

Métaux mineurs : une vision géologique des tensions

Michel Rabinovitch.

Introduction

Jacques Blanc, sénateur, présentait en mars 2011 un rapport au Sénat sur la sécurité des approvisionnements stratégiques de la France dans lequel il commence le chapitre sur les métaux par ces mots : « Il y a encore trente ans, l'industrie minière française était florissante. Cette situation s'est ensuite dégradée du fait d'une évaluation trompeuse de notre destin économique, qui a conduit la France, comme les autres pays européens, à estimer que le métier minier, risqué, polluant et à faible rentabilité, ne méritait pas d'être maintenu. Cette erreur stratégique reposait sur l'idée que l'économie de services, vers laquelle s'orientaient les pays développés, n'utiliserait désormais que très peu de ces ressources de base et que leur obtention à faible prix resterait garantie. Nous savons aujourd'hui qu'il n'en est rien ».

En effet, à l'heure qu'il est, la course aux ressources minières est largement entamée, et l'on se réveille en plein cauchemar car la France, dans les métaux, ne dispose plus d'aucune ressource minérale autre que le recyclage.

On peut encore se procurer, à des prix qui sont d'ailleurs en hausse sporadique, les métaux courants : fer, cuivre, aluminium, zinc, nickel (grâce à la Nouvelle-Calédonie), manganèse (grâce au Gabon), etc.

Mais il n'en est pas de même pour d'autres substances, que l'on nomme globalement les « métaux mineurs », dont la définition est floue et dont les éléments qui la constituent peuvent largement varier dans le temps. Il n'y a aucune définition stricte de ce que l'on nomme « métaux mineurs », confondus bien souvent dans la grande presse avec les « terres rares » qui, elles, sont parfaitement définies : ce sont les éléments de numéros atomiques 57 à 71 de la classification périodique, auxquels on ajoute le scandium n°21 et l'Yttrium n°39.

Comme ils ne présentent pas de groupe homogène, ni en ce qui concerne leurs propriétés physico-chimiques, ni du point de vue géologique, tout ce que l'on peut dire globalement sur les « métaux mineurs » c'est qu'ils sont utilisés en petite quantité dans l'industrie, soit seuls, soit en alliage avec d'autres métaux, à cause

de propriétés qui rendent leur utilisation incontournable. Aussi préfère-t-on aujourd'hui parler de « minéraux critiques » ou « minéraux en tension », en les considérant sous l'angle de leur approvisionnement, qui pose ou pourrait poser problème à court terme. Un comité d'experts nommé par la Commission européenne en a donné une liste en 2010. Elle comporte 14 substances ou groupes de substances. Ce sont : Sb, Be, Co, W, métaux du groupe du platine, Ga, Ge, In, Nb, Ta, fluorine, graphite, Mg, terres rares. Les terres rares et les éléments du groupe du platine faisant l'objet d'articles spécifiques dans ce numéro, ils ne seront pas repris ici.

Dans les tableaux qui suivent, les chiffres de production et de réserves, donnés pour 2010 et présentés par tonnage décroissant, sont extraits des *U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries (2011)*. Il s'agit de réserves « reconnues », mais elles sont à prendre avec précaution, surtout pour des pays où il n'y a pas de possibilités de contrôle.

Antimoine

Les gisements de ce métal ne sont pas si rares dans le monde (plus de 2 millions de tonnes-métal), mais les variations importantes de son cours en ont souvent découragé l'exploitation. En France, le BRGM a dressé une liste de 55 indices, dont 14 avec association d'or et 4 avec association de métaux de base. Parmi ces indices, on compte 22 anciennes exploitations, dont La Lucette (53), avec 42 000 t Sb, et La Rochetréjoux (85), avec 16 500 t Sb, ont été les plus marquantes. Ces productions passées ne sont minimes que lorsqu'on les confronte avec celles de la Chine, mais nullement ridicules comparées aux autres pays producteurs (Tabl. 1).

Les gisements d'antimoine se présentent selon **deux types principaux** :

- **stratoïdes** dans des horizons préférentiels de séries carbonatées, parfois avec intercalations gypseuses. Le minerai est soit de la stibine (ou stibnite), soit des

Pays	Productions (t métal/an)	Réserves (t métal)
Chine	120 000	950 000
Russie	3 000	350 000
Bolivie	3 000	310 000
Afrique du Sud	3 000	21 000
Tadjikistan	2 000	50 000
Thaïlande	0	420 000
TOTAL	131 000	2 101 000

Tableau 1. Productions et réserves d'antimoine.

hydroxydes d'antimoine secondaires. Il se trouve en teneurs faibles dans les horizons minéralisés, carbonates recristallisés et bréchifiés qui peuvent se suivre parfois sur des kilomètres. Les reconcentrations s'effectuent en sommet d'anticlinal, en base de synclinal, et dans les fractures et failles. La relation avec des intrusions acides n'est pas toujours évidente ;

- **filons et stockwerks** dans des zones de cisaillement ductile associés à des intrusions acides dans des séries sédimentaires, souvent avec shales noirs. Il s'agit d'amas de petites dimensions plus ou moins reliés entre eux, difficiles à rechercher et à exploiter.

À part ces gisements, exploités surtout pour l'antimoine, ce métal peut être récupéré en faibles teneurs dans des concentrés de galène ou dans des gisements d'or filonien. On notera en sus que l'antimoine contenu dans les batteries au plomb est très bien récupéré. Mais cette ressource tend à diminuer avec la substitution de l'antimoine par d'autres substances dans les batteries.

L'antimoine sous forme métallique n'est guère utilisé qu'en alliage avec le plomb pour les grilles de batteries. Sous forme d'oxyde (Sb_2O_3), il est employé comme retardateur de flamme en ce qui concerne les matières plastiques et les élastomères contenus dans le bâtiment, les véhicules, etc. De façon mineure, on l'utilise dans des peintures, le verre, etc. Enfin, sous forme de sulfure, il est utilisé en pyrotechnie, dans les allumettes, comme lubrifiant des plaquettes de freins... En quantité très réduite, il est utilisé dans la haute technologie : micro-condensateurs, écrans CRT.

En France, la production de l'antimoine à partir du recyclage et des importations est de 500 t/an environ sous forme métallique et de 17 000 t/an d'oxydes (Société Industrielle et Chimique de l'Aisne, et Produits Chimiques de La Lucette).

Béryllium

Le béryllium était naguère très peu utilisé. Ce métal a toutefois de telles propriétés que ses usages se sont multipliés, essentiellement dans les centrales atomiques, l'armement nucléaire, l'industrie aéronautique, puis dans bien d'autres domaines, mais en petites quantités vu son prix.

La production est essentiellement assurée par les États-Unis, accessoirement par la Chine. Toutefois, des gisements de béryllium, développés ou non, existent dans bien d'autres pays.

Les réserves mondiales en Be métal sont estimées à plus de 80 000 t, dont 65% se trouveraient en Utah (Gold Hill et Spor Mountain) et en Alaska (Seward Penin-

sula). La production mondiale étant de l'ordre de 200 t par an, les réserves paraissent suffisantes dans un avenir prévisible, mais elles sont en grande partie localisées dans un seul pays, les États-Unis (Tabl. 2).

Il y a certainement d'autres possibilités de mise en exploitation dans le monde. Par exemple, en France, le BRGM signale une possibilité à Tréguennec (29), avec des réserves de 2400 t Be à 284 g/t dans le tout-venant, accompagné de Sn, Ta, Nb et Li, et un groupe d'indices à Saint-Sylvestre (87). En Russie, le gisement de Yermakovskoye en Sibirie (Bouriatie) devrait prochainement être mis en exploitation. Au Brésil, des indices prometteurs sont connus.

Les sources de béryllium sont assez nombreuses, mais leur tonnage en général très faible. Le béryl ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$) et d'autres minéraux béryllifères sont récupérés en tant que sous-produit de gisements de types divers :

- dans et autour des massifs intrusifs acides :
 - dans les pegmatites granitiques, dont les produits principaux sont les plagioclases et les micas. Les teneurs en BeO sont le plus souvent au-dessous de 0,1% ;
 - dans des filons de quartz proches de pegmatites et greisens, avec cassitérite, wolframite, scheelite et molybdénite. Les teneurs en BeO peuvent dépasser 0,5%, mais les tonnages sont faibles ;
- en association avec des roches alcalines, dont les syénites néphéliniques. On connaît des gisements relativement importants (10 000 t ou plus) au Groënland (Ilimaussaq) et au Canada (Thor Lake), ainsi que dans la péninsule de Kola. Les teneurs sont relativement élevées (0,76% BeO à Thor Lake) ;
- dans des métamorphites (tactites ou skarns, schistes biotitiques), parfois accompagnant des émeraudes. La helvite ($\text{Mn}_4(\text{Be}_3\text{Si}_3\text{O}_{12})\text{S}$) est le minéral béryllifère principal. Les tonnages peuvent dépasser 10 000 t et les teneurs 1% (Sierra Blanca au Texas, Ermakovskoye en Russie, Lost River en Alaska) ;
- le béryllium a été trouvé dans certaines cendres de charbons américains à des teneurs moyennes de 46 g/t.

Actuellement le gisement le plus important est Spor Mountain (Utah), de type volcanogénique épithermal

Pays	Productions (t métal)
États-Unis	170
Chine	20
Mozambique	2
Reste du monde	1
TOTAL	193

Tableau 2. Productions de béryllium.

dans une série de volcanites très acides, avec rhyolites à biotite et topaze, seul connu de ce genre à ce jour. Le minéral exploité est la bertrandite : $\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$ qui se trouve en nodules et grains fins disséminés dans un tuf volcanique. Les ressources sont de près de 72 000 t à 0,71% BeO. Il fournit à lui seul près de 90% de la production mondiale.

Le béryllium, longtemps ignoré, est à présent utilisé dans une multitude d'applications en raison de ses propriétés, en particulier sa très faible densité (1,85) et sa résistance. Un inconvénient : réduit en poudre, il est très toxique. Ci-dessous une liste des principales applications :

- alliages avec Cu ou Al : renforce la résistance du métal et sa dureté, ses propriétés conductrices électriques et thermiques. La quantité de Be nécessaire n'est que de quelques pour cent. Utilisé dans l'aérospace. Avec Mg, Be est un inhibiteur d'oxydation ;
- céramiques à Be avec coefficient de dilatation très bas ;
- fenêtres de tubes à rayons X ; détecteurs de radiations dans le matériel d'expérimentation (LHC par exemple) ;
- miroirs pouvant supporter des températures proches de 0°K (télescope spatial) ;
- dopant utilisé dans les semi-conducteurs ; réacteurs nucléaires : barres de contrôle, modérateur de neutrons, etc.

Son prix élevé limite ses applications – sauf militaires !

Cobalt

Ce métal a été utilisé depuis des millénaires à cause de la couleur bleue magnifique que ses oxydes

Pays	Productions (t métal/an)	Réserves (t métal)
République Démocratique du Congo (Kinshasa)	45 000	3 400 000
Zambie	11 000	270 000
Chine	6 200	80 000
Russie	6 100	250 000
Australie	4 600	1 400 000
Cuba	3 500	500 000
Canada	2 500	150 000
Nouvelle-Calédonie	1 700	370 000
Brésil	1 500	89 000
Maroc	1 500	20 000
États-Unis	0	33 000
Reste du monde	3 700	740 000
TOTAL	87 300	7 303 000

Tableau 3. Productions et réserves de cobalt.

peuvent donner au verre et à la céramique. Le cobalt est rarement exploitable seul : c'est très généralement un sous-produit de l'exploitation de gisements de Cu (Katanga, Zambie), de Ni-Cu (Sibérie, Canada, Australie) ou de Ni latéritique (Nouvelle-Calédonie, Cuba, etc.).

On notera que les ressources latéritiques, présentes dans de nombreux pays, ne sont pas comptabilisées (Indonésie, Venezuela, etc.), ni les énormes ressources des nodules océaniques, qui pourraient atteindre jusqu'au milliard de tonnes. Les gisements de cobalt peuvent être sommairement classés en quatre types :

- le **type Copperbelt du Congo et de la Zambie**, de loin le plus important puisqu'il constitue plus de la moitié de la production mondiale. Très schématiquement, il s'agit d'amas de minerais de Cu-Co (ratio moyen Co/Cu : 1/13 au Katanga et 1/57 en Zambie) stratiformes et lenticulaires dans une série de dolomies et shales dolomitiques. Ces amas sont d'origine syngénétique et d'âge précambrien (800 Ma), mais ont subi une phase de diagenèse vers 570 Ma, puis des transports hydrothermaux formant des filons et des poches. La ceinture cobaltifère de l'Idaho, avec ses minéralisations stratiformes Cu-Co d'âge protérozoïque dans une série de quartzites et siltites avec tufs basiques intercalés est d'un type comparable ;
- le **type latéritique**, qui provient de latérites nickélicifères, formées entre la fin du Tertiaire et le Quaternaire en climat tropical humide par l'altération de roches ultrabasiques (Nouvelle-Calédonie, Cuba, Indonésie, Venezuela, Australie, Cameroun, etc.). Le cobalt se trouve en nodules oxydés dans la partie supérieure ferritique de la latérite, donc bien séparée de la partie silicatée et nickélicifère à la base. Son exploitation artisanale est ancienne, mais ce n'est que récemment que l'on a débuté l'exploitation industrielle (Goro, en Nouvelle-Calédonie) ;
- le **type magmatique en milieu basique à ultrabasique**, qui n'est pas très homogène d'ailleurs : il est difficile de regrouper les gisements de Ni-EGP de Sudbury (Ontario), probablement dus au magma jailli à la suite de la chute d'une énorme météorite, avec ceux de Ni-Cu de Voisey's Bay (Labrador), situé dans la partie troctolitique d'une suite plutonique acido-basique. Les gisements de Cu-Ni-EGP de Norilsk (Sibérie) dépendent de cinq intrusions basiques de gabbrodolérites et troctolites. Ceux du Bushveld sont stratiformes dans des formations ultrabasiques à EGP et Cr s'étendant sur des centaines de km ;
- enfin, on regroupe de façon assez aléatoire le gisement de Co-As de **Bou-Azzer** (Maroc), dont la minéralisation en Co-Ni se trouve à la périphérie de massifs de

serpentinite, et le district **Outokumpu** (Finlande) à Ni-Co-Ag, où il s'agit d'amas stratoïdes à sulfures massifs et disséminés dans un complexe ophiolitique très déformé.

Les utilisations du cobalt sont très variées :

- batteries à Ni-Cd où les cathodes contiennent 50% de Co sous forme LiCoO₂ ;
- alliages réfractaires pour turboréacteurs dans l'aéronautique ;
- alliages Co-Cr pour prothèses dentaires ;
- alliage carbure de tungstène-Co pour outils de coupe ;
- alliages à coefficient de dilatation thermique nul ;
- alliages durs pour robinetterie nucléaire ;
- aimants permanents (AlNiCo, Sm-Co) ;
- catalyseurs en pétrochimie pour désulfurer les produits pétroliers ;
- colorant pour verre et céramiques (Co₃O₄) ;
- radiologie (⁶⁰Co) ;
- industrie des disques audio et vidéo ;
- fabrication des pneumatiques à carcasse radiale.

Tungstène

Ce métal est largement distribué à travers le monde, encore que les gisements soient assez petits. La France fut un gros producteur de tungstène avec Puy-les-Vignes, puis Salau, mais ces mines ont successivement été fermées, comme toutes les mines de ce pays. En Europe toutefois, l'Autriche, avec Mittersill, le Portugal, avec Panasqueira, continuent leur exploitation. La Chine détient 85% de la production et 72% des réserves connues (Tabl. 4).

Les grands gisements de tungstène sont généralement en étroite relation avec une intrusion acide, le plus souvent granitique :

- minéralisations filoniennes et/ou en stockwerks dans et autour d'une intrusion granitique, qui forment une grande partie du stock économique mondial. Ce type est

Pays	Productions (t métal/an)	Réserves (t métal)
Chine	52 000	1 900 000
Russie	2 500	250 000
Bolivie	1 100	53 000
Autriche	1 000	10 000
Portugal	950	4 200
Reste du Monde	3 300	400 000
TOTAL	60 850	2 617 200

Tableau 4. Productions et réserves de tungstène.

représenté en Chine (région du Jiangxi), Bolivie, Pérou (Morococha), Portugal (Panasqueira), Russie. Le tungstène est sous forme de wolframite $(\text{Fe,Mn})\text{WO}_4$ (dominante) et de scheelite CaWO_4 , souvent accompagnée par de la cassitérite SnO_2 . La plupart des gisements ont moins de 1 Mt de minerai ; quelques uns ont des dizaines de millions de tonnes de réserves, mais à très faible teneur (0,1% WO_3) ;

- minéralisations autour d'un « porphyre à tungstène ». Elles se présentent en essaim de veinules et stockwerks dans la zone subvolcanique d'intrusions acides, parfois avec brèches minéralisées. La wolframite et la scheelite sont souvent accompagnées par de la molybdénite ; des teneurs en W peuvent aussi être présentes dans des porphyres à molybdène et à étain. Les teneurs sont basses (0,1-0,4% WO_3) mais les tonnages sont élevés ;
- minéralisations dans des skarns (formations carbonatées au contact d'une intrusion granitique). La minéralisation, essentiellement de la scheelite, est parfois accompagnée de Cu, Mo, Bi. Elle est en disséminations et en veinules. Les tonnages peuvent atteindre plusieurs millions de tonnes de minerai à 0,3 – 1,5% WO_3 . Avec les minéralisations en stockwerks et filons, ce sont les plus fréquentes. Exemple en France : Salau (Ariège) ;
- minéralisations dans des cheminées bréchiques sur les bords d'intrusions granitiques. Ici encore, un exemple français : l'ancienne mine de Puy-les-Vignes (Haute-Vienne) ;
- minéralisations stratoïdes. L'exemple classique en est Mittersill (Autriche), dans un contexte fortement métamorphique (amphibolites) et un environnement volcano-sédimentaire.

Pour être complet, on peut encore citer les placers à scheelite et wolframite, les dépôts lacustres qui peuvent avoir une teneur de 70 g/t W, certains dépôts de sources chaudes (Golconda, Nevada, et Uincia, Bolivie). Tout cela n'a qu'une importance économique à peu près nulle.

La grande dureté et le point de fusion élevé (3 410°) du tungstène le destine à plusieurs usages :

- carbure cémenté de tungstène, fabriqué à partir de poudre de W avec de la poudre de Co. Ce mélange est pressé et fritté à 1 400°. On obtient un composite alliant la dureté du CW avec la ductilité du Co pour réaliser des outils de coupe et des aciers inoxydables réfractaires. On y utilise 60% de la production mondiale du tungstène ;
- aciers à ferrotungstène pour différents usages : aciers d'usinage à froid, aciers à coupe rapide, aciers à aimants ;
- filaments de lampes à incandescence (en régression) ;

- alliages pour thermocouples avec Rh, avec Fe pour fabriquer des rotors de gyroscope ; bronzes de tungstène (Na_xWO_3 avec $x < 1$) : pigments pour verres et céramiques ;
- WS_2 : lubrifiant pour revêtement de lames de rasoir.

Métaux en traces dans les métaux de base (gallium, germanium, indium)

Ces trois métaux ne sont jamais exploités seuls pour eux-mêmes. Il arrive que l'on rencontre des concentrations naturelles de gallium (Ga) ou de germanium (Ge), en veinules ou dans des interlits de séries schisto-calcaires, mais jamais jusqu'à présent en quantité suffisante pour ouvrir une exploitation. La production minière de ces métaux provient donc de l'exploitation d'autres minerais : essentiellement la bauxite pour le gallium, la sphalérite pour le germanium et l'indium (In).

Les productions de **gallium** ne sont pas connues dans le détail. On sait qu'en 2010 la production minière globale a été de 106 tonnes, les producteurs majeurs étant la Chine, l'Allemagne, l'Ukraine et le Kazakhstan. On estime que les réserves contenues dans les bauxites (teneur 50 g/t) du monde entier atteindraient 1 million de tonnes Ga, auxquelles il faudrait ajouter celles qui pourraient être associées à la sphalérite ainsi qu'au charbon.

Les productions minières de **germanium** ne sont pas connues. On estime qu'environ 60% du Ge provient du traitement des minerais de sphalérite et 30% de cendres de charbon. Le recyclage est presque inexistant pour le germanium comme pour le gallium. Les productions d'**indium** proviennent également des minerais de sphalérite (Zn), mais aussi de ceux de Cu, Pb, et métaux précieux. Les chiffres disponibles pour le germanium et l'indium sont donnés ci-après (Tabl. 5 et 6).

Les chiffres de production (Ga, Ge et In) concernent le traitement de minerais importés. Les États-Unis n'ont pas déclaré leur production. Toutes les bauxites, minerais de Zn ou charbons ne présentent pas de teneurs économiques en Ga, Ge ou In. L'étude des types de gisement et des zonalités en rapport avec l'abondance de ces

Pays	Productions raffineries (t métal/an)	Réserves (t métal)
Chine	80	450
Russie	5	?
États-Unis	4,6	?
Reste du Monde	30	?
TOTAL	119,6	?

Tableau 5. Productions et réserves de germanium.

Pays	Productions raffineries (t métal/an)
Chine	300
Corée du Sud	80
Japon	70
Canada	35
Belgique	30
Pérou	25
Brésil	5
Russie	4
Reste du Monde	25
TOTAL	574

Tableau 6. Production d'indium.

métaux est en cours et semble devoir donner des résultats très positifs.

En France, on connaît des exploitations plombo-zincifères dont le minerai était relativement riche en Ge : le filon à Zn-Ag de Saint-Salvy (81), qui a produit 500 t Ge métal de 1975 à 1993 et contient encore 300 t de réserves ; le filon à Pb-Zn-Ag de Pontpéan (35) ; le filon à Pb-Zn-Ag de Plélauff (22) ; l'amas stratiforme à Zn-Pb-Ag de la Croix-de-Pallières (30) a fourni 28 t Ge de 1911 à 1971.

La plus grande partie du *gallium* est utilisée sous forme d'arséniure (GaAs) et de nitrure (GaN). Le premier sert à fabriquer des appareils d'optoélectronique. Il peut, en particulier, changer directement l'électricité en lumière laser et est employé dans les diodes électroluminescentes (LED), les photodétecteurs, les cellules solaires, les circuits intégrés, les semi-conducteurs et transistors. Le second est un semi-conducteur intéressant pour la microélectronique de puissance, en particulier pour les transistors haute fréquence.

Plusieurs composés de *germanium* sont utilisés pour leurs caractéristiques optiques. GeO_2 a un indice de réfraction élevé et une faible dispersion optique. Il sert de dopant dans les fibres optiques de silice. Le composé GeSbTe est utilisé dans les DVD. Le germanium lui-même est utilisé dans les caméras infra-rouge, les spectroscopes, etc. Les alliages SiGe deviennent un semi-conducteur important dans les circuits intégrés à haute rapidité, en particulier dans les transmetteurs radio. Enfin, l'utilisation de Ge dans les cellules photovoltaïques se développe, particulièrement dans les cellules solaires à GaAs pour l'exploration spatiale. Les cristaux de Ge très purs peuvent identifier avec précision les sources de radiation.

L'*indium* est essentiellement utilisé sous forme d'oxyde In-Sn (ITO) pour la fabrication d'écrans à cristaux liquides (LCD) et de cellules photovoltaïques en couche mince. On emploie aussi divers composés de l'Indium

(InGaN , CuInSe_2 , InSe_2) pour fabriquer des cellules photovoltaïques à jonction. Le phosphore d'indium (InP) est le substrat des composants opto-électroniques (LED, diodes laser, etc.) pour communications sur fibres optiques. L'alliage In-acier diminue la résistance due aux frottements et sert à faire des coussinets pour paliers et roulements à bille. Adhérent au verre, il peut être utilisé comme réflecteur de lumière et conducteur d'électricité.

Niobium (ou columbium) et Tantale

Ces deux métaux ont bien des points communs, et sont le plus souvent étroitement associés, en particulier dans une série minérale nommée *niobo-* ou *columbo-tantalite* $(\text{Fe,Mn})(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_6$. Le pyrochlore $(\text{Na,Ca})_2(\text{Nb,Ti,Ta})_2\text{O}_6$ (O, OH, F) est un minéral plus complexe mais bien plus exploité lorsque sa teneur en Nb est élevée. Il renferme 3 à 6% d'oxydes de terres rares et forme une série avec le *micro-lite* qui en est le membre riche en tantale. La *woodginitite*, $\text{MnSnTa}_2\text{O}_6$ est plus rare. Les chiffres de production de niobium sont élevés, ce qui n'est pas le cas pour le tantale, comme le montrent les tableaux 7 et 8. Les productions des États-Unis ne sont connues ni pour l'un ni pour l'autre.

Selon leur richesse en Nb ou Ta, les gisements de Nb-Ta se divisent en deux groupes :

- **gisements riches en Nb**, associés à des complexes alcalins, avec carbonatites et syénites néphéliniques. L'exploitation se situe le plus souvent dans la partie superficielle où il y a eu enrichissement supergène. C'est le cas à Araxà (Brésil), où la partie régolithique a une teneur de 2,5% Nb_2O_5 alors que la carbonatite n'a que

Pays	Productions (t métal/an)	Réserves (t métal)
Brésil	58 000	2 900 000
Canada	4 400	46 000
Reste du Monde	600	?
TOTAL	63 000	2 946 000

Tableau 7. Productions et réserves de niobium.

Pays	Productions (t métal/an)	Réserves (t métal)
Brésil	180	65 000
Mozambique	110	3 200
Rwanda	100	?
Australie	80	40 000
Canada	25	?
Reste du Monde	170	?
TOTAL	665	108 0

Tableau 8. Productions et réserves de tantale.

1,5%. Le minerai non altéré est du pyrochlore. Mount Weld (Australie) est du même type ;

■ **gisements riches en Ta**, dérivant d'intrusions acides. Le gisement d'Abu Dabbab (Égypte) se trouve dans une coupole leucogranitique, avec niobo-tantalite riche en Ta, Sn, pyrochlore, monazite, etc. Les teneurs sont de 252 g/t Ta₂O₅ et 116 g/t Nb₂O₅. En France, les anciennes exploitations de Beauvoir (surtout exploitées pour kaolin), les indices d'Echassières (03), avec des réserves de 5 000 t Ta+Nb et 280 000 t Li₂O et de Tréguennec (29) avec 1 600 t Ta, 1 300 t Nb, 66 000 t Li₂O et 2 400 t Be mériteraient sans doute un examen. D'autres gisements en milieu acide sont de type pegmatitique. Celui de Mibra (Brésil) a une teneur de 375 g/t Ta₂O₅. De nombreux gisements du même type existent en Afrique (Rwanda, Burundi, Congo-Kivu, etc.) et en Australie (Greenbushes, Wodgina) ;

Enfin, on peut citer des placers dérivant de pegmatites, dans lesquels la cassitérite est récoltée avec Ta-Nb comme sous-produits (Malaisie, Thaïlande).

Les **utilisations du niobium** sont essentiellement dans les alliages :

- un alliage Ti-Al-Nb avec l'acier, dans des proportions très précises, renforce sa résistance. Il est utilisé dans les oléoducs, la construction spatiale et certaines pièces d'automobiles ;
- les aimants supraconducteurs utilisent un alliage Nb₃Ge ou un acier allié à Nb-Zr ou Nb-Sn ;
- des alliages de Nb avec Zr, Mo, V, Cr ou W servent dans la soudure à l'arc d'aciers inoxydables ;
- les alliages Nb-Ti sont utilisés en chirurgie ;
- un alliage Nb-Zr enveloppe les barres d'uranium dans les réacteurs nucléaires.

Le **tantale** en poudre est utilisé en électronique dans les résistors et condensateurs, principalement dans les téléphones portables, les ordinateurs portables et l'électronique transportée. Il renforce la résistance et la ductilité des alliages par exemple en aéronautique, dans les réacteurs nucléaires, les équipements chimiques, etc. Il peut être employé dans la fabrication de verres optiques à haut indice de réfraction et est utilisé dans les projectiles de guerre à cause de son pouvoir de pénétration.

Fluorine (ou fluorite), graphite et magnésium

On peut s'étonner de voir ces trois substances être rangées dans la classe « en tension ». En effet, les réserves ne paraissent pas manquer.

En ce qui concerne la **fluorine**, attention aux faux amis : en anglo-américain, *Fluorine* (ou *Fluorite*) désigne l'élément fuor et non le minéral CaF₂, nommé *Fluorspar*. Dans ce qui suit, on ne parlera que de la **fluorine** dans le sens français du mot.

Les réserves mondiales reconnues de **fluorine** atteignent 230 Mt alors que la consommation ne dépasse pas 5,4 Mt par an. On a donc encore pour près de 45 ans d'exploitation. D'autres réserves, énormes, sont connues mais non reconnues, comme la fluorine stratiforme et filonienne du Latium (Italie), celle des bordures du Morvan, etc., et les innombrables gîtes filoniens, en France en particulier. Et n'oublions pas la fluorine contenue dans les phosphates (120 000 t exploitées en 2010 aux États-Unis), dont les réserves sont estimées à 1 290 Mt pour le monde entier. Les réserves de fluorine sont assez bien distribuées puisqu'elles se trouvent sur tous les continents, y compris l'Europe, avec la France (10 Mt), la Russie (9 Mt), l'Espagne (6 Mt), l'Italie (chiffre non publié). Les deux plus gros producteurs en 2010 ont été la Chine (3 Mt/an) et le Mexique (1 Mt/an).

Les types de gisement de fluorine sont bien connus et l'on ne s'y attardera pas :

- filons, stockwerks et remplissage de brèches tectoniques, en somme tous remplissages de vides y compris les karsts ;
- gisements stratiformes, soit d'origine sédimentaire, soit en relation avec des intrusions acides, fréquemment en milieu volcanique (tuffites) ;
- complexes de carbonatites et syénites néphéliniques ;
- résidus du traitement de minerais sulfurés ;
- sous-produits du traitement des phosphates.

Les utilisations de la fluorine se font essentiellement à partir de HF, qui sert de base à la production d'une vaste gamme de fluorocarbonates, fluoroélastomères et fluoropolymères. La fluorine et la cryolite sont utilisées dans la métallurgie extractive de l'aluminium. La fluorine est également utilisée comme fondant dans la métallurgie de l'acier. Des usages, tels que l'ajout de fluor dans l'eau de consommation ou les dentifrices, sont loin d'être négligeables en quantité.

Le **graphite** mériterait probablement davantage le terme de « minéral en tension », l'essentiel des réserves connues se trouvant en Chine et, à un moindre degré, en Inde et en Russie. Le tableau 9 donne les principaux chiffres.

On distingue plusieurs types de gisements, presque tous liés au métamorphisme, local ou régional :

- lentilles de graphite dans les schistes et grès, parallèles à la schistosité, plus ou moins riches en paillettes (de 2%

Pays	Productions (t/an)	Réserves (t)	Réserves possibles (t) ¹
Chine	800 000	55 000 000	220 000 000
Inde	130 000	5 200 000	
Brésil	76 000	360 000	1 000 000
Corée du Nord	30 000	?	11 000 000
Canada	25 000	?	2 700 000
Sri Lanka	11 000	?	3 850 000
Ukraine	6 000	?	
Mexique	5 000	3 100 000	
Madagascar	5 000	940 000	
Reste du Monde	3 000	6 400 000	
CEI avec Ukraine			21 000 000
République Tchèque			2 300 000
États-Unis			850 000
Zimbabwe			600 000
TOTAL	1 091 000	71 000 000	263 300 000

Tableau 9. Productions et réserves de graphite.

à 40%), d'une épaisseur métrique à pluri-métrique et d'une extension possible de plusieurs milliers de mètres. Ces gisements sont de loin les plus courants (Alabama, Texas, Canada, Allemagne, Norvège, Madagascar) ;

- gisements complexes dans des marbres, en général très variables en qualité sur de courtes distances. Le plus important est Lac-des-Iles, au Québec ;
- formations riches en charbon métamorphisées. Ces gisements fournissent un graphite microcristallin stratiforme. On les trouve en Autriche (Kaiserberg), au Mexique (Sonora), en Corée du Sud, aux États-Unis (bassin charbonnier de Rhode Island, localement métamorphisé) ;
- filons de remplissage de fractures, d'origine incertaine et controversée, parfois rencontrés avec d'autres types de gisement, par exemple dans les mines de graphite du Sonora. Les mines filoniennes les plus importantes sont celles du Sri Lanka. Aux États-Unis, les filons de la Crystal Graphite Mine ont été exploités.

Un tiers environ (32%) du graphite est utilisé pour élever le contenu de l'acier en carbone, modifiant ainsi sa dureté et un autre tiers (31%) dans les matériaux réfractaires (en particulier creusets). Les autres applications sont surtout pour l'automobile (freins), la lubrification, l'électricité (électrodes), les réacteurs nucléaires, et divers instruments de poids léger (archets de violon, lignes pour pêche, raquettes de tennis, etc.). Et n'oublions pas la plus ancienne utilisation du graphite : les mines de crayon.

Le *magnésium* n'est certes pas un élément rare : il forme à peu près 2% de la croûte terrestre. Que l'on

pense à l'extension des dolomies et calcaires dolomitiques ! Cette ressource a été utilisée par Péchiney dans les Pyrénées à l'aide d'un procédé dont elle était l'inventeur. Mais on exploite actuellement des gisements avec un contenu supérieur en Mg, avec essentiellement deux minéraux porteurs : la magnésite $MgCO_2$ et la brucite $Mg(OH)_2$. Très sommairement on distingue 5 types de gisements :

- gîtes en amas ou lentilles associés à des formations carbonatées, où la calcite a été remplacée par des minéraux magnésiens ;
- gîtes disséminés ou en amas dépendant du lessivage de roches ultrabasiques (olivine et serpentine) et dépôt des carbonates et hydroxydes magnésiens ;
- formations sédimentaires stratiformes avec dépôt de lits de magnésite cryptocristalline dans des formations de faciès lagunaire ou de lacs salés, rarement dans des faciès d'eau douce ;
- eaux sursalées de lacs et de mers fermées (Mer Morte) ;
- massifs d'ultrabasites riches en olivine $(MgFe)_2SiO_4$.

La production mondiale de magnésite commerciale (MgO) est de plus de 5,5 Mt et celle du magnésium dépasse 760 000 t, le producteur de loin le plus important étant la Chine (respectivement 3,2 Mt et 650 000 t). Les ressources sont énormes, partout (on parle de dizaines de milliards de tonnes, aussi bien en roche qu'en solutions salines) et les réserves dépassent largement les 2 milliards de tonnes. Leur répartition à la surface du globe est, de plus, fort bien distribuée. S'il y a « tension » sur les marchés cela ne peut pas provenir de la rareté de la matière brute mais de causes sur lesquelles le géologue n'a pas d'action, telles que l'absence d'usines de traitement due à une compétitivité sur les prix toujours en faveur de la Chine.

Les usages de la magnésite sont multiples : ils dépendent de la température de chauffage qu'elle subit :

- à moins de 1 000°, le produit est utilisé comme pigment en peinture, charge pour les papiers et certaines matières plastiques ;
- entre 1 000° et 1 500°, il sert d'additifs pour les engrais sur sols un peu acides, et de complément dans les aliments pour bétail ;
- de 1 500° à 2 000°, c'est un matériau fritté utilisé pour briques et revêtements réfractaires pour fours et creusets métallurgiques.

La magnésie électro-fondue à très haute température acquiert des propriétés conductrices. Elle est utilisée pour les appareils de chauffage, les résistances électriques, etc.

L'alliage Al-Mg est largement employé dans les emballages d'aluminium, en particulier les canettes,

1. Chiffres 2004.

mais également mallettes et boîtiers. Des alliages Al-Mg sont utilisés dans l'industrie aéronautique et automobile, pour alléger les véhicules, ainsi que pour la fabrication de pièces moulées pour machines. Le Mg est utilisé en sidérurgie pour éliminer le soufre du fer et de l'acier.

Conclusions

La Nature n'a pas distribué ses richesses équitablement. C'est vrai pour toute ressource et les produits miniers ne font pas exception. On a pu expliquer, pour cette raison, la « tension » existant sur certains d'entre eux, géologiquement très localisés. Un exemple en est le béryllium, produit à 88% par les États-Unis, dans un seul gisement, dont les réserves ne sont d'ailleurs pas publiées. Pourtant, d'autres sources ont été ou sont explorées : il serait temps de les mettre en valeur ! Près des trois quarts du graphite sont produits par la Chine, encore que la découverte de nouveaux gisements conséquents ailleurs soit tout à fait possible. Les platinoïdes (traités dans un autre article de ce numéro) en sont un autre exemple : 95% des réserves se trouvent en Afrique du Sud, et il y a peu d'espoir de découvrir un nouveau Bushveld sur la planète. Il faudra s'en contenter, quitte à trouver des produits de substitution si par hasard ces sources étaient menacées.

Il n'en est pas de même pour toutes les substances minérales en tension. L'antimoine est exporté à 90% par la Chine et pourtant des gisements importants sont connus en Russie, en Thaïlande, en Bolivie ; toute une région antimonifère existe au Mexique, et on en trouve même en Europe (Italie, France). Situation identique pour le tungstène, où des gisements petits, mais nombreux, existent dans bien des pays. Attend-on pour les développer que le niveau de vie de ces pays s'abaisse jusqu'à celui de la Chine...ou l'inverse ? De même, la niobo-tantalite n'est pas un privilège du Brésil, producteur de 92% du Nb mondial : de gros gisements existent en Arabie Saoudite, en Finlande, en Russie, et des recherches prometteuses sont en cours au Royaume-Uni, en Irlande, au Groënland, en Espagne... Ne parlons même pas de la fluorine ou du magnésium !

La situation est très différente pour les « métaux mineurs », dont la production est en grande partie liée à celle d'un métal majeur : Al pour le gallium, Zn pour le germanium et l'indium. On peut ajouter Cu pour la plus grande partie du cobalt. L'extraction de Ga, Ge et In ne s'effectue pas obligatoirement dans le pays d'où est originaire le minerai, qui peut être exporté et traité très loin de la mine. Noyelles-Godault produisait du Ge métal pro-

venant de tous les minerais du monde. Il suffirait de créer ou d'agrandir les usines de traitement pour augmenter la production et concurrencer la Chine – à la seule condition que l'exploitation du zinc ou de l'aluminium ne chute pas !

Ainsi donc, les seuls minéraux pour lesquels la Nature se soit montrée avare semblent être les platinoïdes, le béryllium, et peut-être le graphite. Si l'Afrique du Sud, les États-Unis ou la Chine nous les refusent un jour, il ne restera plus qu'à trouver des substituts. La Nature n'est pour rien dans les « tensions » sur les autres minéraux : le financier, l'économiste et le politique en sont responsables, et c'est à eux – s'ils le veulent bien – de les résoudre, bien plus qu'au géologue.

Bibliographie

- BRGM : Fiches Fluorine, Niobium et Tantale, Cadmium, Germanium, Indium, Gallium.
- Coll. Natural resources, New-Brunswick. Mineral commodity profiles (Graphite).
- Jébrak M. & Marcoux E., 2008 : Géologie des ressources minérales. Gouv. du Québec.
- Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. (Directeurs). Industrial Minerals and Rocks, 2006 : SME, 7^{ème} édition.
- Harben P.W., 1999 : The industrial minerals handybook, Industrial Minerals Information, London.
- Korystov F.Ya., 1986 : New types of fluorite deposits and their genesis.
- Mikolajczak C., 2009 : Availability of Indium and Gallium (Metals and Chemicals Indium Corp.).
- Perron Louis. Le Niobium. Ressources Naturelles du Canada.
- Pohl W.L., 2011 : Economic Geology, principles and practice : Metals, Minerals, Coal and Hydrocarbons (Chap. Niobium and Tantalum).
- Simandi G., 2009 : World fluorspar resources, market and deposits ; examples from B.C. (Canada). B.C. Geological Survey, Inform. Circular 2009 – 4.
- U.S. Geological Survey, 2011 : Mineral Commodity Summaries.
- U.S. Geological Survey, 2010 : Minerals Yearbook.
- Wikipedia : Tantalum (2011) ; Indium (2011) ; Germanium (2011).