0.001 ppm	5'000 \$ le kg
Rhodium	30 t.	3'000 t.	0.001 ppm	50'000 \$ le kg
Iridium	2'700 t.	42'000 t.	0.001 ppm	42'000 \$ le kg

Production mondiale et prix approximatif des métaux des terres rares

	<i>prod. annuelle mondiale</i>	<i>réserves mondiales</i>	<i>teneur croûte terrestre</i>	<i>prix approximatif</i>
Scandium	qq. tonnes	très rare	22 ppm	10'000 \$ le kg
Yttrium	9'000 t.	9'000'000 t.	33 ppm	30 \$ le kg
Lanthane	30'000 t.	non connues	40 ppm	8 \$ le kg
Cérium	75'000 t.	620'000'000 t.	66 ppm	9 \$ le kg
Praeséodyme	13'000 t.	non connues	9 ppm	130 \$ le kg
Neodyme	30'000 t.	79'000'000 t.	40 ppm	85 \$ le kg
Promethium	N'existe que comme produit induit des phénomènes de fission.			
Samarium	4'500 t.	non connues	7 ppm	22 \$ le kg
Europium	500 t.	non connues	2 ppm	700 \$ le kg
Gadolinium	2'000 t.	non connues	6 ppm	52 \$ le kg
Terbium	400 t.	non connues	1.2 ppm	1'000 \$ le kg
Dysprosium	1'500 t.	non connues	5.2 ppm	520 € le kg
Holmium	env. 100 t.	non connues	1.3 ppm	90 \$ le kg
Erbium	500 t.	non connues	3.5 ppm	700 \$ le kg
Thulium		non connues	0.5 ppm	1'800 \$ le kg
Ytterbium	1'500 t.	non connues	3.2 ppm	22 \$ le kg
Lutecium	10 t.	non connues	0.8 ppm	10'000 \$ le kg

Production mondiale et prix approximatif des métalloïdes

	<i>prod. annuelle mondiale</i>	<i>réserves mondiales</i>	<i>teneur croûte terrestre</i>	<i>prix approximatif</i>
<i>Bore</i>	<i>2'000'000 t</i>	<i>1'200'000'000 t.</i>	<i>10 ppm</i>	<i>500 \$ la tonne</i>
<i>Silicium</i>	<i>2'600'000 t.</i>	<i>considérables</i>	<i>28 % ppm</i>	<i>2'000 \$ la tonne</i>
<i>Germanium</i>	<i>150 t.</i>	<i>non connues</i>	<i>2 ppm</i>	<i>2'000 \$ le kg</i>
<i>Arsenic</i>	<i>130'000 t.</i>	<i>1'500'000 t.</i>	<i>5 ppm</i>	<i>12'000 \$ la tonne</i>
<i>Antimoine</i>	<i>135'000 t.</i>	<i>14'000'000 t.</i>	<i>0.5 ppm</i>	<i>14'000 \$ la tonne</i>
<i>Tellure</i>	<i>250 t.</i>	<i>22'000 t.</i>	<i>0.002 ppm</i>	<i>400 \$ le kg</i>

Table des matières

L'homme vit des richesses minières	2
<i>Avant-propos - Nous grattons la partie superficielle de notre planète - Tout a commencé il y a déjà fort longtemps - C'est pour notre confort - Ces richesses ne sont pas inépuisables - Minéral et minerai - Taille des exploitations - Les coûts - Le prix des métaux sont fluctuants - Gigantisme de certaines mines - L'extraction - Le traitement du minerai - La flottation.</i>	
Où trouve-t-on les minerais ?	8
<i>Abondance des éléments dans la croûte terrestre - Gisements primaires - Dans les pegmatites - Dans les filons hydrothermaux - Haute température et basse température - Fumeurs noirs, émissions hydrothermales ! - Gisements secondaires - Les métaux de la mer.</i>	
Commençons par les métaux	13
<i>Le fer est ses alliés - Les étaux non ferreux - les métaux légers - les métaux précieux - Les terres rares - Les métaux de l'industrie nucléaire - Les autres métaux - les métalloïdes.</i>	
Le fer est ses alliés	15
<i>Le fer, symbole de la civilisation industrielle - Apparition de l'oxygène libre - Les alliés du fer - Le chrome - Le manganèse - Le nickel - Le molybdène - Le tungstène - Le vanadium - Le cobalt.</i>	
Les métaux non ferreux	25
<i>Cuivre - Plomb - Zinc - Etain - Cadmium - Mercure.</i>	
Les métaux légers	35
<i>L'aluminium - Le magnésium - Le titane - le béryllium</i>	
les métaux précieux	43
<i>Prix des métaux précieux - Or - Argent - Platine - Palladium - Ruthénium - Rhodium - Osmium - Iridium</i>	
Les terres rares	50
<i>Minerais des terres rares - Usages - Production et réserves - La Chine détient le monopole des terres rares.</i>	
Les métaux de l'industrie nucléaire	54
<i>Radioactivité et fission - Uranium - Thorium - Dans le sillage de l'Uranium - Radium - Protactinium - Au delà de l'Uranium - Plutonium - Neptunium - Américium - Curium</i>	
Les autres métaux	61
<i>Lithium - Niobium - Tantale - Gallium - Indium - Zirconium - Sélénium</i>	
Les métalloïdes.	67
<i>Bore - Silicium - Germanium - Arsenic - Antimoine - Tellure</i>	
Quelques minéraux exploités par l'Homme	73
<i>Halite -Sylvine- Fluorine - Barytine - Soufre - Gypse - Graphite - Kaolin - Talc - Magnésite</i>	
Les matériaux de construction	79
<i>Béton - Ciment - Sables et granulats - Briques et tuiles Marbres, granites et autres pierres décoratives</i>	
Prix et épuisement des ressources minérales	85
<i>Epuisement des réserves - Réserves prouvées, réserves probables - Prix des métaux - Ils dépendent de la conjoncture économique - Taux de recyclage.</i>	
Problèmes sociaux	89
<i>L'exploitation minières perturbe l'environnement - Les conditions de travaux sont parfois problématiques - Conclusions personnelles.</i>	
Annexes	92