

LES TERRES RARES ET AUTRES MÉTAUX STRATÉGIQUES

Daniel Obert, géologue, vice-président de la SAGA.

Lors de la réunion mensuelle de la SAGA de septembre 2019, Daniel Obert avait choisi un thème d'actualité comme sujet de son cours : les terres rares, leur exploitation, leurs utilisations et les risques liés. Il a bien voulu rédiger ce long article pour Saga Information, qui présente une synthèse sur ces matériaux, dont la demande ne cesse de croître avec le développement des nouvelles technologies.

Ces éléments furent découverts dès la fin du XVIII^e siècle et au début du XIX^e siècle (d'où le nom de « terres », terme utilisé à l'époque dans le sens de minerais), mais ce n'est que récemment qu'on a su les extraire et les séparer pour une exploitation à une échelle industrielle.

Les terres rares, matériaux à la mode mais méconnus, sont des éléments utilisés dans la fabrication d'appareils producteurs d'énergie ou destinés aux télécommunications. Les terres rares et assimilées prennent de plus en plus d'importance avec les progrès techniques. Elles constituent un groupe de métaux, les lanthanides, auxquels on associe des métaux aux propriétés voisines : le scandium 21Sc, l'yttrium 39Y.

Contrairement à ce que suggère leur appellation, ces matériaux sont assez répandus dans la croûte terrestre, à l'égal de certains métaux usuels : l'abondance du cérium est ainsi d'environ 48 ppm (48 mg/kg), alors que celle du thulium et du lutécium n'est que de 0,5 ppm. Ce sont des éléments traces qui nécessitent des techniques particulières d'analyse et d'extraction. Ces métaux ont un aspect métallique et sont assez tendres, malléables et ductiles.

Chimiquement, ils sont assez réactifs, surtout à des températures élevées ou lorsqu'ils sont finement divisés. Ils se caractérisent par des électrons sur les orbitales externes alors que les couches internes ne sont pas saturées. Souvent associés dans leurs minerais, ils ne donnent lieu jusqu'en 1970 qu'à peu d'applications, à part le cérium, et le thorium utilisés, en 1891, par le chimiste Carl Auer von Weisbach dans la confection des manchons à gaz pour l'éclairage urbain.

Les industries nouvelles (téléphones, photovoltaïque...) les utilisent abondamment.

Leur rareté apparente réside dans les difficultés d'extraction. Le chimiste canadien Frank Spedding a mis au point des techniques de séparation par échange d'ions sur des résines qui permettent de les obtenir à l'état pur.

Gisements

En Chine, Mongolie intérieure, le site de Bayan Obo représente 70 % des réserves mondiales, dans un minerai de fer stratiforme. Des gisements existent en Californie dans des carbonatites ; en Australie, au Mount Weld, également dans des carbonatites ; dans les roches alcalines de la presqu'île de Kola ; dans des argiles latéritiques, par adsorption sur les minéraux argileux, en Chine du Sud-Est, associées à des granitoïdes ; dans des placers sableux, marins, d'âge tertiaire à actuel, où l'on trouve monazite et xénotime, en Australie, dans le bassin de Murray et de Chavara.

Production, exploitation

Après l'extraction minière, l'extraction chimique individualise les terres rares sous forme de métal ou d'oxyde. Cette seconde phase est complexe et varie suivant les entreprises.

Extraction, séparation

Par échangeur d'ions sur une résine synthétique ; par un solvant. Les agents d'extraction utilisés sont des composés organiques acides. C'est une opération qu'il est nécessaire de répéter.

Les solutions obtenues sont électrolysées produisant du « mischmétal », un mélange de terres rares. Les processus de séparation ne sont pas divulgués.

Les terres rares

Lanthane, La chef de file des lanthanides

Numéro atomique : 57
Masse atomique : 138,90 u
Masse volumique : 6,145 g/cm³
Système cristallin : hexagonal compact
Dureté : 2,5
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 920 °C



Le lanthane fut découvert dans la « terre » d'oxydes obtenue par Johan Gadolin et Anders Gustaf Ekeberg.

Son nom dérive du mot grec « *lanthanein* » qui signifie cacher : le lanthane est resté longtemps caché dans l'oxyde de cérium contenu dans l'eau de mer.

Le lanthane sous forme d'oxyde a été isolé, en 1839, par Carl Gustaf Mosander. En 1923, on a préparé pour la première fois du lanthane pur.

Sources

On extrait le lanthane de la monazite et de la bastnaésite (bastnäsite). Sa séparation d'avec les autres terres rares est délicate.



*Bastnaésite [Ce, La, Th, Nd, Pr, Y](CO₃)F].
Ce minéral est notamment présent dans les pegmatites
et les granites alcalins du Colorado.*



*Monazite [Ce,La,Nd,Th, Di) PO₄].
Présente dans les granites, les syénites et les pegmatites
de Norvège ; dans les gîtes hydrothermaux.*

Autres minéraux sources :

- parisite Ca(Ce,La,Nd)₂(CO₃)₃F₂ ;
- synchisite Ca(Ce,La,Nd)(CO₃)₂F ;
- cordylite Ba(Ce,La)₂(CO₃)₃F₂

Utilisations

- Pierres à briquet : constituées de mischmétal, association de terres rares, contenant environ 55 % de cérium, 20 % de lanthane, 15 % de néodyme, 5 % de praséodyme, 1 % de samarium et d'yttrium.
- Stockage de l'hydrogène : La, Ni sous forme de mousse en absorbe 400 fois son propre volume.
- Batteries NiMH pour les automobiles hybrides.
- Catalyseur pour moteur à essence : l'association La, Pb, Mn, O appliquée sur l'oxyde de palladium est actuellement utilisée pour le craquage des pétroles lourds.
- Verre optique : l'ajout de composés du lanthane, oxyde La₂O₃ ou carbonate La(CO₃)₃, augmente l'indice de réfraction et diminue l'aberration chromatique.
- Aimants permanents des génératrices comme les éoliennes et les turbines.
- Composant des luminophores des tubes cathodiques, comme « dopant » dans les cristaux pour lasers.
- Composé fluorescent (phosphate de lanthane LaPO₄) pour les marquages antifraudes.
- Céramiques spéciales utilisées dans la production de circuits électroniques.

Cérium, Ce

Numéro atomique Z : 58
Masse atomique : 140,116 ± 0,001 u
Masse volumique : 6,770 g/cm³
Système cristallin : hexagonal compact
Dureté : 2,5
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 799 °C



Cérium dans une atmosphère d'argon.



Praséodyme dans une ampoule d'argon.

Il fut identifié en 1803 par Martsin Heinrich Klaproth.

Le cérium est le plus abondant parmi les « terres rares ». Une teneur moyenne de 90 ppm peut être avancée, mais on ne connaît pas sous quelles formes, dans : la monazite, la bastnaésite, la fergusonite, l'allanite (épidote), appelée aussi orthite, ou plus anciennement cérite en raison de la présence du cérium.

Actuellement, les sources de cérium proviennent des centrales nucléaires et des usines de retraitement du combustible.

Utilisations

- Polissage du verre : le dioxyde de cérium (CeO_2) entre dans la composition des meilleures poudres de polissage.
- Protection contre l'ionisation, en inclusion dans les écrans de protection.
- Pots d'échappement : il est utilisé afin de diminuer les émissions nocives des moteurs Diesel (filtre à particules).
- Fours : l'oxyde est utilisé dans le revêtement des fours « autonettoyants ».
- Autres utilisations : colorant du verre, dans les luminophores pour tubes cathodiques et également pour améliorer l'absorption des rayons X par la dalle des mêmes tubes.

Praséodyme, Pr

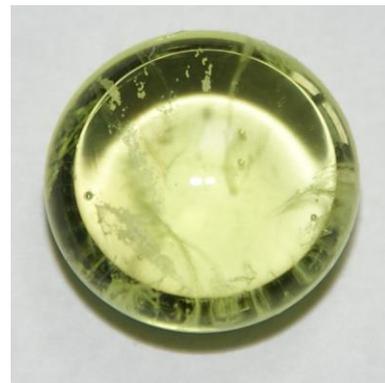
Numéro atomique Z : 59
Masse atomique : 140,90766 u
Masse volumique : 6,773 g/cm³
Système cristallin : hexagonal compact
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 931 °C

Son nom dérive de *prason* (πράσον : « le poireau ») et *didymos* (δίδυμος : « jumeau »), en raison de la couleur verte de son nitrate.

Les chimistes ont longtemps cru que le mélange d'oxyde de praséodyme-néodyme était un corps simple jusqu'à ce que Carl Auer von Welsbach les sépare, en 1885.

Sources

Cet élément existe en petites quantités dans la croûte terrestre (9,5 ppm). On le trouve dans les minerais de terres rares : monazite et bastnaésite, avec le lanthane. Il en a été produit 6 282 tonnes en 2010.



Coupelle colorée par du zircon dopé au praséodyme.

Utilisations

- Pierre à briquet : le praséodyme entre dans la composition du mischmétal, base des pierres à briquet.
- Colorant du verre : il colore le verre en vert. En combinaison avec le néodyme, il colore les verres de protection solaire et les lunettes de soudeur.
- Colorant pour céramiques : à partir du zircon (ZrSiO_4) qui, dopé au Pr, donne un jaune vif éclatant.

- Le Pr donne une couleur rouge à la fluorine (CaF_2).
- Composition de réfractaires : allié au nickel, le praséodyme a un fort effet magnétocalorique, ce qui a permis aux scientifiques de s'approcher à moins d'un millième de degré du zéro absolu.
- Autres utilisations :
 - dans les aimants permanents, en alliage avec le cobalt ;
 - en additif dans les verres optiques « flint » ;
 - comme composant de catalyseur dans l'industrie du pétrole.

Néodyme, Nd

Numéro atomique Z : 60
Masse atomique : 144,27 u
Masse volumique : 7,008 g/cm³ (25 °C)
Système cristallin : hexagonal compact
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 1 016 °C



Échantillon de néodyme dans une ampoule.

Il fut découvert par Carl Auer von Welsbach, chimiste autrichien, en 1885, et isolé sous forme relativement pure en 1925.

Sources

Il est extrait de la didymite (Nd Pr), phyllosilicate monoclinique, voisin de la muscovite.



Muscovite, sud-est de Minas Gerais, Brésil.

Production : 30 101 tonnes en 2010, dont l'essentiel en Australie et Afrique du Sud.

Utilisations

- Pierre à briquet : le néodyme entre dans la composition du mischmétal.
- Colorant du verre : avec le praséodyme, il colore les verres de protection solaire et les lunettes de soudeur ; pour céramiques : suivant le sel utilisé, on obtient du bleu au mauve.
- Tubes cathodiques : il entre dans la composition des luminophores rouges.
- Électronique : il entre dans la composition isolante pour les condensateurs « céramique ».
- Amplificateur dans de nombreux lasers.
- Aimants permanents puissants : en alliage Nd-fer-cobalt pour éoliennes, moteurs électriques, générateurs de certaines voitures hybrides, casques stéréo, haut-parleurs, dans les disques durs (moteur qui assure le positionnement des têtes de lecture/écriture).
- Catalyseur dans l'industrie du pétrole.
- Traceur de l'activité des résidus de retraitement des combustibles nucléaires usagés à l'usine d'Areva de La Hague.

Prométhium, Pm

Numéro atomique Z : 61
Masse atomique : 145 u
Masse volumique : 7,264 g/cm³
Système cristallin : hexagonal compact
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 1 042 °C
Isotopes très radioactifs



Son nom dérive de Prométhée, qui vola le feu aux dieux de l'Olympe.

Son existence fut prédite par Bohuslav Brauner en 1902, puis en 1914 par Henry Moseley ; il a été caractérisé pur en 1945, à l'Oak Ridge National

Laboratory (ORNL), par Jacob A. Marinsky, Lawrence E. Glendenin et Charles D. Coryell, en séparant les produits de fission de l'uranium, dont il est un sous-produit.

Sources

Sous-produit de la fission de l'uranium, il n'existe qu'à l'état d'isotope instable, d'où son usage limité.

Utilisations

Composés luminescents du fait de sa radioactivité. Source de chaleur dans des stimulateurs cardiaques.

Samarium, Sm

Numéro atomique Z : 62
Masse atomique : $150,36 \pm 0,03$ u
Masse volumique : $7,520$ g/cm³
Système cristallin : rhomboédrique
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : $1\ 072$ °C



Il fut découvert, en 1853, par le chimiste suisse Jean-Charles Galissard de Marignac. En 1901, le chimiste français Eugène Anatole Demarçay réussit à l'isoler de l'euporium.

Sources

Il est extrait de la samarskite, découverte par le colonel Samarsky dans l'Oural.

Production : 4 443 tonnes en 2010.
L'Australie en est le principal producteur.

Utilisations

• Aimants permanents fonctionnant à haute température (TGV).

- Capteur de neutrons : dans les réacteurs nucléaires.
- Électronique : condensateurs céramiques.
- Optique : ajouté au verre, il permet une forte absorption de l'infrarouge.
- Médecine : utilisé en radiothérapie symptomatique, pour soulager les douleurs dues aux métastases osseuses.
- On le retrouve dans les microphones de guitares électriques, comme dans les barres de contrôle de certains réacteurs nucléaires.



Samarskite, Connecticut, États-Unis.
 $[Y, Fe^{3+}Fe^{2+}, U, Th, Ca)_2(Nb, Ta)_2O_8]$
ou $[(Y, Fe^{3+}, U)(Nb, Ta)O_4]$.

Euporium, Eu

Numéro atomique Z : 63
Masse atomique : $151,964$ u
Masse volumique : $5,244$ g/cm³
Système cristallin : cubique centré
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 822 °C



Il fut découvert par Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran, en 1890. Mais la découverte fut attribuée au chimiste français Eugène Anatole Demarçay, qui réussit à isoler l'euporium, en 1901.

Sources

C'est un produit de fission du samarium par décroissance bêta, comportant six isotopes.

Production estimée : 919 tonnes en 2015.

En 2018, la Chine et l'Australie en sont les principaux producteurs.

Utilisations

- Lasers : pour doper certains verres.
- Luminophores : couleur rouge.
- Géochimie : pour déceler l'origine des minéraux (plagioclases calciques).
- Résonance magnétique nucléaire (RMN).

Gadolinium, Gd

Numéro atomique Z : 64
Masse atomique : $157,25 \pm 0,03$ u
Masse volumique : $7,901$ g/cm³ (25 °C)
Système cristallin : hexagonal compact
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : $1\ 313$ °C



Il fut isolé, en 1880, par Jean-Charles Galissard de Marignac et Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran qui prépara le métal pur, en 1886.

Sources

Il existe en solution solide dans divers minéraux riches en terres rares. Il est aujourd'hui principalement extrait de la monazite [(Ce,La,Th,Nd,Y)PO₄] et de la bastnaésite [(Ce,La,Y)CO₃F].

Production estimée : 3 191 tonnes en 2015.

Premier producteur : Afrique du Sud.

Utilisations

- Lasers : grenat de gadolinium-gallium Gd₃Ga₅O₁₂ (GGG).

- Agent de contraste : tubes cathodiques et imagerie médicale par résonance magnétique (IRM), réfrigérant magnétique des supraconducteurs.
- Absorbant neutronique.

Terbium, Tb

Numéro atomique Z : 65
Masse atomique : 158,925u
Masse volumique : $8,230$ g/cm³
Système cristallin : hexagonal compact
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : $1\ 356$ °C
Deux isotopes synthétiques radioactifs



L'oxyde fut identifié, en 1789, par le chimiste finlandais Johan Gadolin dans un échantillon de gadolinite, près du village d'Ytterby, en Suède.

Sources

Il est abondant dans la croûte terrestre ; sa teneur est estimée à 1,2 mg/kg (2 fois celle de l'argent).

Il est extrait de minéraux tels que la gadolinite, la cécite, l'euxénite et la monazite.



Gadolinite ou ytterbite. Silicate complexe que l'on trouve en Suède, en Norvège ou encore aux États-Unis.



Euxénite. Oxyde que l'on trouve dans les pegmatites, au Brésil, en Norvège, à Madagascar, ou aux États-Unis.



Cérite, Bastnas, Suède.



Monazite. Phosphate présent dans les granitoïdes.

Production

Estimée en 2015 à 210 tonnes. Premier producteur : les États-Unis.

Le prix d'un gramme de terbium pur à 99,9 % était égal à environ 40 dollars américains en 2015.

Utilisations

- Luminophores : tubes cathodiques [téléviseurs et écrans d'ordinateurs (couleur verte)] ; tubes fluorescents trichromatiques pour l'éclairage et la radiographie médicale.
- Contre la contrefaçon : la fluorescence verte du terbium est utilisée comme moyen de protection des billets de la monnaie européenne.

Dysprosium, Dy

Numéro atomique Z : 66
Masse atomique : 162,5 u
Masse volumique : 8,551g/cm³
Système cristallin : hexagonal compact
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 1 412 °C
Toxicité retardée aiguë



Son nom vient du grec *δυσπρόσιτος* / *dus-prósitos*, « difficile à obtenir ».

Il fut découvert par Paul Émile de Boisbaudran, en 1886 et isolé en 1950.

Sources

À l'état de traces dans beaucoup de roches dont la pérovskite, roche du manteau inférieur de notre planète.

Production estimée à 1 882 t en 2015.

Producteurs : Afrique du Sud, Australie.

Utilisations

- Aéronautique : augmente la dureté du matériau.
- Disques magnéto-optiques : dans les minidisques.
- Aimants permanents : alliages de terres rares avec fer, cobalt, nickel pour les éoliennes.
- Imagerie médicale : agent de contraste pour l'IRM.
- Protection contre les rayons X.
- Lampes à vapeur d'halogénures de métaux.
- Absorbent de neutrons, entre dans la composition de certains lasers.

Holmium, Ho

Numéro atomique Z : 67
Masse atomique : 164,9 u
Masse volumique : 8,795 g/cm³
Système cristallin : hexagonal compact
Couleur : blanc métallique
Point de fusion : 1 472 °C



Sources

On l'extrait de la monazite qui en contient 0,05 %.
Minéral le plus rare de la famille des terres rares, il fut découvert, en 1789, par le chimiste finlandais Johan Gadolin. À la suite de cette découverte, plusieurs chimistes font état de trois composés distincts, jusqu'en 1879 où l'holmium sera isolé et nommé par le géologue suédois Thodor Cleve. Il faudra attendre 1911 pour que le chimiste suédois Otto Holmberg l'obtienne sous forme d'oxyde.

Utilisations

- Laser : les lasers YAG (grenat-yttrium-aluminium), avec des composés d'holmium, fournissent un rayonnement infrarouge (2,1 µm), utilisé à des fins médicales.
- Teinture du verre : l'oxyde d'holmium donne au verre une couleur rose spécifique.

- Magnétisme : pièces polaires pour des aimants, grande capacité magnétique.

Erbium, Er

Numéro atomique Z : 68
Masse atomique : 167,3 u
Masse volumique : 9,066 g/cm³
Système cristallin : hexagonal compact
Couleur : blanc métallique
Point de fusion : 1 529 °C



L'oxyde d'erbium est isolé en 1905 par Georges Urbain et Charles James.

Le métal à l'état pur a été obtenu, en 1934, par Wilhelm Klemm et Heinrich Bommer.

Sources

C'est l'une des terres rares les plus abondantes. La concentration dans l'écorce terrestre est d'environ 3,5 g/tonne, le double de celle de l'étain.

Principales ressources minières : Chine et États-Unis.

On l'extrait à partir des mêmes minerais que les autres terres rares, tels que : le xénotime, la gadolinite, l'euxénite, la fergusonite, le polycrase, la blomstrandine, la monazite ou la bastnaésite.



À gauche, blomstrandine (aeschnyrite).

Oxyde, présent dans les pegmatites.

À droite, polycrase.

Oxyde complexe, que l'on trouve en Italie et en Suède.



Fergusonite. Oxyde complexe, présent dans les pegmatites.

La production annuelle est d'environ 500 tonnes.
Avec une pureté de 99,9 %, son prix était d'environ 21 \$ le gramme en 2015.

Utilisations

- Médecine nucléaire : synoviorthèse, polyarthrite rhumatoïde (erbium 169).
- Industrie nucléaire : utilisé du fait de sa forte capacité d'absorption des neutrons.
- Colorants : l'oxyde d'erbium donne une couleur rose au verre et à la porcelaine.
- Lasers médico-chirurgicaux : chirurgie et dentisterie.
- Télécommunications optiques : fibres dopées avec erbium.
- Panneaux solaires photovoltaïques.

Thulium, Tm

Numéro atomique Z : 69
Masse atomique : 168,934 u
Masse volumique : 9,321 g/cm³
Système cristallin : hexagonal compact
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 1 545 °C



Il fut découvert par le Suédois Per Thodor Cleve, en 1879 qui propose de le nommer thulium, d'après le nom légendaire de la Scandinavie.

Sources

Il est associé aux autres terres rares, principalement dans la gadolinite.

Utilisations

- Elles sont peu nombreuses, car son coût est élevé.
- Pigment pour tube cathodique : sulfure de zinc dopé avec de l'oxyde de thulium (bleu).
 - Composant pour micro-ondes : dans des céramiques magnétiques.

Ytterbium, Yb

Numéro atomique Z : 70
Masse atomique : 173,04 ± 0,03 u
Masse volumique : 6,903 à 6,966 g/cm³
Système cristallin : cubique à faces centrées
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 824 °C



En 1878, à partir d'un minerai dans lequel ont également été identifiées plusieurs autres terres rares, le chimiste suisse Jean Charles Galissard de Marignac sépare un nouveau sel, incolore qu'il nomme ytterbine, un composé d'un nouvel élément, l'ytterbium.

Sources

Il est extrait de la monazite, où on le trouve dans une proportion de 0,03 %.

Utilisations

- Elles sont peu nombreuses.
- Fibres optiques.
 - Cellules photovoltaïques.
 - Source de RX pour analyseurs portables.

- Acier inoxydable : amélioration des propriétés de l'acier inoxydable.
- Horloge atomique.
- Cristaux laser émettant dans le proche infrarouge.

Lutécium (Lutétium), Lu

Numéro atomique : 71
Masse atomique : 175 u
Masse volumique : 9,841 g/cm³
Système cristallin : hexagonal compact
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 1 663 °C



Il fut découvert par trois chimistes en 1907 : le Français Georges Urbain, l'Autrichien Carl Auer von Welsbach et l'Américain Charles James.

Le lutécium et le thulium sont les plus rares des lanthanides : 0,5 ppm dans la croûte terrestre.

Sources

Il est extrait de la monazite avec 0,003 % de lutécium.

Gisements : Chine, États-Unis, Brésil, Inde, Sri Lanka et Australie.

Production mondiale : environ 10 tonnes.

Utilisations

- Catalyseurs pour craquage, polymérisation.
- Médecine nucléaire : émetteur de rayonnement β .

Scandium, Sc

Numéro atomique Z : 21
Masse atomique : 44,95 u
Masse volumique : 2,989 g/cm³
Système cristallin : hexagonal compact
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 1 541 °C



Sources

Il est extrait de la thorveitite.

Production : en faible quantité en Scandinavie, sous-produit de la purification de l'uranium.

Utilisations

- Lampe à halogénure métallique produisant une lumière « blanc neutre ».
- Métallurgie : 2 % de scandium renforce les caractéristiques mécaniques de l'aluminium (Russie).



Thorveitite. Silicate du sous-groupe des sorosilicates, de formule [(Sc,Y)₂Si₂O₇], présent dans les pegmatites.

Yttrium, Y

Numéro atomique Z : 39
Masse atomique : 88,90584 ± 0,00002 u
Masse volumique : 4,469 g/cm³
Système cristallin : hexagonal compact
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 1 522 °C



Chimiquement, l'yttrium ressemble plus aux lanthanides avec lesquels il était classé autrefois, comme le scandium, parmi les terres rares.

En 1787, Carl Axel Arrhenius, un lieutenant de l'armée et chimiste amateur, découvre une roche noire, lourde, dans une ancienne carrière proche du village suédois d'Ytterby. Johan Gadolin, de l'Université d'Åbo, y identifie un nouvel oxyde ou « terre », en 1789. Il publie son analyse complète en 1794.

L'yttrium métal a été isolé pour la première fois en 1828, par Friedrich Wöhler, en chauffant du chlorure d'yttrium anhydre avec du potassium.

Sources

Le xénotime, un phosphate de terres rares lourdes, est le principal minerai en Chine, qui en fut le principal producteur avec l'Australie jusqu'en 2018.

Auparavant l'Inde et le Brésil, au début du XIX^e siècle, étaient les premiers producteurs d'yttrium dans des gisements alluvionnaires (monazite).



*Xénotime de Norvège, au musée minéralogique de Bonn.
Le xénotime est un phosphate d'yttrium.*

La production mondiale annuelle d'oxyde d'yttrium a atteint 600 tonnes en 2001, avec des réserves estimées de 9 millions de tonnes.

Production estimée en 2015 : 11 104 tonnes.

Utilisations

- Luminophores : il est utilisé pour obtenir la couleur rouge.
- Catalyseur pour la polymérisation de l'éthylène.
- Production d'une grande variété de grenats synthétiques.
- Lasers émettant dans le proche infrarouge.
- Métallurgie : il améliore les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium et de magnésium.
- Médecine : l'isotope radioactif ⁹⁰Y est utilisé dans des médicaments comme l'Yttrium Y 90-DOTA-tyr3-octreotide et l'Yttrium Y 90-ibritumomab-tiuxetan, dans le traitement de plusieurs cancers.
- Céramiques et supraconducteurs à haute température.

Autres métaux stratégiques surconsommés

Pour compléter l'inventaire de ces éléments indispensables aux industries modernes, il convient d'évoquer plusieurs autres éléments également surconsommés par le progrès et qui, de ce fait, sont susceptibles de se raréfier rapidement : gallium, indium, tellure, sélénium, lithium et cobalt.

Gallium, Ga

Numéro atomique Z : 31
Masse atomique : 69,7 u
Masse volumique : 5,904 g/cm³
Système cristallin : orthorhombique
Dureté : 1,5
Couleur : blanc argenté
Point de fusion : 29,7646 °C



Il fut découvert en 1875, par le chimiste français Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran.

Sources

Il se rencontre sous forme d'impuretés dans les minerais d'aluminium (bauxite).

Production annuelle en 2008 : 111 tonnes dont 83 % en Chine. Les réserves sont estimées à 1 130 000 tonnes, soit 9 000 ans de production annuelle ; la pénurie n'est pas encore là.

Utilisations

- Matériaux semi-conducteurs.
- Imagerie médicale : scintigraphie au gallium 67.
- L'alliage avec l'indium et l'étain, appelé galinstan, est utilisé dans les thermomètres depuis l'interdiction du mercure.
- Générateurs photovoltaïques.

Indium, In

Numéro atomique Z : 49
 Masse atomique : 114,8 u
 Masse volumique : 7,31 g/cm³ (20 °C)
 Système cristallin : tétragonal
 Dureté : 1,2
 Couleur : gris argenté, blanc argenté
 Point de fusion : 156,5985 °C



Il fut découvert en 1863, par Ferdinand Reich et Hieronimus Theodor Richter. Ce dernier isole facilement le sulfure d'indium et le chlorure d'indium, puis le corps simple métal en 1867.

Sources

L'indium natif ne se trouve qu'en quantité infime dans les mines de zinc, de cuivre, de plomb, de fer : 100 à 50 mg par tonne.

Sous-produit du raffinage du zinc.

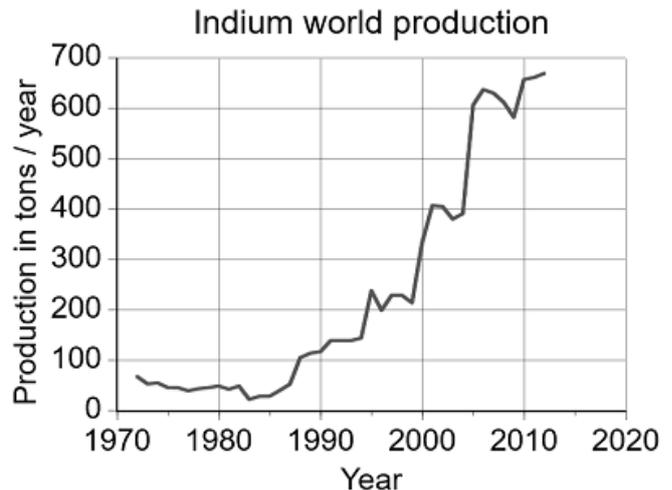
Ce corps est en voie de raréfaction : 70 dollars le kilogramme, en 2001 ; 1 000 dollars, en 2005 ; il se négocie entre 400 et 600 dollars, en 2010. Les stocks planétaires d'indium ont été vidés.

Demande annuelle : 1 210 tonnes en 2010, une grande partie issue du recyclage.

La production minière (Chine, Canada...) était de 570 t en 2008, de 600 t en 2009. L'évaluation des réserves, en 2007, était de 11 000 t. Selon le rapport volume de réserves (2007)/production annuelle (2008), il reste seulement 19,3 années d'approvisionnement.



Lingots d'indium pesant environ 1 pound chacun, soit # 450 g.



À partir de 1990, l'accroissement de la consommation (écrans tactiles et cellules photovoltaïques) est à l'origine de cette augmentation spectaculaire de la production.

Utilisations

Elles sont nombreuses.

- Joints et traitements de surface : anti-corrosion et anti-friction.
- Écrans tactiles, à cristaux liquides ; appareils à écran LCD.
- Cellules photovoltaïques.
- Fibres optiques.
- Médecine nucléaire : scintigraphie.

Tellure, Te

Numéro atomique Z : 52
Masse atomique : $127,60 \pm 0,03$ u
Masse volumique : $6,23 \text{ g/cm}^3$ (20 °C)
Système cristallin : hexagonal
Dureté : 2,25
Couleur : gris argenté
Point de fusion : 449,52 °C



Il fut découvert en 1782, par Franz-Joseph Müller von Reichenstein, dans des minerais d'or de Transylvanie, en particulier la sylvanite. Il a été isolé par Martin Heinrich Klaproth, qui a proposé le nom latin *tellurium* en 1798.

Sources

Il est extrait de la sylvanite. Le clarke est 0,002 g/t, en combinaison avec l'or (Au), le plomb (Pb), le bismuth (Bi) et l'antimoine (Sb).



Sylvanite [(Ag, Au)Te₂]. Minéral commun dans les zones de dépôts hydrothermaux à basse température, en Corse et en Roumanie.

Utilisations

- Détonateurs, avec du peroxyde de baryum.
- Semi-conducteurs : diodes laser.
- Cellules photovoltaïques, les détecteurs infrarouges.
- Imprimantes laser et photocopieurs : associé au sélénium.
- Thermocouple : (Te/Pb) ou couple thermoélectrique (CTE) utilisé pour la mesure de la température.

Sélénium, Se

Numéro atomique Z : 34
Masse atomique : 78,971 u
Masse volumique : $4,79 \text{ g/cm}^3$ (gris),
 $4,28 \text{ g/cm}^3$ (vitreux)
Système cristallin : hexagonal
Dureté : 2
Couleur : gris métallique
Point de fusion : 221 °C (gris)
Voisin du soufre



Il fut découvert par les chimistes Jöns Jacob Berzelius et Johan Gottlie Gahn, en 1817.

Sources

Le clarke du sélénium est de 0,1 ppm (0,1 g/t). Rare à l'état natif, il se substitue parfois au soufre. La clausthalite (SePb), l'umagite (Cu₃Se₂) et la crooksite (CuThSe) existent dans la nature, mais ce sont des minéraux rares.

Utilisations

- Semi-conducteur : sous forme de Se gris métal.
- Photocopieur, imprimante laser. En xérogaphie (à l'état amorphe).
- Redresseur de courant alternatif en courant continu.
- Pharmacologie : toxique à fortes doses (400 µg/jour), le sélénium est susceptible de jouer un rôle protecteur à faibles doses comme c'est le cas pour le coronavirus.



La clausthalite (SePb).

*Son nom dérive de Clausthal, une ville minière du Harz.
Ses gisements sont les mêmes que ceux de la galène.*



*Fragment de pétalite [LiAlSi₄O₁₀].
État du Minas Gerais, Brésil.*

Sources

Le lithium est présent dans les pegmatites granitiques, notamment de l'État de Minas Gerais, au Brésil.

Le spodumène, la lépidolite sont des minéraux riches en lithium.

Lithium, Li

Numéro atomique Z : 3
Masse atomique : 6,941 u
Masse volumique : 0,534g/cm³
Système cristallin : cubique centré
Dureté : 0,6
Densité : 0,534
(élément solide le moins dense)
Couleur : blanc argenté/gris
Point de fusion : 180,5 °C
Dégage, au contact de l'eau,
des gaz inflammables



Son nom dérive du grec *λίθος* (*lithos*) qui signifie « pierre ». C'est un métal alcalin.

Il a été découvert par le chimiste suédois Johan August Arfwedson, en 1817 (en analysant de la pétalite).



Spodumène, variété kunzite [LiAlSi₂O₆]. Afghanistan.



*Lépidolite [K(Li,Al)₃(Si,Al)₄O₁₀(F,OH)₂].
Minas Gerais, Brésil.*

Gisements, réserves

Le plus grand gisement mondial (chlorure) est le salar d'Uyuni, dans le département de Potosí, sud-ouest de la Bolivie, avec un tiers de la ressource mondiale.

Le second plus grand gisement est le salar d'Atacama, au Chili ; il est depuis 1997 le premier exportateur mondial.

Les réserves mondiales ont été estimées en février 2019 par l'*United States Geological Survey* (USGS) à 14 Mt (millions de tonnes) et les ressources ultimes à 62 Mt, dont 24 % en Argentine, 15% en Bolivie, 14 % au Chili, 12 % en Australie et 7 % en Chine.

Production

Production mondiale : 43 000 tonnes en 2017, hors États-Unis (dont les données ne sont pas rendues publiques par l'USGS), assurée essentiellement par l'Australie (43 %), le Chili, (33 %), l'Argentine (13 %) et la Chine (7 %).

69 000 à 85 000 tonnes estimées en 2018 (USGS).

Utilisations

Estimation des usages du lithium à l'échelle mondiale, en 2015 :

- verres et céramiques (27 %) ;
- batteries (46 %), dont le développement pour stocker l'électricité produite par les sources éoliennes et solaires pourrait entraîner un bond de 1 000 % de la demande en lithium ;
- graisses lubrifiantes (7 %) ;
- coulée continue (5 %) ;
- traitement de l'air (2 %) : recyclage de l'air dans les sous-marins ;
- industrie pharmaceutique (<1 %) ;
- autres usages (9 %) : la production de caoutchoucs et thermoplastiques (5 %), la métallurgie de l'aluminium (1 %).

Cobalt, Co

Numéro atomique Z : 27
 Masse atomique : 58,933 u
 Masse volumique : 8,9 g/cm³
 Système cristallin : hexagonal compact
 Dureté : 5
 Couleur : blanc argenté, reflet gris
 Point de fusion : 1 495 °C



Son nom vient de l'allemand vernaculaire *Kobele*, ou *Kobelt*.

Paracelse mentionne le cobalt en 1522.

En 1735, le chimiste suédois Georg Brandt (1694-1768) affirme avoir extrait de ce minerai un « semi-métal ». En 1780, Torbern Olof Bergman prépare le métal pur. En 1938, John Livingood et Glenn Seaborg découvrent le cobalt 60.

Occurrence

Indice de Clarke : 23 à 30 ppm (g/t)

Sources

Il est associé au cuivre et au nickel dans des arséno-sulfures comme la carrolite (CuSCo₂S₃).

On le trouve également à l'état d'arséniates dans des minéraux tels que la modderite (CoAs), la cobaltite, l'érythrite ou encore la skuttérodite.



Carrolite [CuSCo₂S₃] du Katanga, Zaïre.



Cobaltite [CoAs_2] ou smaltite, de l'Ontario, Canada.
Musée de Denver



Érythrite [$\text{Co}(\text{AsO})_8\text{H}_2\text{O}$] du Maroc.



Skuttéridite [CoAs_3], Ouarzazate, Maroc.

Production

En 2006, 55 000 tonnes (contre 19 700 t. en 1994).

Russie : 3 300 t ; Zaïre : 3 200 t ; Finlande : 3 000 t ;
Canada : 2 900 t ; Norvège : 2 800 t ; Zambie : 2 600 t ;
Chine : 800 t.

Réserves connues en 2014 : 7,1 millions de tonnes (susceptibles d'être épuisées en soixante ans), dont 50 % en République du Congo, 15 % en Australie et 7 % à Cuba.

Utilisations

- Véhicules électriques : actuellement 9 % de la demande mondiale (soit 6 650 tonnes), mais cette demande pourrait passer en 2030 à 300 000 à 400 000 t ; risques de pénurie à partir de 2025-2030.
- Métallurgie (33 % en 2006) : pour les superalliages, réacteurs ou les turbines à gaz (22 %) et les alliages durs. Ce sont des secteurs en pleine évolution : alliages résistants à la corrosion, comme les stellites, aciers rapides (outils de coupe, forets dentaires), alliage des prothèses dentaires (couronne par exemple).
- Fabrication d'aimants (7 %) : pour les médias, haut-parleurs.
- En dehors des alliages, le cobalt entre dans la production de céramiques très dures.
- L'ion cobalt complexé est utilisé comme absorbeur d'oxygène, mais aussi de chlore de soufre, d'arsenic.
- Additif alimentaire pour les animaux d'élevage (bovins, ovins, caprins et lapins) pour permettre la production de vitamine B12 par leur flore intestinale.

La production de terres rares

Les terres rares, matériaux stratégiques, font l'objet d'une communication restreinte de la part des États, d'où des statistiques très lacunaires.

Les réserves mondiales en oxydes de terres rares sont estimées à 120 millions de tonnes à fin 2017.

Chine : 37 % ; Brésil 18 % ; Viêt Nam : 18 % ;
Russie : 15 % ; Inde : 6 % ; Australie 2,8 % ;
Groenland : 1,3 % ; États-Unis : 1,2 %.

La Chine fournit 90 % des besoins de l'industrie : 105 000 tonnes en 2017 sur une production mondiale de 130 000 tonnes.

L'Australie n'en a extrait que 20 000 tonnes.

L'espoir réside dans le recyclage des terres rares des déchets électroniques.

Les perspectives

Les terres rares sont devenues indispensables dans de nombreux domaines. De ce fait, leur prix connaît des hausses importantes. La croissance annuelle de leur secteur d'application atteint plus de 15 %. Actuellement, la Chine détient le quasi-monopole de la production de terres rares ; cherchera-t-elle à conserver ce monopole ? Pour contrebalancer ce monopole, le recyclage est une possibilité.

Des techniques innovantes de séparation des poudres luminophores des lampes à économie d'énergie se développent, de même que le recyclage des poudres de polissage.

Une nouvelle réserve découverte en 2011 dans les eaux internationales du Pacifique, à 1 850 km au sud-est de Tokyo, pourrait porter le niveau des réserves à environ 100 milliards de tonnes (Kato *et al.*, 2011). En avril 2018, ces gisements répartis sur 2 500 km² représentent environ 16 millions de tonnes de terres rares, à plus de 5 000 m de profondeur, soit 780 ans d'approvisionnement mondial en yttrium, 620 ans en europium, 420 ans en terbium, 730 ans en dysprosium (Takaya *et al.*, 2018). Même si cette découverte est intéressante, l'extraction posera des problèmes politiques et environnementaux importants et ne pourrait commencer que vers 2023.

Glossaire

Condensateur céramique : le condensateur céramique multicouche où le diélectrique est une céramique, la composition de la céramique détermine les caractéristiques du diélectrique.

Masse atomique : masse totale des protons et des neutrons d'un atome à l'état de repos.

Unité : u ou uma.

Mischmétal : association de terres rares, contenant environ 55 % de cérium, 20 % de lanthane, 15 % de néodyme, 5 % de praséodyme, 1 % de samarium et d'yttrium.

Magnétocalorique (effet) : qui produit un échange thermique (dégagement ou absorption de chaleur) accompagnant l'aimantation d'une substance. Les **réfrigérants magnétiques** utilisent les mêmes propriétés.

Sources des informations

L'essentiel des données et des illustrations provient de Wikipédia, où vous pourrez trouver des informations supplémentaires, élément par élément.

Voir aussi : <https://images-of-elements.com/> qui, comme son nom l'indique, fournit de nombreuses illustrations des différents éléments.

Kato Y. *et al.*, 2011. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience*, n° 4(8), juillet 2011, p. 535-539 (DOI 10.1038/ngeo1185).

Takaya Y. *et al.*, 2018. The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements. *Nature Scientific Reports*, 8, p. 5763.

Autres ouvrages consultés

Bednik A., 2016. Extractivisme. Le passager clandestin Ed., 368 pages.

Géochronique, n° 118, juin 2011, dossier Terres rares, coordonné par P. Rocchi, p. 16-37.

DERNIÈRE MINUTE : UN PAS VERS LE SAUVETAGE DES CARRIÈRES CLASSÉES DE MEUDON

Par décision en date du 22 octobre 2020, le tribunal administratif de Cergy-Pontoise annule l'autorisation spéciale de travaux délivrée à la commune de Meudon pour combler sa carrière classée dite « Docteur Arnaudet ».

La commune de Meudon a déposé une demande d'autorisation de travaux aux fins de consolidation par comblement de la carrière souterraine dite « du Docteur Arnaudet », carrière classée au titre des sites scientifiques et artistiques. Le ministre de la transition écologique et solidaire a accordé à la commune de Meudon l'autorisation sollicitée.

Des associations de défense de l'environnement ont saisi le tribunal pour s'opposer à ce projet de comblement et ont donc demandé l'annulation de l'autorisation délivrée à la commune de Meudon.

Les juges ont rappelé que si la modification d'un site classé peut être autorisée par le ministre, cette compétence ne s'étend pas à des mesures qui auraient pour effet de rendre le classement sans objet et seraient ainsi l'équivalent d'un véritable déclassement total ou même partiel...

En l'espèce, les juges ont relevé que le classement des carrières Arnaudet avait pour objet de favoriser la sauvegarde du réseau des galeries souterraines. Ils ont souligné que les travaux projetés auraient pour conséquence le comblement d'une partie très significative de la carrière, sur les trois niveaux de galeries, en particulier dans la partie centrale de chaque niveau. Ils ont également indiqué que l'inspection générale des carrières et la commission régionale du patrimoine géologique avaient exprimé les plus grandes réserves quant à la compatibilité du projet avec le classement des carrières...

Ainsi le Tribunal a considéré que le projet de comblement de carrières s'apparentait à un déclassement et a annulé, par conséquent, l'autorisation spéciale de travaux délivrée à la commune de Meudon.

Extrait du communiqué de presse du tribunal administratif de Cergy-Pontoise.

<http://cergy-pontoise.tribunal-administratif.fr/A-savoir/Communiqués/Environnement-Carrieres-classees-de-Meudon>.

LES TERRES RARES ET AUTRES MÉTAUX STRATÉGIQUES.



Le salar d'Uyuni en Bolivie. Ce grand désert de sel, situé à 3 800 m d'altitude, constitue le plus grand gisement de lithium au monde. La croûte de sel contient des chlorures, mais aussi des sels de bore, des carbonates et des sulfates de sodium, potassium, magnésium et lithium.

© Shark. Domaine public.

Saga PARIS

Société Amicale des Géologues Amateurs

Muséum national d'Histoire naturelle

61 rue Buffon. 75005 Paris

Adresse postale : 43 rue Buffon. CP 48. 75005 Paris