





# Panorama 2010 du marché du béryllium

Rapport final

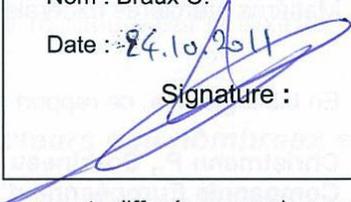
**BRGM/RP-60203-FR**  
Septembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets  
de Service public du BRGM 2010

**P. Christmann, L. Corbineau, J.F. Labbé, J. Monthel**

Avec la collaboration extérieure de  
**la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS)**

<b>Vérificateur :</b>
Nom : Lebret P.
Date : 22-10-2011
Signature : 

<b>Approbateur :</b>
Nom : Braux C.
Date : 24.10.2011
Signature : 

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,  
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.**

**Mots clés :** Béryllium, Stratégie économique, Stratégie des matières premières, Économie, Matières premières minérales, Industrie, Politiques publiques.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Christmann P., Corbineau L, Labbé J.F et Monthel J.,** avec la collaboration extérieure de la **Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS)** (2011) - Panorama mondial 2010 du marché du béryllium. BRGM/RP-60203-FR, 60 p., 15 fig., 7 tabl.

© BRGM, 2011, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Points marquants

### LE BÉRYLLIUM

Un élément très toxique aux usages nécessairement restreints (marché de niche), mais aux qualités physiques très difficilement substituables dans des domaines du nucléaire de la défense et de l'électronique.

#### ***Des usages variés, où le béryllium est difficilement substituable***

Les qualités physiques du béryllium en font un élément à usages variés dans des domaines de pointe. Il est surtout utilisé en télécommunications et en informatique (51 % de la consommation mondiale 2007 selon BizAcumen) sous forme d'alliage pour sa très bonne conductivité électrique (contacteurs...), ou sous forme d'oxydes pour sa très bonne conductivité thermique (support d'équipements électroniques de puissance...). Pour ces mêmes raisons, il est utilisé dans l'électronique de l'industrie automobile (13 %).

Sous forme métallique ou en alliage avec l'aluminium, sa dureté et sa légèreté en font un matériau de choix pour l'aérospatiale et la défense (16 % de la consommation mondiale 2007), où il est utilisé dans des satellites, de nombreuses pièces d'avions, dans les pièces de guidage et les gyroscopes ou encore des pièces sous forte pression (industrie pétrolière).

Le béryllium est utilisé dans le nucléaire civil et militaire pour ses fortes capacités de réflexion et ralentisseur de neutrons. Il est enfin transparent aux rayons X, d'où des usages en radiographie.

Dans beaucoup de ces usages, les essais de substitutions se sont traduits par une perte de performances.

#### ***Un marché de niche pour un élément toxique***

Sa consommation a été estimée à 320 tonnes par an (USGS), à un prix remonté à 507 US\$/kg en 2010 (après quelques années autour de 300 US\$/kg), soit un enjeu global d'un ordre de grandeur de 160 millions d'US\$. Il s'agit donc d'un très petit marché à l'échelle globale, les usages étant restreints à leur minimum par la toxicité de l'élément.

#### ***Une ressource relativement abondante, des producteurs peu nombreux et mal répartis***

Les gisements de béryllium sont assez nombreux et répartis dans de nombreux pays, mais peu d'entre eux sont en exploitation car la demande en est trop faible. Le gisement de SporMountain (USA) produit à lui seul 85 % du béryllium mondial et est en

situation de quasi-monopole. La Chine serait, selon l'USGS, le second producteur avec 14 % de la production mondiale en 2009. Mais la production réelle de nombreux pays reste mal renseignée (Chine, Kazakhstan...).

Le béryllium est produit à partir de deux types de minéraux, le béryl qui demande un traitement assez lourd, et la bertrandite, plus facile à traiter.

La bertrandite est le minéral à béryllium dominant dans le gisement de SporMountain, aux USA, et le béryl dans les gisements de pegmatites (Chine, Mozambique), certains complexes intrusifs alcalins (Chine) et des coupoles granitiques à Sn et/ou W.

L'USGS estime à plus de 80 000 tonnes de béryllium les ressources mondiales, dont 65 % seraient situées aux USA dans le district de SporMountain. Cependant les gisements de certains pays (Chine, Russie...) sont mal documentés et il est difficile d'estimer les ressources réelles.

Il n'existe que deux usines principales de traitement intégrées du minerai au métal, aux alliages et à l'oxyde de béryllium. La première est celle de Materion / Brush Wellman, aux États-Unis, qui exploite le gisement de SporMountain ; la seconde est celle d'Ulba au Kazakhstan. L'un des producteurs chinois de produits transformés de béryllium (Ningxia) traiterait également directement du minerai.

En ce qui concerne la transformation du béryllium, il existe en revanche de nombreux intervenants bien répartis dans le monde.

### ***Un recyclage à développer***

Le béryllium est encore très peu recyclé. Selon le rapport du groupe de travail ad-hoc pour la Commission Européenne sur les matières premières minérales critiques (2009), 19 % de la consommation en béryllium est issue du recyclage de produits transformés. Mais selon l'USGS, seulement 10 % de la consommation proviendrait du résidu d'usinage d'alliages et du démantèlement d'équipement militaire ancien. Le recyclage reste donc à développer, pour des raisons économiques comme environnementales ou sanitaires.

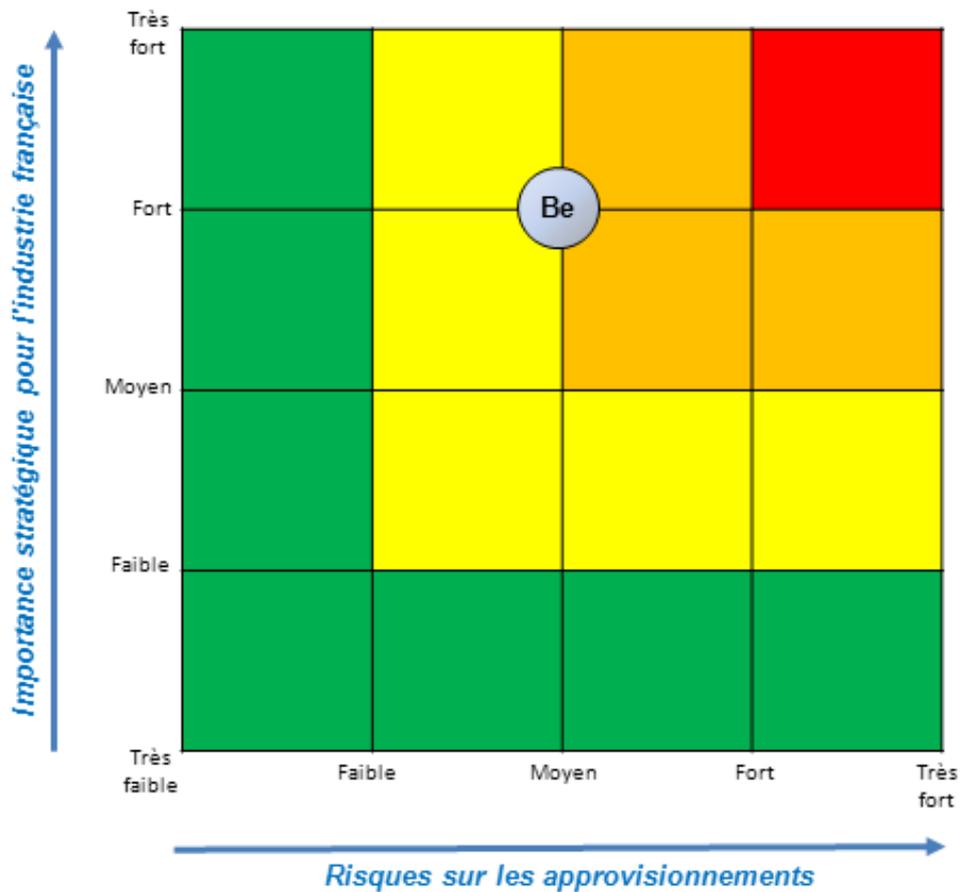
### ***Une certaine importance pour les industries françaises mais un risque faible sur les approvisionnements***

Le béryllium reste un composant incontournable, souvent sous forme d'alliage cuivre-béryllium, pour les télécommunications, l'informatique, l'électronique automobile, la défense, l'aérospatiale, le nucléaire civil (projet ITER...), l'imagerie médicale, etc. Il est donc très important, de par ses propriétés remarquables, bien que les besoins restent de faibles volumes.

Les craintes concernant l'approvisionnement en béryllium sont relativement faibles, le principal producteur, Materion / Brush Wellman, n'ayant jamais fait défaut, malgré le

contrôle de ses exportations par les Départements de la Défense et du Commerce des États-Unis. La montée en puissance d'autres sources renforce ce sentiment.

**EVALUATION DE LA CRITICITE DU BERYLLIUM  
(Synthèse)**



- Zone à forte criticité. Actions conservatoires à prendre par l'Etat. Suivi de l'évolution des indicateurs de criticité
- Zone à forte criticité. Veille active recommandée (observation continue des marchés, alertes, proposition de scénarios de parade)
- Zone à criticité moyenne. Veille spécialisée recommandée (rédaction d'un rapport mis à jour annuellement)

### ***Un durcissement envisagé des normes d'exposition susceptible d'affecter la pérennité de la filière en France***

La valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) au béryllium et ses composés dans l'atmosphère en milieu professionnel est actuellement fixée, en France, à  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sur 8 heures (depuis 1995). Des études sanitaires sembleraient indiquer que cette norme est insuffisamment stricte pour prévenir tout risque de béryllose ou autres risques sanitaires liés au béryllium. L'ANSES a donc proposé en octobre 2010 d'abaisser la VLEP à  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , soit une division par 200 du seuil, sur la base d'études épidémiologiques tendant à donner une « Concentration Maximale sans effets nocifs observés » de  $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et en appliquant en plus une marge de sécurité en divisant ce seuil par un facteur 20.

Le nombre de travailleurs éventuellement exposés au béryllium ou ses composés est évalué à 12 000 en France, hors aéronautique et défense (INRS, 2009). La concentration de  $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (10 fois moins que le maximum réglementaire actuel) n'est pas dépassée par la plupart des entreprises du secteur. Celles qui la dépassent devant pouvoir améliorer leurs procédés et leur protection pour revenir en deçà. En revanche, selon certains professionnels du secteur (Brush Wellman), la limite vingt fois moindre de  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  risque d'être difficile à respecter sans menacer l'existence même de la filière. On remarquera qu'elle approcherait en ordre de grandeur des teneurs d'environnements empoussiérés sans lien spécifique avec la filière béryllium, même naturellement empoussiérés tels que les vents de poussière saharienne ou les panaches volcaniques, et peut-être aussi les poussières générées par les travaux publics ou les exploitations de carrières pour granulats.

Une très grande marge de précaution au-delà de la « concentration sans effets nocifs observée » serait susceptible de menacer non seulement les filières de fabrication ou de traitement de produits bérylliés en France, mais aussi les domaines de recherche technologique de pointe utilisateurs de béryllium (laser, satellites, etc.), ainsi que le retraitement des déchets d'alliages et le recyclage.

On pourrait par exemple suggérer d'abaisser la VLEP à  $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dans un premier temps, soit une division par 10 de la norme actuelle, ce qui devrait améliorer encore la protection déjà existante des travailleurs et contraindrait les entreprises à maximiser leurs précautions de protection, mais sans toutefois menacer la pérennité de la filière en France. Et recommander parallèlement de lancer, avant d'éventuelles baisses supplémentaires, des études plus précises sur les effets sanitaires des divers produits bérylliés, et aussi sur les teneurs atmosphériques observables en dehors des locaux industriels concernés par le béryllium, à titre de référence.

### ***Quelques recommandations pour la filière béryllium en France***

La France ne produit pas de béryllium, mais il en existe plusieurs transformateurs sur son territoire. Les importantes ressources mondiales et la taille restreinte du marché ne justifient pas pour l'instant la mise en production de gisements français ou européens. Leur connaissance est cependant souhaitable vu la criticité des usages dans le

nucléaire civil et militaire (dissuasion) pour se prémunir d'éventuelles ruptures commerciales, même si elles sont peu probables.

Une veille annuelle est recommandée sur l'évolution de la production du béryllium et de ses usages. Un meilleur bilan mieux chiffré des quantités encore utilisées par les filières nucléaires serait souhaitable.

Une réflexion pesée sur le niveau de la diminution souhaitable de la VLEP est recommandée pour permettre tout à la fois une prévention contre tout effet nocif et une pérennité de la filière avec les mesures techniques de protection adéquates.

Le recyclage devrait être développé, ce qui créerait d'autres voies d'approvisionnement et limiterait les risques pour l'environnement et la santé.



## Sommaire

<b>Points marquants .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>13</b>
1.1. DÉFINITIONS .....	13
1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE .....	14
1.3. SOURCES DES DONNÉES.....	14
<b>2. Le béryllium.....</b>	<b>17</b>
2.1. DONNÉES DE BASE .....	17
2.2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.....	18
2.3. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES .....	19
2.4. TOXICITÉ.....	19
2.5. HISTORIQUE DE LA DÉCOUVERTE ET INTÉRÊT DU BÉRYLLIUM.....	19
<b>3. Usage, consommation, prix et marché du béryllium .....</b>	<b>21</b>
3.1. PRINCIPAUX DOMAINES D'UTILISATION DU BÉRYLLIUM .....	21
3.1.1. Les alliages au béryllium .....	21
3.1.2. Céramiques au béryllium.....	22
3.1.3. Béryllium métal.....	22
3.2. CONSOMMATION MONDIALE DE BÉRYLLIUM .....	24
3.3. CONSOMMATION FRANÇAISE DE BÉRYLLIUM .....	26
3.4. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DES USAGES DANS LES PROCHAINES ANNÉES (HORIZON 2015).....	27
3.5. RECYCLAGE ET SUBSTITUTION.....	28
3.6. PRIX ET MARCHÉ DU BÉRYLLIUM. ÉVOLUTION ET SPÉCIFICITÉS.....	29
<b>4. Ressources et production .....</b>	<b>31</b>
4.1. ABONDANCE DANS L'ÉCORCE TERRESTRE.....	31
4.2. MINÉRAUX ET MINÉRAIS.....	31
4.3. PRINCIPAUX TYPES DE GISEMENTS .....	32

4.3.1. Les pegmatites granitiques à béryl .....	33
4.3.2. Spor Mountain, un gisement épithermal à bertrandite.....	35
4.3.3. Le béryllium en sous-produit des complexes alcalins à Nb-Ta, TR, Zr et Y.....	38
4.3.4. Les coupoles à étain et tungstène, béryllium en sous-produit.....	38
4.4. GISEMENTS ET POTENTIEL EN FRANCE .....	38
4.5. COMMENTAIRE SUR LES RESSOURCES EN BÉRYLLIUM .....	39
4.6. PRODUCTION .....	40
<b>5. La filière industrielle.....</b>	<b>43</b>
5.1. LES PRINCIPAUX OPÉRATEURS.....	43
5.2. LES PROCÉDÉS DE TRANSFORMATION.....	44
5.2.1. Traitement minéralurgique.....	44
5.2.2. Métallurgie.....	44
5.2.3. Fabrication des composés commercialisés .....	46
5.3. LES ACTEURS FRANÇAIS.....	46
<b>6. Risques et réglementation sanitaire .....</b>	<b>49</b>
<b>7. Conclusions.....</b>	<b>53</b>
7.1. SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ.....	53
7.2. LA PERCEPTION DE LA CRITICITÉ .....	55
7.3. LES PROBLÈMES D'ÉCHELLE ET D'INFORMATION.....	55
7.4. DÉVELOPPEMENT DE LA VEILLE ÉCONOMIQUE .....	56
7.5. DÉVELOPPEMENT DE LA CONNAISSANCE DU POTENTIEL MINÉRAL FRANÇAIS ET EUROPÉEN.....	56
7.6. DÉVELOPPEMENT DES RELATIONS BILATÉRALES AVEC LES PAYS PRODUCTEURS.....	57
7.7. AMÉLIORATION DE LA CONNAISSANCE DES RISQUES SANITAIRES ET PROMOTION D'UNE RÉGLEMENTATION PROTECTRICE RAISONNÉE .....	57
<b>Bibliographie.....</b>	<b>59</b>

## Liste des Figures

Figure 1 -	Position du béryllium (Be) dans le tableau périodique des éléments. ....	17
Figure 2 -	Le miroir en béryllium du télescope spatial James Webb : schéma et assemblage.....	22
Figure 3 -	Schéma de la chambre à vide d'Iter et de son tapissage interne en béryllium.....	23
Figure 4 -	Répartition de la consommation de béryllium en 2007, par grandes régions du monde. Total : 323 tonnes de béryllium (adapté d'après BizAcumen, 2009). ....	25
Figure 5 -	Répartition de la consommation de béryllium en 2007, par types d'activité industrielle (adapté d'après BizAcumen, 2009). ....	25
Figure 6 -	Montant en millions de dollars US des importations françaises de béryllium pour les années 2000 à 2010. ....	26
Figure 7 -	Prévisions de croissance de la consommation de béryllium entre 2007 et 2015, selon BizAcumen, 2009. ....	28
Figure 8 -	Évolution de prix annuel de la tonne de béryllium métal depuis 1935, en \$US/kg .....	29
Figure 9 -	Specimens de minerai de béryllium de Spor Mountain (Utah, USA), Tuf volcanique à bertrandite, à gauche, et géode de bertrandite à fluorine, à droite (© Rockpick Legend Co.). ....	32
Figure 10 -	Carte de localisation des principaux gisements et districts à béryllium du Monde. ....	34
Figure 11 -	Vue satellite de l'exploitation à ciel ouvert de Spor mountain en Utah, USA, premier producteur mondial de béryllium (© Google Earth, image prise en 2009).....	35
Figure 12 -	Évolution de la production minière du béryllium depuis 1994. ....	41
Figure 13 -	Carte de localisation des principales mines, unités de traitement et usines de production et transformation de béryllium.....	42
Figure 14 -	Travailleurs exposés au béryllium en 2004 (INRS, 2009). ....	49
Figure 15 -	Synthèse de la criticité du béryllium. ....	54

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Les isotopes naturels du béryllium.....	18
Tableau 2 - Les principaux gisements et districts à béryllium d'Amérique, d'Eurasie d'Océanie.....	36
Tableau 3 - Les principaux gisements et districts à béryllium d'Afrique. ....	37
Tableau 4 - Production minière de béryllium, en t de Be contenu, rapportée par les « Mineral Yearbooks » de l'USGS (données incomplètes). ....	41
Tableau 5 - Exemples de niveaux d'exposition au béryllium dans certains secteurs d'activité (INRS, 2009 ; Données mesurées en 2006). ....	50
Tableau 6 - Exemples de niveaux d'exposition au béryllium dans certaines activités de la métallurgie (INRS, 2009 ; Données mesurées en 2006). ....	50
Tableau 7 - Tableau des risques sur l'approvisionnement en béryllium. ....	53

# 1. Introduction

Cette étude a été réalisée dans le cadre de l'avenant n° 1 de la Convention 2010 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer et le BRGM. Cette Convention, relative aux eaux souterraines, aux ressources minérales, au littoral et à l'organisation des connaissances sur la nature et les paysages, a été notifiée au BRGM le 20 mai 2010.

## 1.1. DÉFINITIONS

Le glossaire ci-dessous donne la définition de certains termes utilisés de manière récurrente dans ce rapport. Il importe, notamment pour permettre des comparaisons entre différentes sources nationales et internationales relatives aux matières premières minérales que ces termes soient utilisés de manière standardisée et rigoureuse. C'est malheureusement loin d'être le cas, des termes aussi importants que ressources et réserves étant utilisés de manière disparate.

- **Criticité** : cette étude vise notamment à déterminer les facteurs de criticité pouvant impacter la sécurité des approvisionnements nécessaires aux industries françaises utilisant la/les matières premières minérales étudiées. Les facteurs sont déterminés et notés selon la grille suivante :

Évaluation de la criticité	Note
Très forte	5
Forte	4
Moyenne	3
Faible	2
Très faible	1

- **Gisement** : concentration naturelle de minéraux, économiquement exploitable.
- **Indice ou prospect** : il s'agit d'une minéralisation dont l'existence est connue grâce à des observations de terrain, éventuellement étayées par quelques sondages et petits travaux miniers (tranchées, galeries de reconnaissance...) et/ou par des observations indirectes (géochimie, géophysique) mais dont l'intérêt économique n'est pas encore démontré.
- **Minéral/minéraux** : désigne une substance inorganique, d'origine naturelle, caractérisée par sa formule chimique et par l'arrangement de ses atomes selon une structure géométrique particulière.
- **Minerai** : désigne une roche contenant une concentration d'un ou plusieurs minéraux en quantité suffisante pour être économiquement exploitable.
- **Minéralisation** : désigne une concentration naturelle élevée de minéraux dont l'exploitation pourrait présenter un intérêt économique. Il s'agit d'un concept plus large que le terme minerai qui, dans les gisements, désigne la partie exploitable de la minéralisation.

- **Potentiel géologique** : il s'agit d'une première estimation, basée sur des critères et des raisonnements géologiques, de l'existence de gisements dans une région ou un pays.
- **Réserves** : il s'agit de la partie de la ressource dont l'exploitabilité technologique et économique a été démontrée lors d'une étude de faisabilité.
- **Ressource** : il s'agit d'une minéralisation dont l'enveloppe et le volume ont fait l'objet d'une première estimation, encore imprécise, à l'aide de sondages, de petits travaux miniers, de prospection en surface et/ou d'observations indirectes géochimie, géophysique.

## 1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE

Cette étude a été réalisée au cours du second semestre 2010 par le Service Ressources Minérales du BRGM appuyé par la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS), dans le cadre d'un contrat de sous-traitance pour l'identification et l'analyse de la filière industrielle française. La complexité, l'opacité de la filière, la rareté de la documentation ainsi que le temps limité disponible pour réaliser cette étude en conditionnent le contenu.

Malgré l'utilisation des meilleures sources ouvertes disponibles et le soin apporté à la rédaction de cette étude par ses experts, le BRGM n'est pas en mesure de garantir l'exactitude des informations et des données citées dans cette étude. L'industrie du béryllium est peu transparente et les données ouvertes peuvent être incomplètes et/ou sujettes à erreurs. Peu de données sont disponibles sur l'éventuelle production de béryllium de certains pays comme la Chine, la Russie et d'autres pays de la CEI.

À noter que le béryllium fait partie des 14 substances minérales considérées comme particulièrement critiques dans le cadre de l'étude sur les matières premières critiques pour l'Union Européenne publiée en juin 2010, dans le cadre de l'Initiative Matières Premières de la Commission Européenne.

## 1.3. SOURCES DES DONNÉES

Ce rapport a été produit à partir de l'importante documentation technique du BRGM, incluant notamment (voir liste bibliographique en fin de rapport) :

- les bases de données et rapports publics de l'United States Geological Survey (USGS) ;
- le document « Beryllium, a Global Market Perspective », une étude spécialisée sur le béryllium produite par Biz Acumen en novembre 2009 ;
- le document « Métallurgie du Béryllium » (Jdid & Blazy, juin 2005) publié par « Techniques de l'Ingénieur » ;
- la fiche toxicologique Béryllium et composés minéraux publiée par l'INRS en 2006 ;

- le document « Beryllium, bombs and more » (Vulcan, T, décembre 2008) publié par Hard Assets Investors, le site d'information de la société américaine de gestion de placements Van Eck and Associates ;
  - le rapport sur les matières premières stratégiques de la Commission Européenne ;
- ainsi que nombre d'informations ouvertes rassemblées ou consultées dans le cadre de cette étude.



## 2. Le béryllium

### 2.1. DONNÉES DE BASE

Le béryllium (Be) est un élément du groupe des métaux alcalino-terreux, groupe IIA du tableau périodique des éléments. Élément bivalent, c'est un métal d'aspect gris acier. Il est léger, fragile et très toxique. Les propriétés du béryllium en font un matériau de choix dans de nombreux domaines industriels. Cependant, bien qu'il soit utilisé en quantité généralement faible, c'est un métal toxique à utiliser avec précaution :

- symbole : Be ;
- numéro atomique : 4 ;
- masse atomique : 9,012182 ;
- abondance dans la croûte terrestre (clarke) : 2,8 ppm (2,8 g/t).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	Lan- thanides	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Acti- nides															
Lan- thanides :	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
Acti- nides :	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr			

Figure 1 - Position du béryllium (Be) dans le tableau périodique des éléments.

Son abondance dans l'écorce terrestre le situe à un niveau comparable mais très légèrement supérieur à celui de l'étain ou de l'uranium. Il est cinq fois moins abondant que le plomb, et deux fois plus abondant que le molybdène ou le tungstène.

Il n'existe qu'un isotope naturel stable du béryllium,  $^9\text{Be}$ . L'isotope radioactif  $^{10}\text{Be}$  se rencontre aussi dans la nature en traces infimes, formé par réaction de certains rayons cosmiques sur les éléments de l'atmosphère (azote, etc.<sup>1</sup>) (Tab. 1) :

Isotope	Abondance naturelle	Période radioactive
$^9\text{Be}$	100 %	stable
$^{10}\text{Be}$	traces	$1,51 \times 10^6$ a

Tableau 1 - Les isotopes naturels du béryllium.

D'autres isotopes comme  $^7\text{Be}$  et  $^{11}\text{Be}$ , radioactifs et très instables, ont été produits artificiellement.

## 2.2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Sous sa forme pure, le béryllium est un solide métallique gris acier :

- densité : 1,8477 ;
- point de fusion : 1 287 °C ;
- point d'ébullition : 2 469 °C.

Le béryllium possède des propriétés physiques, chimiques et nucléaires particulières qui le distinguent de nombreux autres matériaux :

- il a le point de fusion le plus élevé des métaux légers ;
- il est plus léger et six fois plus résistant que l'aluminium ;
- sa ductilité est environ 30 % plus élevée que celle de l'acier ;
- son module d'élasticité est très élevé, il a une très grande rigidité et une grande dureté ;
- il a une excellente conductivité thermique associée à un coefficient de dilatation thermique assez faible ;
- il est non magnétique ;
- son oxyde est un excellent isolant électrique ;
- il est très perméable aux rayons X. À épaisseur égale, la transparence du béryllium aux rayons X est 17 fois plus élevée que celle de l'aluminium ;
- le béryllium a une faible section efficace de capture des neutrons thermiques, et une section efficace de diffusion élevée. Ceci lui vaut son efficacité comme modérateur (ralentisseur des neutrons rapides) et comme réflecteur de neutrons lents dans les réacteurs nucléaires ;
- exposé à l'air, il se forme sur le métal une fine couche d'oxyde qui lui donne sa capacité à rayer le verre ;

<sup>1</sup> Cette réaction est nommée "spallation". Sur l'azote, la réaction est la suivante :  
*Rayon cosmique* +  $^{14}_7\text{N} \rightarrow ^{10}_4\text{Be} + ^4_2\text{He} + e^+ + \nu_e + \text{produits de spallation du rayon cosmique incident}$

- ses alliages résistent bien à la fatigue, à la corrosion et sont peu magnétisables.

Ces propriétés confèrent au béryllium un large champ d'applications notamment sous forme de divers alliages, dont le cuivre-béryllium est le plus important, utilisés dans l'électronique, l'industrie aérospatiale et nucléaire ainsi que dans le domaine de la défense.

### **2.3. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES**

Le béryllium a pour état d'oxydation +2. Il se combine facilement à l'oxygène et aux halogènes. Il n'existe pas à l'état élémentaire dans la nature, mais essentiellement sous forme de silicates et silico-aluminates plus ou moins complexes, et accessoirement d'oxydes.

Le béryllium métallique résiste bien à la corrosion dans l'atmosphère, car il se recouvre d'une couche très fine d'oxyde BeO qui le protège. Il est attaqué par les acides chlorhydriques et sulfuriques dilués, mais il est passivé par l'acide nitrique concentré.

### **2.4. TOXICITÉ**

Le béryllium est un métal non radioactif très toxique. Il est classé parmi les éléments les plus toxiques comme l'arsenic, le cadmium, le chrome, le plomb et le mercure. Le béryllium agit comme un poison cancérigène, affectant les membranes cellulaires et se liant à certaines protéines régulatrices dans les cellules. Le béryllium peut rester détectable dans l'urine jusqu'à 10 ans après l'exposition.

Il est classé cancérigène de catégorie 2 par l'Union Européenne et est donc, en France, soumis au décret CMR 2001-97 du 1<sup>er</sup> février 2001 (qui vaut pour toute exposition au béryllium). Du fait de sa toxicité, surtout sous forme de poudre et la réglementation stricte à laquelle il est soumis par l'Union européenne (Directive REACH, 2006), il n'est utilisé que lorsqu'il est essentiel et que les substituts ne garantissent pas les mêmes caractéristiques.

L'inhalation de « grandes » concentrations de béryllium (plus de 1 mg/m<sup>3</sup> d'air), ou une inhalation prolongée (plus d'une dizaine d'années) même de très faibles doses, peut engendrer une maladie nommée maladie chronique du béryllium ou béryllose. Cette maladie affecte les poumons ; elle présente de nombreux points communs avec la pneumonie et peut évoluer vers une insuffisance cardiorespiratoire grave.

### **2.5. HISTORIQUE DE LA DÉCOUVERTE ET INTÉRÊT DU BÉRYLLIUM**

L'oxyde de béryllium a été identifié en 1798 par le chimiste français Louis Nicolas Vauquelin, comme constituant du béryl et de l'émeraude. C'est en 1828 que Friedrich Wöhler (Allemagne) et Antoine Bussy (France) isolèrent le métal. Vauquelin conféra le nom de glucinium au nouvel élément identifié, en référence au goût douceâtre de certains de ses composés. Le nom de béryllium fut officiellement donné à cet élément en 1957.

Ce n'est qu'en 1916 que le premier lingot de béryllium fut élaboré aux États-Unis, où vers 1920, la Brush Laboratories Co commença la production de ce métal.

L'addition de béryllium au cuivre forme un alliage doté d'excellentes propriétés mécaniques. Cet alliage constitua le premier emploi industriel du béryllium et le reste encore de nos jours.

Ce métal a véritablement commencé à prendre une importance stratégique à partir de 1965 pour deux raisons essentielles :

- dans le domaine spatial, l'oxyde de béryllium s'est révélé être un réfractaire indispensable pour les « boucliers » de rentrée dans l'atmosphère des missiles américains ; le béryllium métal est aussi utilisé pour les tuyères des moteurs de satellites et des navettes spatiales, auxquelles il donne une grande stabilité mécanique dans une très vaste plage de températures ;
- dans le domaine nucléaire, on s'aperçut à peu près à la même époque que le béryllium était un métal idéal pour le gainage des barreaux de combustibles nucléaires et la production des réflecteurs à neutrons utilisés dans la production d'ogives nucléaires. Il a joué un rôle important dans la production des premières bombes atomiques, et est toujours utilisé à ce jour.

Le gouvernement américain consacra alors d'importants crédits pour exploiter un gisement particulièrement riche dans l'Utah, SporMountain, et mettre en place une importante filière technologique de béryllium.

En France, des initiatives furent également prises et le gouvernement amena le Groupe Pechiney à s'engager dans la difficile métallurgie du béryllium, allant jusqu'à créer une filière pratiquement complète.

À la fin des années 1970, l'évolution dans la construction des boucliers thermiques, la réduction des armes nucléaires, la supériorité reconnue du zirconium sur le béryllium comme matériau de gainage des combustibles nucléaires provoquèrent une chute de la consommation. De plus, la forte toxicité du béryllium et de ses dérivés imposa aux industriels de nombreuses contraintes pour la protection du personnel et de l'environnement. Ces raisons ont conduit Pechiney à cesser son activité béryllium en 1976.

Le béryllium n'en demeure pas moins un matériau « stratégique ». Aujourd'hui, il est essentiellement utilisé sous forme d'alliage cuivre-béryllium (ou cupro-béryllium), apportant au cuivre un accroissement des qualités de résistance, de conductibilité thermique et électrique, et qui trouve de nombreuses applications en électronique, mécanique de précision, télécommunications, ordinateurs.

L'oxyde de béryllium sert à faire des céramiques isolantes électriques mais bonnes conductrices thermiques, matériau irremplaçable pour l'électronique. Les autres applications incluent l'aérospatiale, l'aéronautique, le matériel de guidage, l'industrie nucléaire civile et militaire.

### 3. Usage, consommation, prix et marché du béryllium

Du fait de ses propriétés, le béryllium trouve de nombreux domaines d'utilisation. Environ 75 % du béryllium est utilisé sous forme d'alliage, le plus répandu étant le cuivre-béryllium ; 15 % sous forme d'oxyde pour la production de céramiques et 10 % sous forme élémentaire.

#### 3.1. PRINCIPAUX DOMAINES D'UTILISATION DU BÉRYLLIUM

##### 3.1.1. Les alliages au béryllium

Le béryllium est majoritairement utilisé sous forme d'une vaste gamme d'alliages spéciaux : cuivre-béryllium (également appelé bronze au béryllium), cuivre-béryllium-cobalt, cuivre-béryllium-nickel, aluminium-béryllium offrant des propriétés remarquables de légèreté, de stabilité mécanique, de résistance à l'usure par frottement et à la corrosion et de conductivité électrique.

Les **alliages Cu-Be** sont les plus courants. Ils contiennent entre 0,15 et 2,6 % de béryllium. Leurs rapports densité/rigidité et densité/module d'élasticité en font des matériaux de choix dans de très nombreuses applications dans les domaines de haute technologie. C'est dans les connecteurs électroniques et les circuits intégrés qu'ils trouvent leurs plus larges applications. Ils sont utilisés pour la fabrication d'appareils de réglage et de contrôle ; en mécanique de précision ; pour la fabrication de ressorts d'appareils électriques et informatiques (exemple : claviers d'ordinateurs), de balanciers et de remontoirs en horlogerie ; pour la fabrication d'articles de sport (clubs de golf, cadres de vélos) ; ainsi que d'outils anti-déflagrants employés dans l'industrie pétrochimique. Ces alliages améliorent la coulée des plastiques dans l'industrie des moules et des modèles. Le Cu-Be offre des propriétés anti-grippantes aux bagues de frottement utilisées dans l'aéronautique ou encore dans l'industrie du forage pétrolier.

Les **alliages Al-Be**, comme l'AlBe Met® de Brush Wellman, sont utilisés dans les structures d'avions (plus de 340 pièces de l'avion de chasse F22 seraient en alliage Al-Be) et dans l'industrie spatiale. Ils sont également utilisés dans les étriers de freins pour le sport automobile et comme pièce d'équipement de précision.

L'**alliage Ni-Be**, doté d'une bonne conductivité thermique, permet de réaliser des contacteurs thermo-sensibles, comme les détecteurs de déclenchement des airbags.

Les **alliages Ni-Cr** ou **Ni-Co** contenant du béryllium remplacent les alliages à base d'or et d'argent dans les prothèses dentaires.

Le béryllium, ajouté aux alliages contenant des métaux oxydables, est utilisé pour la bijouterie et la lunetterie.

### 3.1.2. Céramiques au béryllium

L'oxyde de béryllium a comme propriété remarquable d'être à la fois un excellent isolant électrique et d'avoir un pouvoir de dissipation thermique qui, dans le domaine des matériaux non-métalliques, n'est dépassé que par celui du diamant. Ce pouvoir de dissipation est même supérieur à celui de certains métaux. Cette combinaison de propriétés sert à la production de céramiques utilisées pour la fabrication de moteurs de fusées, de modérateurs neutroniques dans les centrales nucléaires, de semi-conducteurs (couche de dissipation de la chaleur dégagée par le circuit monté par-dessus).

Les céramiques à l'oxyde de béryllium sont utilisées comme isolants électriques et électroniques ; comme substrats pour les puces, transistors et diodes de puissance. On les utilise dans les circuits électroniques de radar, dans les lasers, dans les radômes de fusée et les absorbeurs de micro-ondes. Ils sont utilisés dans les appareils générant des micro-ondes et comme composants de lasers. Ils entrent dans les composants de blindage des véhicules militaires et des gyroscopes.

Les propriétés réfractaires de l'oxyde de béryllium sont encore utilisées dans la fabrication de creusets et d'enveloppes de thermocouples.

### 3.1.3. Béryllium métal

La rigidité et la dureté du béryllium sont à l'origine de l'utilisation du béryllium en aérospace qui recherche des structures légères restant rigides sous des charges élevées. On le trouve en constituant des structures des étages supérieurs des fusées et pour la fabrication des miroirs placés dans les satellites. Le béryllium peut en effet se polir à un niveau élevé de réflectance.



Figure 2 - Le miroir en béryllium du télescope spatial James Webb : schéma et assemblage  
(Sources : NASA, [www.jwst.nasa.gov](http://www.jwst.nasa.gov) et [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov))

En particulier le miroir géant du nouveau télescope spatial James Webb qui devrait remplacer Hubble en 2014 est fabriqué en panneaux de béryllium (cf. fig. 2). Le béryllium a été retenu parce que c'est un métal résistant, léger et d'une bonne tenue mécanique aux températures très froides auxquelles il sera confronté. La couche de

béryllium est épaisse de 1 mm ce qui permet de limiter la masse totale du miroir primaire à 625 kg contre 1 tonne pour le miroir en verre de Hubble.

Les systèmes de guidage et les gyroscopes sont souvent fabriqués en béryllium pur, du fait de la stabilité mécanique requise pour ce type d'équipement de très haute précision.

Dans l'industrie nucléaire civile et militaire, le béryllium métal est utilisé comme réflecteur des neutrons thermiques et modérateur des neutrons rapides dans les réactions nucléaires. Dans le nucléaire civil (centrales), le béryllium a été utilisé pour le gainage du combustible dans certains réacteurs. Les gainages actuels sont en zirconium, mais les informations précises sur les quantités exactes utilisées, dans quels réacteurs, sur l'existence d'usages résiduels de béryllium dans les réacteurs modernes à zirconium, n'ont pas été relevées dans la documentation publique accessible, et il faudrait pouvoir se les faire communiquer par les constructeurs de centrales si l'on voulait pouvoir juger de manière pertinente de la criticité actuelle du béryllium pour le secteur.

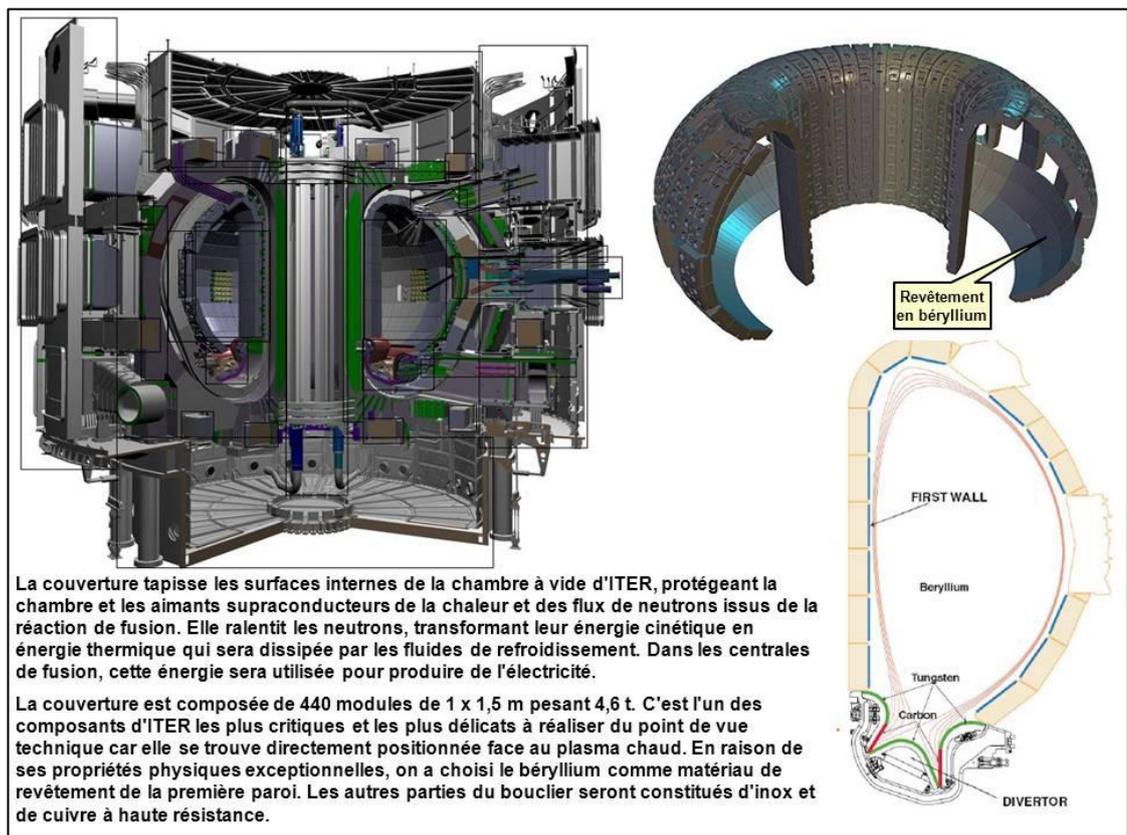


Figure 3 - Schéma de la chambre à vide d'ITER et de son tapissage interne en béryllium (© [www.iter.org](http://www.iter.org)).

Le béryllium métal sera utilisé pour le revêtement des tuiles qui constitueront la première paroi interne du réacteur ITER, en contact direct avec le plasma (cf. fig. 3). La

paroi, ou « couverture » aura une masse totale de  $440 \times 4,6 = 2\,024$  tonnes. Mais ni l'épaisseur du revêtement en béryllium sur cette couverture, ni la masse totale de béryllium nécessaire n'ont été publiées. Pour se fixer ordre de grandeur, on peut supposer que la masse de béryllium pur nécessaire sera comprise entre quelques tonnes et quelques dizaines de tonnes.

En instrumentation scientifique et technique, son emploi dans les fenêtres protégeant les sources d'émission des rayons X, auxquels il est transparent, pour les équipements de recherche ou de radiographie et autres imageries médicales (appareils de mammographie) est en forte croissance. Des outils de maintenance et pièces en béryllium métal sont utilisés pour les équipements d'imagerie par résonance magnétique, dont les champs magnétiques très intenses nécessitent l'utilisation de matériaux amagnétiques.

Il est également présent dans les cônes de haut-parleurs de certains systèmes de très haute-fidélité.

Le caractère amagnétique du béryllium permet la fabrication d'outils utilisés par les forces navales pour désamorcer les mines magnétiques sous-marines.

### **3.2. CONSOMMATION MONDIALE DE BÉRYLLIUM**

Ce paragraphe est principalement étayé par l'étude de BizAcumen (2009), l'une des rares entreprises d'intelligence économique s'étant intéressée au « petit marché » du béryllium.

En 2007, d'après BizAcumen (2009), la consommation mondiale de béryllium aurait atteint environ 323 t. Elle se répartit de la manière suivante (cf. fig. 4 et 5) :

- 166 t pour les télécommunications et l'informatique ; l'Europe représentant 35 %, loin devant l'Asie (15 %) et les États-Unis (25 %) ;
- 43 t pour l'électronique embarquée dans les véhicules automobiles, avec la répartition suivante : Europe (35 %), Asie (16 %) et États-Unis (23 %) ;
- 53 t pour les industries aérospatiales et de la défense. Ce segment intègre le domaine « industrie nucléaire ». L'Europe représentant 40 % de cette consommation, contre 11 % pour l'Asie et 30 % pour les États-Unis ;
- 37 t dans les composants industriels ; il s'agit d'un regroupement des domaines « fabrication de moules pour l'industrie des matières plastiques », « industrie pétrolière » ainsi que les bagues et roulements pour trains d'atterrissage dans l'industrie aérospatiale. L'Europe représentant 31 % de cette consommation, contre 20 % pour l'Asie et 20 % pour les États-Unis ;
- 24 t pour la rubrique « autres applications » ; il s'agirait notamment des applications dans le domaine de l'industrie médicale, le détail du contenu de ce segment « fourre-tout » n'étant pas défini. L'Europe représentant 37 % de cette consommation, contre 14 % pour l'Asie et 33 % pour les États-Unis.

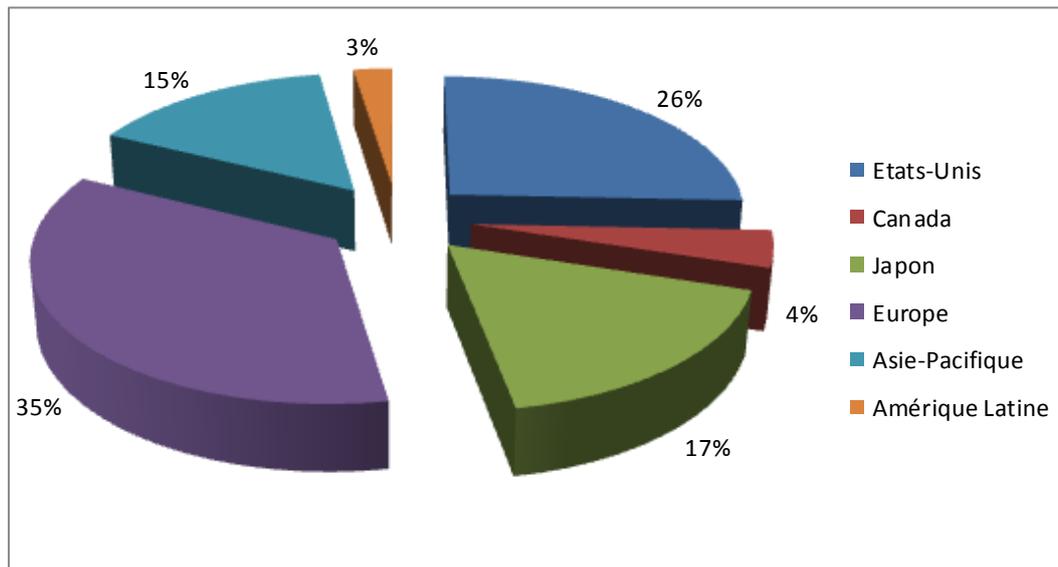


Figure 4 - Répartition de la consommation de béryllium en 2007, par grandes régions du monde. Total : 323 tonnes de béryllium (adapté d'après BizAcumen, 2009).

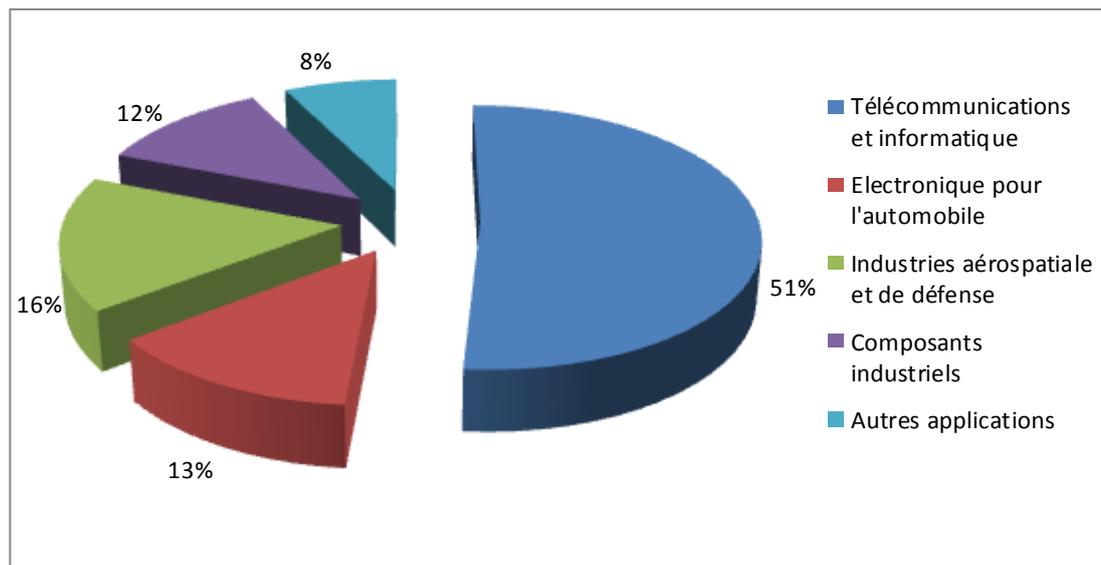


Figure 5 - Répartition de la consommation de béryllium en 2007, par types d'activité industrielle (adapté d'après BizAcumen, 2009).

Ce tonnage est très supérieur à celui de la production minière estimée par l'USGS à 180 t. Cette différence peut être liée à l'incidence de deux facteurs, sans qu'il soit possible de distinguer leur poids respectif :

- le rôle des stocks de minerais de béryllium et/ou de métal et/ou de produits dérivés, notamment du stock du ministère de la défense américain (« Defense Logistics Agency ») et du stock de l'usine d'Ulba au Kazakhstan, le plus important centre de production de béryllium de la CEI. Au 30/09/2009, le stock américain était de 146 t de béryllium métal ;

- l'imprécision et les lacunes dans les statistiques de production et de commerce international du béryllium, pouvant elles-mêmes être liées à des erreurs ou omissions dans les statistiques douanières et/ou au fait que le béryllium contenu dans des biens semi-finis ou finis, des alliages, des déchets n'est pas inclus dans les statistiques du commerce international du béryllium.

### 3.3. CONSOMMATION FRANÇAISE DE BÉRYLLIUM

Selon la Direction Générale des Douanes et Droits Indirects (<http://lekiosque.finances.gouv.fr/>), les importations françaises de béryllium et de produits dérivés (codes 811 212, 811 213 et 811 219) étaient évaluées à 2,02 millions d'euros en 2010 soit approximativement 2,68 millions de dollars US (fig. 6).

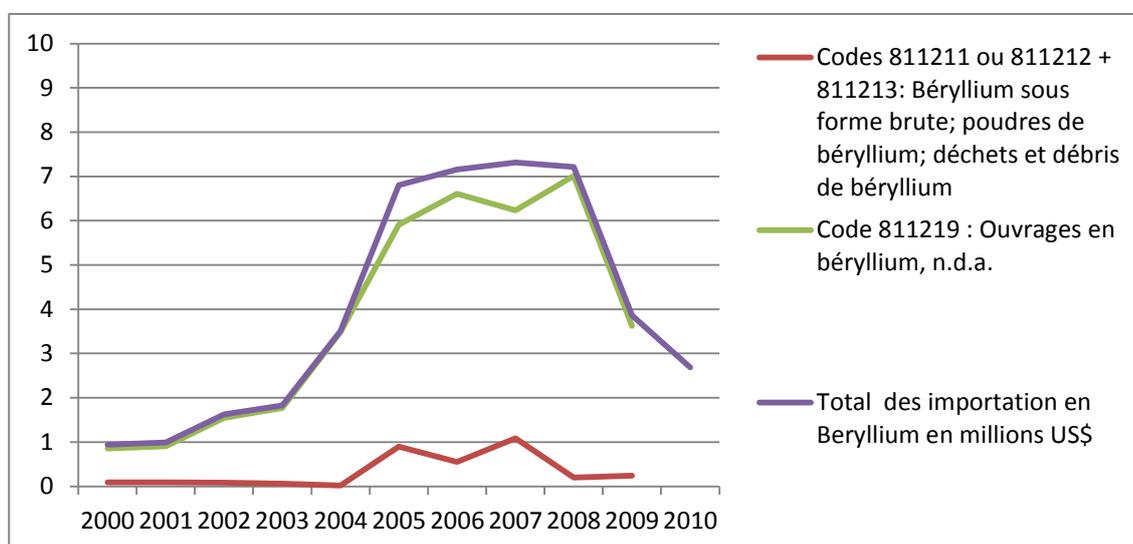


Figure 6 - Montant en millions de dollars US des importations françaises de béryllium pour les années 2000 à 2010.

(Sources : Comtrade - <http://comtrade.un.org/> - pour 2000 à 2009 et Direction Générale des Douanes et Droits Indirects pour 2010)

La France est le second importateur de béryllium de l'Union Européenne après l'Allemagne, sa matière première provenant essentiellement des États-Unis.

Les parts importantes de la télécommunication, de l'informatique et de l'électronique automobile dans la consommation française de béryllium, plus de 65 % en 2007 (Biz Acumen, 2009) peut expliquer que la consommation française de béryllium semble suivre les tendances de ces marchés depuis 2000.

Biz Acumen (2009) évalue la consommation française de béryllium (métal et contenu dans les alliages et oxydes) à **24,8 t en 2007**, et l'anticipait à **28,5 t pour 2010**. Le principal marché du béryllium en France en 2008 aurait été celui des équipements pour télécommunications et l'informatique, représentant à lui seul 53,3 % de la consommation française de béryllium. Le second segment d'utilisation du béryllium en

France est celui de l'aérospatial et de la défense, qui en 2008 n'aurait représenté que 16,6 % de la consommation française totale.

Le béryllium pourrait être amené à avoir une grande utilité dans le cadre de la fusion nucléaire. La face interne des tuiles constituant la première paroi du tore d'ITER sera en béryllium ultra-pur. Si la fusion nucléaire contrôlée est couronnée de succès, les besoins en béryllium pourraient être amenés à progresser fortement.

### **3.4. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DES USAGES DANS LES PROCHAINES ANNÉES (HORIZON 2015)**

La demande devrait continuer de croître assez fortement, tirée par les nombreux domaines d'application du béryllium et de ses alliages. Biz Acumen (2009) prévoit une croissance mondiale moyenne de la consommation de béryllium de près de 5 % par an pour la période allant de 2007 à 2015. Pendant cette période, la consommation mondiale de béryllium passerait de 323 t par an à 475 t par an.

Pour cette période, Biz Acumen anticipait (mais sur des bases que le BRGM considère comme fragiles) une croissance de la consommation moyenne dans la région Asie-Pacifique, hors Japon, de 7,7 %/an, supérieure à la croissance moyenne mondiale, et une croissance en Europe de 5,3 %/an, proche de la moyenne mondiale. En cumulé sur la période 2007 à 2015, cela représenterait une croissance mondiale de la consommation de 47 %, dont 82 % pour la zone Asie-Pacifique et 51 % pour l'Europe.

En Europe, la croissance serait essentiellement tirée par les secteurs de l'automobile ainsi que par les industries aérospatiales et de la défense, et en Asie-Pacifique davantage par les secteurs électroniques (télécommunications et l'informatique) (cf. fig. 7), en reflet du dynamisme des équipementiers notamment chinois. Cette anticipation de 2007 serait probablement à ajuster avec la formidable croissance de la construction automobile chinoise qui sera aussi consommatrice de contacteurs en cuivre-béryllium.

Deux facteurs pourraient chacun affecter séparément le développement de l'utilisation du béryllium :

- le coût très élevé du béryllium et de ses produits dérivés, qui en restreignent l'usage à des applications pour lesquelles leurs propriétés spécifiques les rendent irremplaçables ;
- le développement des législations relatives à la sécurité des salariés travaillant dans les industries mettant en œuvre du béryllium ou ses alliages, ainsi qu'à la protection de l'environnement.

Le second facteur paraît le plus préoccupant, le coût du béryllium ou de l'alliage mis en œuvre dans les diverses applications ne représentant qu'une part très faible du prix de revient des applications.

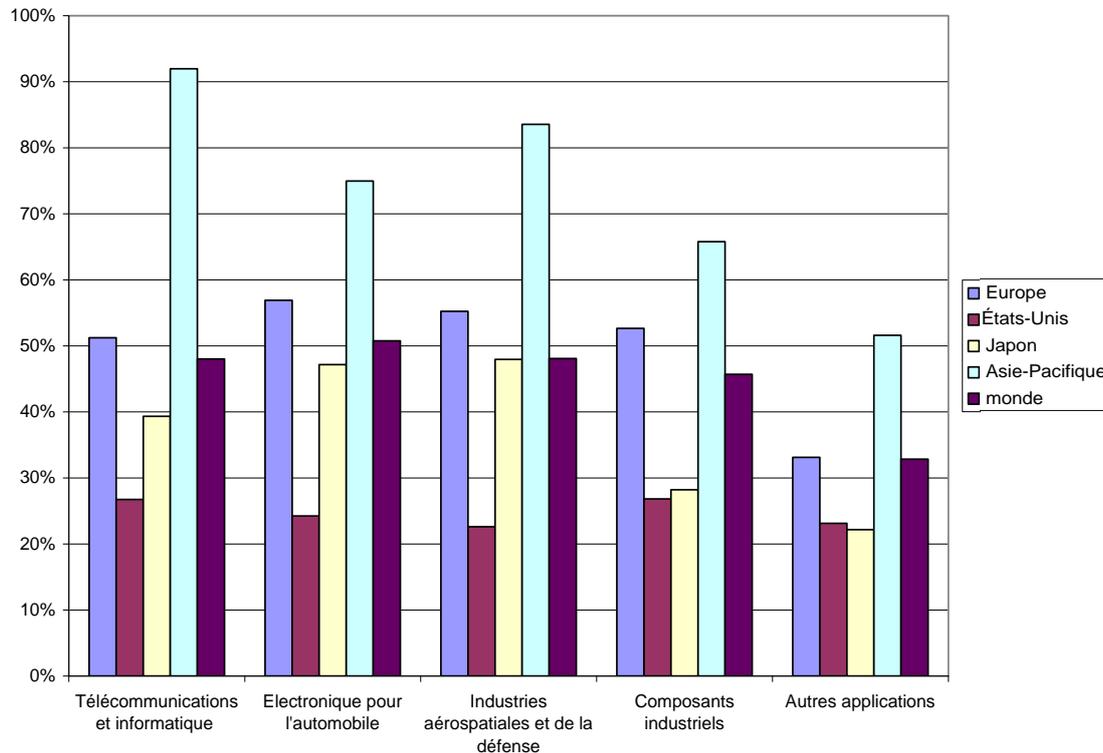


Figure 7 - Prévisions de croissance de la consommation de béryllium entre 2007 et 2015, selon BizAcumen, 2009.

Les propriétés remarquables du béryllium le rendent irremplaçable dans le domaine de l'industrie nucléaire civile. Son utilisation à long terme pourrait se développer en même temps que la technologie de fusion contrôlée. Il en va de même dans le domaine de la défense, notamment de l'aéronautique militaire où les performances des alliages à base de béryllium sont très appréciées.

Différents composites et alliages peuvent remplacer l'utilisation d'alliages au béryllium, mais souvent avec une perte de performances.

À part le projet ITER, il n'a pas été identifié de technologies innovantes qui pourraient entraîner une flambée brutale de la demande en béryllium.

### 3.5. RECYCLAGE ET SUBSTITUTION

L'étude sur les matières premières minérales critiques pour l'Union Européenne publiée en juin 2010 par la Commission Européenne indique dans la fiche « béryllium » de son annexe V (European Commission, 2010) que 19 % de la consommation mondiale du béryllium provient du recyclage de déchets secondaires (issus de produits en fin de vie, par opposition aux déchets primaires issus de l'usinage des alliages ou du métal). Environ 50 % des matériaux à base de béryllium sont recyclés, le recyclage permettant de récupérer 90 % du béryllium contenu, qui est réutilisé pour la production d'alliages.

Ces chiffres diffèrent de ceux publiés par l'USGS pour 2007, qui indique qu'aux États-Unis, premier producteur mondial de béryllium métal et d'alliages à base béryllium, seulement 10 % du béryllium est recyclé à partir de déchets primaires. La toxicité du béryllium pousse à retraiter les déchets qui en contiennent, mais à l'inverse cette toxicité nécessite une bonne maîtrise de la filière du recyclage.

Le béryllium, à cause de son coût élevé et des difficultés de sa mise en œuvre, n'est utilisé que pour des applications très spécifiques dans lesquelles il est difficile à substituer. Différents composites et alliages peuvent remplacer l'utilisation d'alliages au béryllium, mais souvent avec une perte de performances.

### 3.6. PRIX ET MARCHÉ DU BÉRYLLIUM. ÉVOLUTION ET SPÉCIFICITÉS

Il n'y a pas de référence pour le prix du béryllium. Les transactions se font directement entre les rares entreprises productrices de métal et/ou d'alliages et leurs clients. La valeur du béryllium dans le cadre de ces transactions est inconnue. Aucun media traditionnel des matières premières (Metal Bulletin ; Metal pages, Mining Journal) ne donne le prix du béryllium. Seul l'USGS publie un prix annuel moyen, sur la base d'un produit de haute pureté et très probablement sur la base de transactions « spot ». La figure 8 illustre l'évolution des prix moyens annuels du béryllium depuis 1935 publiés par l'USGS.

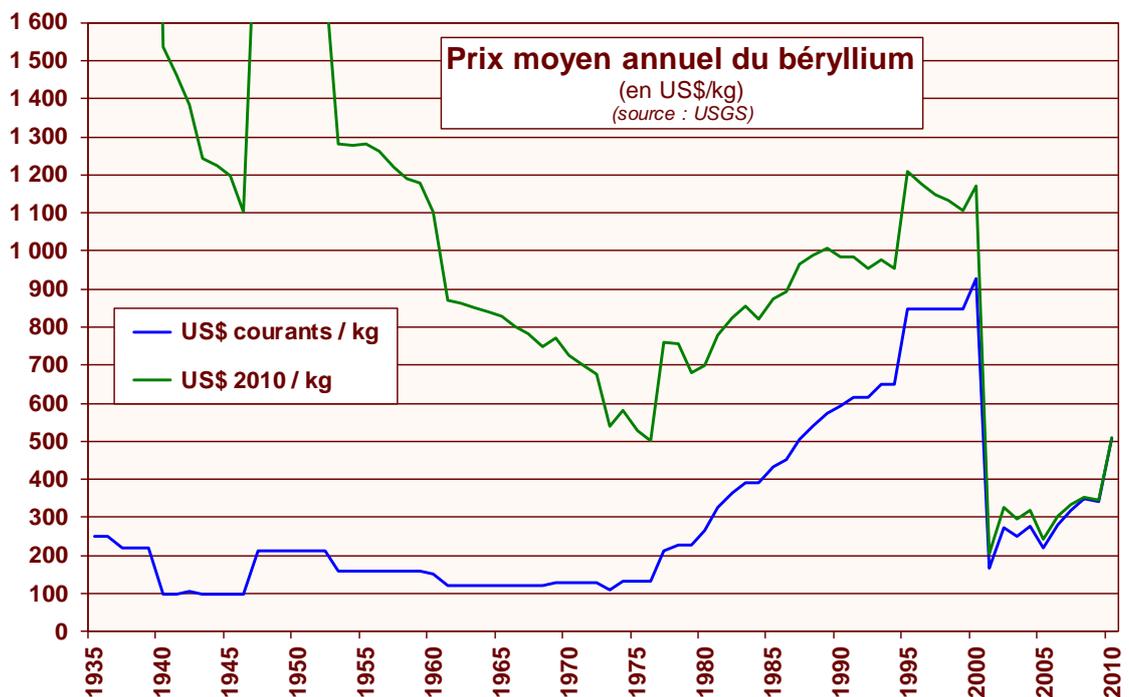


Figure 8 - Évolution de prix annuel de la tonne de béryllium métal depuis 1935, en \$US/kg (source : USGS).

La baisse régulière du prix observée de 1950 à 1976 peut s'expliquer par l'évolution des procédés de production du béryllium et une relative baisse de la consommation.

De plus, la mise en exploitation de la mine de SporMountain (Utah, USA) en 1969 a permis l'accès à un minerai abondant et bon marché à exploiter.

De 1977 à 2000, le prix a augmenté en raison d'une augmentation de la consommation, entre autres à partir de 1988 de la constitution de stocks stratégiques de béryllium aux États-Unis. S'y est peut-être ajouté un impact des régulations et aux normes de sécurité relatives à la métallurgie du béryllium et de ses alliages.

Le prix a ensuite subitement et fortement chuté entre 2000 et 2001 (passant de 878 à 152 US\$/kg), en liaison avec la réduction et le démantèlement partiel des arsenaux nucléaires, et d'un déstockage du stock stratégique de la Défense américaine. Cette période correspond aussi à l'arrivée sur le marché du béryllium en provenance des mines du Kazakhstan. Depuis, le prix est remonté à 507 US\$/kg en 2010.

## 4. Ressources et production

### 4.1. ABONDANCE DANS L'ÉCORCE TERRESTRE

Le béryllium se situe, par ordre d'abondance décroissante, au 48<sup>ème</sup> rang sur 83 éléments significativement présents dans l'écorce terrestre<sup>2</sup>.

Son abondance moyenne dans la croûte terrestre (« clarke ») est estimée à 2,8 ppm (2,8 g/t)<sup>3</sup>, soit légèrement plus que l'étain (2,3 ppm) ou l'uranium (2,7 ppb), et plus de 2 fois plus que le molybdène (1,2 ppm) et le tungstène (1,25 ppm)<sup>4</sup>.

L'eau de mer contient de l'ordre de 5,6 ng ( $5,6 \times 10^{-9}$  g) de béryllium par litre<sup>5</sup>.

Le béryllium est un élément lithophile. Il ne s'accumule pas dans les magmas ultrabasiques et basiques, mais dans les magmas granitiques et alcalins, et tout particulièrement dans les produits terminaux de la différenciation magmatique. On le trouve en particulier dans les pegmatites de granites et de syénites néphéliniques.

Lors de l'altération supergène des roches, le béryllium tend plutôt à suivre le cycle de l'aluminium dont il est assez voisin chimiquement et se concentre dans les argiles et certaines bauxites.

### 4.2. MINÉRAUX ET MINÉRAIS

Le béryllium est le constituant essentiel de près de 40 minéraux et, en très faible quantité, il entre dans la composition de plus de 50 autres, notamment les plagioclases, micas et minéraux argileux. Mais il n'existe que deux formes minérales d'importance industrielle et commerciale :

- Le **béryl** ( $3\text{BeO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $6\text{SiO}_2$  ou  $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ) qui contient, selon sa pureté, entre 11 et 14 % de BeO (4-5 % Be). Le béryl fait partie du groupe des silicates accessoires des roches acides et des pegmatites. Il cristallise dans le système hexagonal et se présente en prismes de dimensions très variables de couleur vert vif, bleu soutenu, bleu ciel, jaune, rose rougeâtre ou blanc grisâtre, pierreux. Il peut être transparent, translucide ou opaque. Ce minéral a d'abord été recherché, et l'est toujours, comme pierre précieuse dans sa variété transparente (« gemme ») colorée en vert

<sup>2</sup> Les éléments naturels portent les numéros atomiques de 1 à 92, mais les n° 43 (technétium) et 61 (prométhium) n'existent pas naturellement, et 7 éléments lourds, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac et Pa sont fortement radioactifs et n'existent qu'à l'état d'infra-traces à courte durée de vie, produits par la décroissance radioactive naturelle de l'Uranium et du Thorium.

<sup>3</sup> Source : CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2005. En fait, selon les auteurs, on trouve des valeurs allant de 1,5 à 3 ppm.

<sup>4</sup> Source : CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2005.

<sup>5</sup> Source : CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2005.

(émeraude), et comme pierre semi-précieuse dans ses variétés gemme bleu-vert (aigue-marine), rose (morganite) et jaune (héliodore).

- La **bertrandite** ( $\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2$ ) qui contient 42 % de  $\text{BeO}$ , soit 15 %  $\text{Be}$ . La bertrandite, caractéristique du gisement de Spor Mountain (USA) (figure 8), est devenue à partir des années 1970 la principale source minière de béryllium. Ce silicate cristallise dans le système orthorhombique et se présente en masse granulaire incolore à blanchâtre, plus rarement en petits cristaux tabulaires à éclat nacré.

Les principaux autres minéraux de  $\text{Be}$  sont la phénacite ou phénakite ( $\text{Be}_2\text{SiO}_2$ ), la barylite ( $\text{Be}_2\text{BaSi}_2\text{O}_7$ ), le chrysobéryl ou cymophane ( $\text{BeAl}_2\text{O}_4$ ), l'helvite ( $\text{Mn,Fe,Zn}_4\text{Be}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{S}$ , (minéral voisin des feldspathoïdes) et l'herdélite, un phosphate de béryllium ( $\text{CaBe}(\text{F,OH})\text{PO}_4$ ). Ce sont des minéraux rares des pegmatites et de certaines roches métamorphiques, et, à notre connaissance, aucun ne constitue une source industrielle de  $\text{Be}$ . Notons cependant, qu'à l'image de la bertrandite qui était inconnue au début des années 1960, certains de ces minéraux pourraient devenir une source économique de  $\text{Be}$  s'ils se trouvaient en quantité et concentration suffisante pour constituer un gisement.



Figure 9 - Specimens de minéral de béryllium de Spor Mountain (Utah, USA), Tuf volcanique à bertrandite, à gauche, et géode de bertrandite à fluorine, à droite (© Rockpick Legend Co.).

#### 4.3. PRINCIPAUX TYPES DE GISEMENTS

Jébrak et Marcoux (2008) distinguent deux principaux types de gisements :

- les pegmatites granitiques ;
- Spor Mountain, gisement associé à des roches volcaniques, qui recèle actuellement l'essentiel des besoins en béryllium du monde occidental.

Le béryllium peut être également un sous-produit des gisements liés aux complexes intrusifs alcalins, à Nb-Ta, Terres Rares, Zr et Y ; ainsi qu'à certains grises et sarins à Sn et/ou W (Soja et Sabin, 1986).

Comme le germanium, le béryllium peut être concentré dans certains charbons à des teneurs de 100 à 1 000 ppm. Les cendres des charbons du Bassin de Haute Silésie (Pologne) sont supposées contenir une ressource de 97 000 t de Be (Burkowicz *et al.*, 2009). Du fait de son affiliation chimique avec l'aluminium, on peut également rencontrer le béryllium dans certaines bauxites (Routhier, 1963).

#### 4.3.1. Les pegmatites granitiques à béryl

Le béryl est un minéral fréquent des pegmatites. Les pegmatites sont des roches magmatiques silicatées à gros grains ; elles correspondent aux produits de fin de cristallisation des magmas enrichis en éléments volatils : H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, F, Cl, B. Les plus fréquentes se rencontrent en association avec le magmatisme felsique et sont couramment dénommées pegmatites granitiques. Elles se disposent de manière concentrique autour des intrusions granitiques, dans l'encaissant métamorphique. Une pegmatite est composée principalement de quartz, feldspaths et micas, avec de nombreux minéraux accessoires, à forte valeur économique, sources de Li, Cs, Nb, Ta, Sn, Mo, U, et Be. Par rapport à l'intrusion, il existe une zonalité périgranitique et les pegmatites riches en béryl sont en général situées dans la zone de contact entre le granite et son encaissant métamorphique.

De manière générale, les gisements sont associés aux pegmatites de profondeur moyenne (3,5 à 7 km) et aux pegmatites miarolitiques ou coupoles sub-volcaniques de faible profondeur.

Les pegmatites forment généralement des corps de petites dimensions (moins d'une centaine de mètres), leur morphologie est souvent complexe, en pipe, amas ou lentilles.

Les corps sont souvent zonés avec :

- une zone de bordure à grain fin, avec quartz, feldspath et micas ;
- une zone à grain moyen, de même composition minéralogique ;
- une zone intermédiaire à minéraux économiques de Li (spodumène, amblygonite) ;
- un cœur quartzeux, généralement le plus riche en béryl (Be), cassitérite (Sn) et wolframite (W).

Le Mozambique et la Chine sont aujourd'hui les principaux producteurs de béryl pegmatitique. Ils devancent le Brésil, avec les pegmatites des états du Minas Gerais, du Rio Grande do Norte et de Bahia ; la Zambie ; le Portugal et Madagascar. Les pegmatites de Keketuohai, ou Koktokay, (Fuyun, Xinjiang) sont sans doute une source importante de béryllium pour la Chine.

Principaux gisements et districts à béryllium

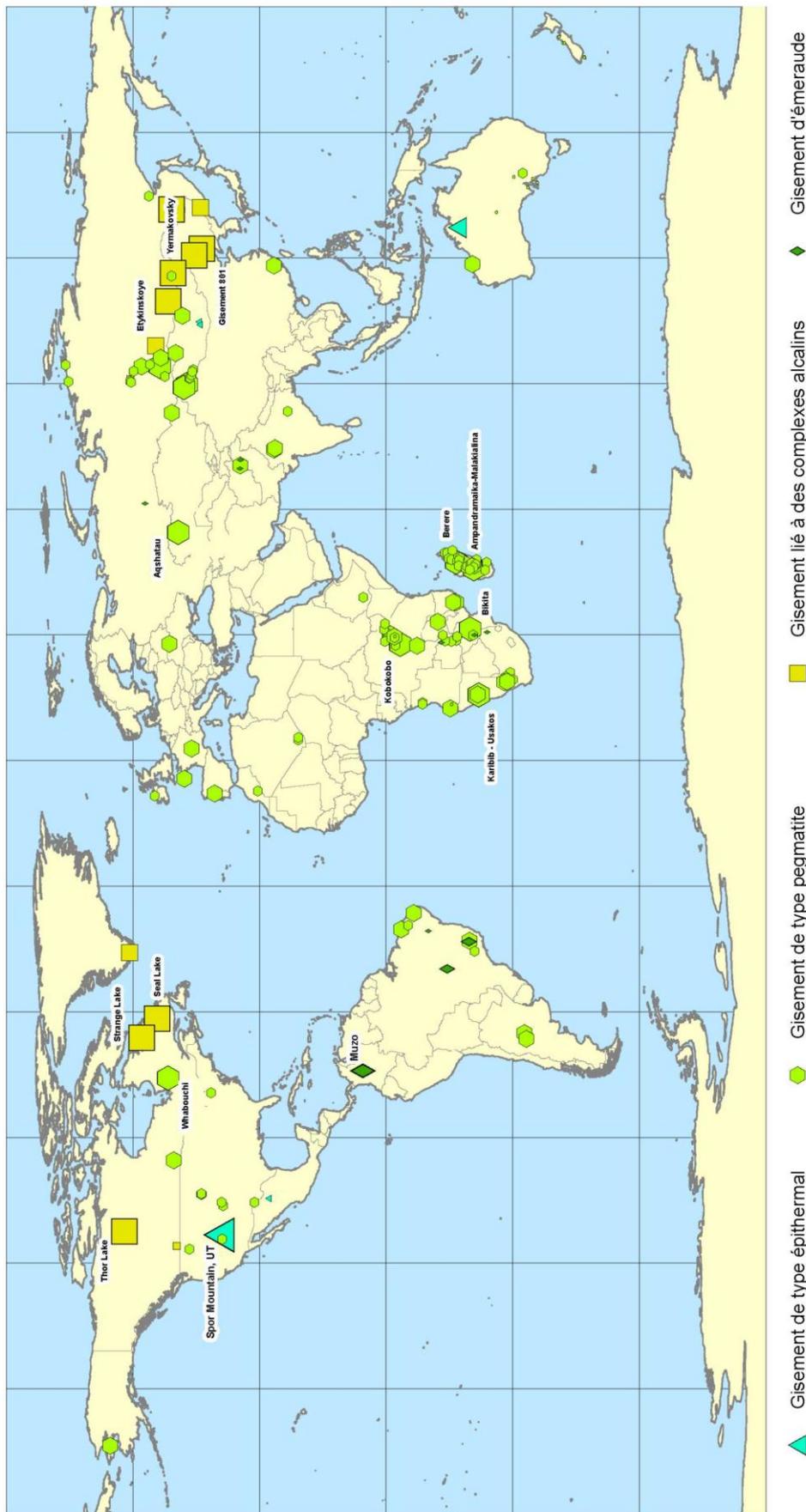


Figure 10 - Carte de localisation des principaux gisements et districts à béryllium du Monde.

Les gîtes sont représentés par des figurés dont la taille traduit l'importance économique des concentrations et la forme est spécifique au modèle géologique.

### 4.3.2. SporMountain, un gisement épithermal à bertrandite

85 % de la production minière mondiale de béryllium provient du célèbre gisement de SporMountain (Utah, USA). SporMountain a d'abord été exploité pour la fluorine et ce n'est qu'en 1959 que l'on a mis en évidence son contenu en béryllium, sous la forme de bertrandite. Le gisement est grossièrement stratiforme, la bertrandite imprègne un ensemble de tufs et brèches ignimbrtiques du Miocène inférieur qui repose en discordance sur des carbonates du Paléozoïque. Le gisement est situé en bordure d'une caldeira rhyolithique. Il est d'origine métasomatique, les clastes carbonatés des tufs ayant été altérés et remplacés par un assemblage à fluorine-bertrandite, sous l'action de fluides hydrothermaux à fluor et béryllium.

SporMountain est l'unique représentant connu de ce type, qualifié de gisement épithermal, d'origine volcanique, à béryllium (Lindsey, 1977 ; Foley, 2010). La faible teneur (0,69 % BeO) est compensée par un tonnage élevé de minerai (5,3 Mt) et la possibilité d'exploiter en mine à ciel ouvert, sans utilisation d'explosifs en raison de la friabilité du minerai et de son encaissant (Soja et Sabin, 1986). Il est exploité au rythme d'environ 48 000 t de minerai par an.

Ses réserves prouvées sont actuellement de 15 900 t de béryllium contenu.

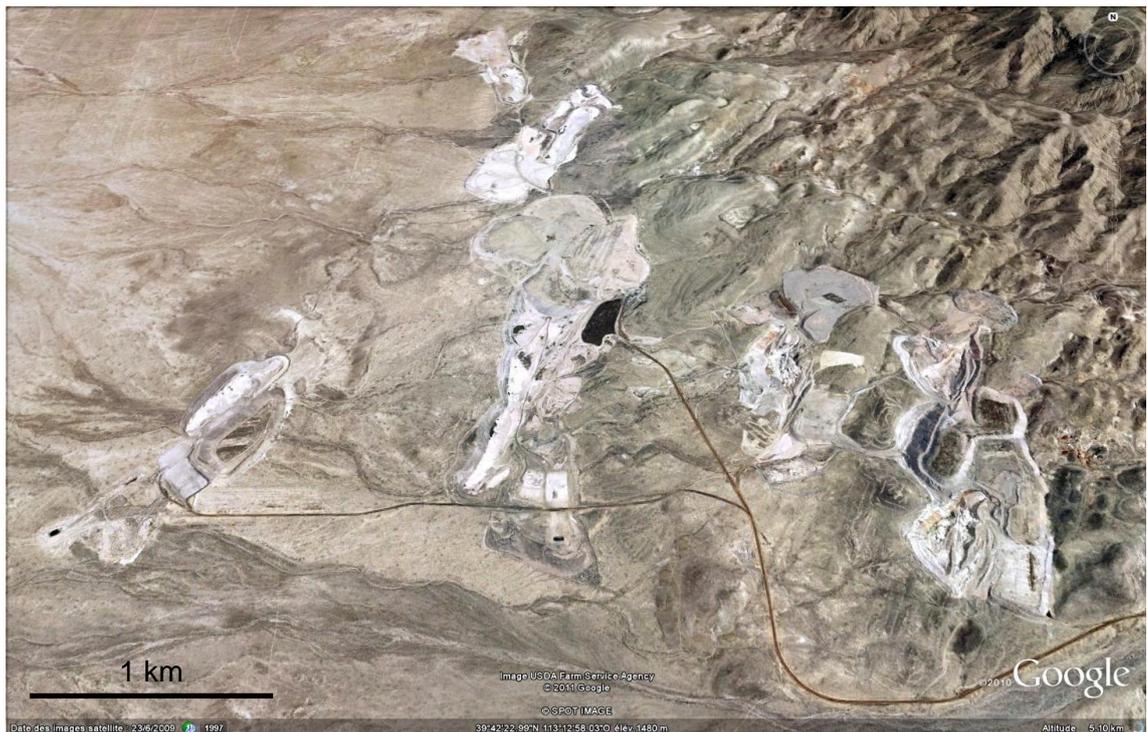


Figure 11 - Vue satellite de l'exploitation à ciel ouvert de Spor mountain en Utah, USA, premier producteur mondial de béryllium (© Google Earth, image prise en 2009).

Continent	Pays	Nom du gîte ou du district	Latitude	Longitude	Type de gisement	Taille	Tonnage (Mt)	Teneur BeO (%)	Minéraux de Be	Compagnie	Statut	Autres éléments	Autres Informations		
A	Canada	Whibouchi	51.68223	-75.83039	Pegmatite	3	9.8	0.05		Nemaska	Projet	Li			
		Seal Lake	54.33129	-61.61626	Complexe intrusif alcalin	3	6.8	0.37		Béryllite, Euclydyllite					
		Strange Lake	57.98432	-66.12636	Complexe intrusif alcalin	3	52.0	0.12			Quest Uranium Corp.		Zr, Nb, Y, TR		
		Thor Lake	62.09013	-112.44340	Complexe intrusif alcalin	3	3.5	0.42		Phénacite	Avalon Rare Metals Inc.	En activité	Ta, Nb, TR, Y		
		Tanco Mine, Bernic Lake	50.42955	-95.45092	Pegmatite	2	0.8	0.20		Béryll	Cabot Corp.		Ta, Li, Cs		
		Helioaring Creek	49.67167	-115.93306	Complexe intrusif alcalin	2	0.5	0.10		Béryll					
		Limaussaq	60.94889	-45.80022	Complexe intrusif alcalin	2									
		Sierra de Agua Chile	37.92966	-104.55043	Epithermal	1				Bertrandite				Zr, TR, Y, Ta, Hf	
		Spor Mountain, UT	39.71084	-113.21302	Epithermal	4	5.3	0.69		Bertrandite	Brush Wellman Inc.	En activité	F, U	Prod annuelle de 48 kt minéral	
		Seward Peninsula, Alaska	65.40655	-163.63204	Greisen	2				Chrysobéryll, Euclase			Sn		
E	USA	Custer, SD	43.76781	-103.55389	Pegmatite	1									
		Hill City, SD	43.93249	-103.57519	Pegmatite	1									
		Keystone, SD	43.86024	-103.42148	Pegmatite	1									
		Mount Antero, CO	38.67387	-106.24674	Pegmatite	1	0.2	1.00		Bertrandite, Phénacite, Béryll			W		
		Mount Wheeler, NV	38.98606	-114.31328	Pegmatite	1									
		Muscovite Mine, ID	46.73604	-116.67642	Pegmatite	1									
		Yellow Hammer, UT	41.59576	-79.30963	Pegmatite	1									
		Round Top, CO	31.27734	-105.47474	Epithermal	1	0.3	1.90			Cyprus			TR, U	
		Boomer Mine, CO	39.07583	-105.44887	Greisen	1				Bertrandite, Béryll, Euclase			F, U, W, Mo		
		Cordoba - Las Tapias	-32.72248	-64.97575	Pegmatite	2									
U	Argentine	San Luis	-33.30579	-66.35686	Pegmatite	2									
		Minas Gerais	-19.76550	-43.03406	Pegmatite	2									
		Picul-Parailhas	-6.54773	-36.36246	Pegmatite	2									
		Southern Bahia	-3.55003	-40.23329	Pegmatite	2									
		Ibaira	-19.67341	-43.12042	Gisement d'émeraude	2									
		Santa Teresinha de Goiás	-14.43211	-49.71311	Gisement d'émeraude	2									
		Casacavel-Cristais	-20.85514	-45.50402	Pegmatite	1									
		Quixeramobim-Solonopole	-10.04153	-40.66362	Gisement d'émeraude	1									
		Socoto-Carmalita	-10.04153	-40.66362	Gisement d'émeraude	1									
		Muzo	5.53211	-74.10467	Gisement d'émeraude	3								Ressources de 1500t de BeO	
S	Afghanistan	Darrah-e-Pech	34.66110	70.54170	Pegmatite	2									
		Panjsher Valley	34.64847	69.68699	Gisement d'émeraude	1									
		Gisment 801	43.61837	122.26857	Complexe intrusif alcalin	3	6.8						Ta, Zr, TR		
		Keketuohai	47.20718	89.81717	Pegmatite	2	3.0						Ta		
		Nanping	26.66954	118.22183	Pegmatite	2							Ta, Nb, Sn, TR		
		Mewar	26.66622	74.26084	Pegmatite	2									
		Almer-Menwara	26.44330	74.64269	Pegmatite	2									
		Belangl	23.43444	83.42307	Pegmatite	1							Ta, Nb		
		Aghabatou	49.33906	54.55667	Greisen	3	32.0	0.05					W, Mo		
		Taagan Dabaa	48.18330	106.06670	Greisen	2									
I	Mongolie	Sieki Valley	34.60043	71.74965	Gisement d'émeraude	1									
		Eykinskoye	50.55936	116.40642	Complexe intrusif alcalin	3	1.4	1.20			Zabalaiskiy GOK	En activité	Ta, Nb, Li		
		Yermakovskiy	51.61727	109.35958	Complexe intrusif alcalin	3							P		
		Vishnyakovskoye, Irkutsk	54.64960	99.72700	Complexe intrusif alcalin	2							Nb, Ta, Li		
		Voznesenskoye, Vladivostok	44.05841	132.08216	Complexe intrusif alcalin	2					Yaroslavskiy	En activité	Ta, Nb, F, Li, Rb, Cs		
		Malyshovo	57.11390	61.39330	Gisement d'émeraude	1									
		Echassières	46.18288	2.95148	Coupoie à Sn-W	2								Be non récupéré	
		Treguennec	47.87496	-4.34868	Coupoie à Sn-W	2	8.5	0.03			Imérys	En activité	Kaolin, Sn, Ta, Li		
		Rosess	55.01605	-8.35107	Greisen	1									
		Viseu	40.65508	-7.91415	Pegmatite	2								Feldspath, quartz	
O	Ukraine	Petra	51.39510	27.89446	Greisen	2									
		Pilbara	-20.41412	118.59181	Pegmatite	2								Zr, Nb, Ta, TR	
		Brockman	-16.85194	127.24012	Epithermal	2									
		Olary	-32.27771	140.32885	Pegmatite	1									
		Mount Painter	-30.21408	139.35298	Pegmatite	0									
		Aleidee Hills	-34.67044	138.69043	Pegmatite	0									
		Kangaroo Island	-35.84603	138.05472	Pegmatite	0									
		Gawler Craton	-33.51923	136.89080	Pegmatite	0									
		Musgrave Block	-26.10886	130.93237	Pegmatite	0									
		Canaan Valley	-40.93192	172.86888	Greisen	0									
Nouvelle Zélande		Charleston	-41.90654	171.43800	Pegmatite	0									
		Barrytown	-42.24346	171.32747	Pegmatite	0									
		Barrytown	-42.24346	171.32747	Pegmatite	0									
		Paterston Inlet	-46.89923	168.03139	Pegmatite	0									

Tableau 2 - Les principaux gisements et districts à béryllium d'Amérique, d'Eurasie d'Océanie.

Continent	Pays	Nom du gîte ou du district	Latitude	Longitude	Type de gisement	Taille	Tonnage (Mt)	Teneur BeO (%)	Minéraux de Be	Compagnie	Statut	Autres éléments	Autres informations	
Afrique du Sud	Afrique du Sud	Kenhardt	-29.35103	21.15348	Pegmatite	1			Béryll					
		Namaqualand	-29.97859	19.37829	Pegmatite	1			Béryll					
		Gordonia	-28.28740	20.06930	Pegmatite	1			Béryll					
		Leydsdorp	-23.94350	30.63380	Gisement d'émeraude	1				Émeraude				
		Qunouun	20.88000	4.96000	Grisen	1	0.1	0.25		Béryll		Non exploité		
		Nahoa-Lacuni	20.83000	5.50000	Grisen	1	1.4	0.06		Béryll		Non exploité	W, Sn, Li	
		Cinai	-18.28910	12.48330	Pegmatite	2				Béryll			Li, Feldspath	
		Cassatungues	8.48910	13.81330	Pegmatite	1				Béryll			Quartz ultra pur	
		Haramulo	8.48910	13.81330	Pegmatite	1				Béryll			Mica	
		Haramulo	-15.45700	13.82700	Pegmatite	0				Béryll				
Etiopie	Etiopie	Kaptsidi	5.45328	39.01506	Pegmatite	1				Béryll		En activité	Ta, Nb, Li	
		Berece	-16.63333	47.98680	Pegmatite	3				Béryll		Epaisé		
		Ampantramakea-Malekalima	-20.84852	45.87422	Pegmatite	3				Béryll				
		Ahkezeba-Voambobitra	-18.31662	47.11806	Pegmatite	2				Béryll				
		Anjalava	-20.91177	46.60167	Pegmatite	2				Béryll				
		Andranoy	-13.80007	49.68356	Pegmatite	1				Béryll				
		Andapa	-14.40376	49.88717	Pegmatite	1				Béryll				
		Mansoaia	-15.62451	50.17463	Pegmatite	1				Béryll				
		Bas Meavarano	-14.75940	48.30546	Pegmatite	1				Béryll				Nb, Ta
		Sofia	-15.39479	48.01366	Pegmatite	1				Béryll				
Madagascar	Madagascar	Andilamena	-17.01055	48.57336	Pegmatite	1				Béryll				
		Tsaratanana	-16.79769	47.65165	Pegmatite	1				Béryll				
		Alaoatra	-17.46373	48.52734	Pegmatite	1				Béryll				
		Andriamena	-17.18317	47.89687	Pegmatite	1				Béryll				
		Mahaoma	-17.16296	46.57987	Pegmatite	1				Béryll				
		Tsiracomanandoy	-18.77013	46.05179	Pegmatite	1				Béryll				
		Itasi	-19.11035	46.42306	Pegmatite	1				Béryll				
		Beiafo-Antsirabé	-19.83879	46.85916	Pegmatite	1				Béryll				
		Isahara	-23.72201	47.35490	Pegmatite	1				Béryll				
		Irongay	-23.45623	45.63201	Pegmatite	1				Béryll				
Maroc	Maroc	Fianarisoa	-21.44660	47.08297	Pegmatite	1				Béryll				
		Ironitro	-21.40238	47.98467	Pegmatite	1				Béryll				
		Ikalamavony	-21.16391	46.99588	Pegmatite	1				Béryll				
		Ambalimantrahana	-20.54741	46.79325	Pegmatite	1				Béryll				
		Ambosira	-20.52993	47.23955	Pegmatite	1				Béryll				
		Voronoro	-20.16689	47.20000	Pegmatite	1				Béryll				
		Saharany	-21.17864	46.63480	Pegmatite	1				Béryll				
		Angabanonina	-20.62637	46.18621	Pegmatite	1				Béryll				
		Beslay	-19.78992	45.04895	Pegmatite	1				Béryll				
		Imoula	-16.26264	37.68636	Pegmatite	1				Béryll				
Mozambique	Mozambique	Moroto	-16.15094	37.66993	Pegmatite	2	7.8			Béryll	Noretta	En activité	Ta	
		Murilo	-15.91787	37.98321	Pegmatite	2	11.0			Béryll, Morganite	Noretta	En activité	Ta	
		Muliba	-15.91787	37.98321	Pegmatite	3	10.3			Béryll			Ta	
		Karibib - Lisakos	-21.98388	15.27161	Pegmatite	2				Béryll			Li	
		Kansaburg	-26.02261	18.74560	Pegmatite	2				Béryll				
		Tantalita Valley	-28.71697	18.80000	Pegmatite	2				Béryll	Tantalum Valley Mining	En activité	Nb, Ta	
		Etiro pegmatite	-21.73469	15.80761	Pegmatite	2				Béryll			Nb, Ta, Li	
		Ishasha	-0.74877	29.63336	Pegmatite	2				Béryll				
		Mwirasandu	-0.98398	30.17832	Pegmatite	2				Béryll			Sn	
		Ouganda	Ouganda	Ntungamo	-0.88268	29.65040	Pegmatite	1				Béryll		
Bushenyi	-0.64031			30.87759	Pegmatite	1				Béryll				
Mubende	0.66028			31.39000	Pegmatite	1				Béryll				
Mukono	0.35333			32.75528	Pegmatite	1				Béryll				
Kookoboo	-3.35807			27.82722	Pegmatite	3				Béryll		Epaisé		A produit 6001 de BeO
Mamono-Kigololo	-7.27848			27.45117	Pegmatite	2				Béryll		Epaisé	Sh, Nb, Ta, Li	
Lugulu	-2.20841			27.60708	Pegmatite	1				Béryll			Nb, Ta, Sn, Li, Au	
Mangwedjipa	0.33354			28.50381	Pegmatite	1				Béryll			Nb, Ta, W, Li, Bi	
Gatumba	-1.94135			29.62944	Pegmatite	2				Béryll			Sh, Nb, Ta, W, Li, Bi	
Rutsiro-Kabaya	-1.96241			29.38754	Pegmatite	1				Béryll			Sh, Nb, Ta, W	
Rwanda	Rwanda	Kibirira	-1.95217	29.64122	Pegmatite	0								
		Lundazi	-12.29615	33.16952	Pegmatite	2				Béryll, Chrysobéryll, Aligue-marine				
		Siavonga	-16.53369	28.71659	Pegmatite	1				Béryll, Aligue-marine				
		Kaliye	-15.34807	28.48035	Pegmatite	1				Béryll, Aligue-marine				
		Kapin Mposhi	-13.96682	28.68333	Pegmatite	1				Béryll, Aligue-marine				
		Mkushi - Serenje	-13.41384	29.92951	Pegmatite	1				Béryll, Aligue-marine				
		Katubu	-13.10673	28.10088	Gisement d'émeraude	1				Émeraude				
		Bikita	-19.95827	31.43563	Pegmatite	3				Béryll				Li, Sn, Cs
		Karoi	-16.80162	29.63390	Pegmatite	1								Ta, U
		Muzerenga	-20.33674	29.97475	Pegmatite	1								
Zimbabwe	Zimbabwe	Buhara	-16.19273	31.12223	Complexe intrusif alcalin	1								
		Sardawana	-20.92758	29.93447	Gisement d'émeraude	1				Émeraude				

Tableau 3 - Les principaux gisements et districts à béryllium d'Afrique.

#### 4.3.3. Le béryllium en sous-produit des complexes alcalins à Nb-Ta, TR, Zr et Y

Le béryllium peut être un sous-produit de l'exploitation des gîtes du plutonisme alcalin, en particulier des complexes granitiques annulaires à Nb-Ta, Terres Rares (TR), Zr et Y. Jébrack et Marcoux (2008) citent le gisement canadien de Strange Lake, dont les ressources sont évaluées à 52 Mt @ 0,12 % BeO, présent sous forme de herdérite (phosphate de Be). Ce gisement est surtout connu pour son contenu en Zr et Y.

À la fin des années 1980, plusieurs articles (Soja et Sabin, 1986 ; Schiller, 1985) ont été consacrés au gisement de Thor Lake, situé dans les Territoires du NW du Canada. Les minéralisations sont en liaison avec un complexe annulaire à cœur de syénite. Le béryllium, sous forme de phénacite et de gadolinite, est associé à Nb-Ta, TR, Zr et Y. Les ressources en béryllium des zones « T » de Thor Lake seraient de 3,5 Mt à 0,42 % BeO (Avalon Rare Metals Inc.).

C'est sans doute à des types similaires qu'il faut rattacher les gisements russes de Etykinskoye (Nb-Ta, Li et Be) et de Yermakovskiy (F, Be). Ce dernier est considéré comme le plus gros gisement de Be de Russie. Le gisement chinois « 801 », situé à la frontière de la province de Jilin et de la Mongolie Intérieure, est supposé contenir d'importantes réserves de Ta (21 000 t de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) et Nb (370 000 t de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), avec également Be, Zr et TR (McNeil, 2005).

#### 4.3.4. Les coupoles à étain et tungstène, béryllium en sous-produit

Les coupoles à Sn-W se situent en bordure d'intrusions granitiques post-orogéniques, mises en place à faible profondeur. La roche, qualifiée de greisen, est constituée de quartz, feldspaths alcalins et micas blancs (muscovite, lépidolite) pouvant contenir de notables quantités de cassitérite (Sn), wolframite (W), fluorine, tourmaline, béryl et topaze. Elles sont la source de nombreux minéraux industriels (feldspaths, micas, kaolin, quartz), avec la possibilité de récupérer les minéraux accessoires associés.

### 4.4. GISEMENTS ET POTENTIEL EN FRANCE

En France, le gisement d'**Échassières** (Allier) est un bel exemple de coupole granitique à Sn-W, également minéralisée en Li, Be et accessoirement Nb-Ta (Burnol, 1974). C'est une coupole granitique complexe comprenant trois unités granitiques (Beauvoir, Les Colettes et La Bosse). L'exploitation actuelle ne concerne que la partie supérieure kaolinisée des granites des Colettes et de Beauvoir. Le groupe IMERYS y extrait principalement du kaolin, des sables lithinifères et récupère de la cassitérite (60 t/an) et de la manganocolumbite. Le béryllium n'est pas valorisé et sa répartition au sein du massif reste très mal connue ; on sait seulement que les sondages des années 1960 ont traversé des zones épaisses de plusieurs dizaines de mètres, riches en herdérite (phosphate de Be). Aubert (1969) rapporte des teneurs comprises entre 200 et plus de 1 000 g/t Be (0,1 % Be) dans des albitites, minéralisées en herdérite. La richesse en BeO de la herdérite (15-16 %) et sa solubilité dans les acides font de ce minéral un minerai de Be de plus haut intérêt. Bariand *et al.* (1978) précisent que la

herdélite pourrait constituer un gisement exploitable de Be dans la coupole de leuco-granite-albitique de La Bosse, si tous les accompagnateurs (Sn, Nb, Ta, Li et produits céramiques) étaient également récupérés. Cependant, dans le cadre de l'action concertée « Valorisation des minerais polymétalliques disséminés et fins » réalisée dans les années 1970, le problème de valorisation du Be des albitites d'Échassières n'a malheureusement pas été abordé (Barbery G. et Robert J.C., 1977).

Le gisement de **Tréguennec** (Finistère) est une aplite minéralisée en cassitérite et nobio-tantalite, avec Li et Be associés. Les ressources sont estimées à 8,5 Mt de feldspath contenant 5,4 kt de Sn, 1,6 kt de Ta, 1,3 kt de Nb, 66 kt de Li et 2400 t de Be (forme minéralogique non précisée) à teneur de 0,03 % Be (Lulzac, 1986).

Les pegmatites à béryl des **Monts d'Ambazac** (Haute-Vienne), au nord de Limoges, ont été exploitées épisodiquement pour le béryl dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle. En fait une soixantaine de carrières de pegmatites y ont été exploitées au XIX<sup>e</sup> et dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle d'abord principalement pour le feldspath destiné aux porcelainiers de Limoges. À partir de 1907, du béryl a commencé à en être extrait de manière épisodique, et la production totale n'a probablement pas excédé quelques tonnes (Chatenet, 2008, cite ponctuellement une production de 1,8 t de béryl en 1934). Les ressources résiduelles sont marginales (quoique non précisément évaluées). Il n'y a plus actuellement que des collectes épisodiques de béryls par des minéralogistes amateurs.

Les béryls limousins sont le plus souvent pierreux, mais sont parfois de qualité gemme, en particulier jaunes (héliodore) et plus rarement bleus (aigue-marine).

D'autres champs pegmatitiques à béryl existent dans le Morvan. On pourra aussi citer les gisements potentiels de Neuf-Jours en Corrèze et Beauvain dans l'Orne.

Il existe aussi quelques occurrences très ponctuelles de bertrandite (Quily, Morbihan ; Massif de la Lauzière, Savoie, etc.). Ce minéral a d'ailleurs été découvert pour la première fois et décrit en France en 1883, avec pour localité-type la carrière Barbin à Nantes, Loire-Atlantique. Il a été nommé en l'honneur du minéralogiste français Emile Bertrand (1844-1909).

Le potentiel en Be du sous-sol de France métropolitaine est peut-être encore significatif, mais il est mal connu. Nombreuses sont les coupoles granitiques et les gîtes à Sn-W susceptibles de recéler du Be, mais ce dernier a rarement été dosé.

Mais plus que la ressource, c'est l'étude des procédés de valorisation industrielle des minerais français à Be qui fait défaut pour pouvoir réellement parler de potentiel béryllium sur le territoire national.

#### **4.5. COMMENTAIRE SUR LES RESSOURCES EN BÉRYLLIUM**

Depuis le début des années 1970 et la mise en exploitation du gisement de SporMountain, les États-Unis ont le quasi-monopole de la production de béryllium dans le monde occidental. Ils disposent de la seule installation de traitement, à Delta, près

de SporMountain (société Brush Wellman Inc.). La bertrandite est devenue la principale source de béryllium, entraînant la chute de la production de béryl, dont l'essentiel est exporté vers les USA pour y être traité.

La Chine est supposée être un producteur significatif, mais les données ne sont pas publiées.

Les ressources mondiales ne sont pas précisément évaluées. L'USGS les estime à plus de 80 000 t de béryllium, dont 65 % aux USA, en Utah (district de SporMountain) et en Alaska (Seward Peninsula).

Les réserves du gisement de SporMountain, évaluées à 15 900 t de béryllium contenu, correspondraient à 80 ans de production à un rythme de 200 t par an. S'y ajoutent des possibilités significatives de découvertes supplémentaires dans ce district.

#### **4.6. PRODUCTION**

Le tableau 4 ci-après rassemble les productions minières, en tonnes de béryllium métal, telles que publiées dans les rapports annuels de l'USGS. Seule la production des USA peut être considérée comme fiable. Pour les autres pays, les données ne sont que des estimations réalistes. Ce tableau a l'avantage de recenser les pays producteurs depuis ces 15 dernières années. À noter que l'usine de Kazatomprom à Ulba (Kazakhstan) continue à proposer du béryllium et des composés à la vente et donc continue certainement à en produire, même si elle ne fournit pas de statistiques de production.

La production minière aurait chuté de moitié à partir de 2001 (fig. 12), en raison du déstockage américain et d'une demande moins importante d'alliages Be-Cu sur le marché des télécommunications et des ordinateurs. La haute toxicité du béryllium n'est sans doute pas étrangère à cette diminution de la consommation. Aujourd'hui, et lorsque cela est possible, on a tendance à diminuer les quantités, voire même à remplacer les alliages par d'autres matériaux.

Il n'existe pas de données précises sur le recyclage du Be. D'après l'USGS, au moins 10 % de la consommation annuelle de béryllium est issu du recyclage des résidus d'usinage des alliages au Cu-Be. Une partie est également produite par le recyclage des équipements militaires anciens contenant du Be.

Production minière	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<b>USA</b>	173	202	211	231	243	200	180	100	80	85	90	110	155	152	176	120
<b>Brésil</b>	34	34	34													
<b>Argentine</b>																
<b>Chine</b>	55	55	55	55	55	55	55	15	15	15	20	20	20	20	20	20
<b>Russie</b>	32	32	32	40	40	40	40	40	40	40						
<b>Kazakhstan</b>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4						
<b>Mozambique</b>											3	3	6	6	6	1
<b>Zimbabwe</b>	1															
<b>Madagascar</b>																
<b>Autres pays</b>	1	1		1	2	2	2	2	1	1	1	1				
<b>TOTAL</b>	<b>300</b>	<b>328</b>	<b>336</b>	<b>331</b>	<b>344</b>	<b>301</b>	<b>281</b>	<b>161</b>	<b>140</b>	<b>148</b>	<b>114</b>	<b>137</b>	<b>181</b>	<b>178</b>	<b>197</b>	<b>141</b>

Tableau 4 - Production minière de béryllium, en t de Be contenu, rapportée par les « Mineral Yearbooks » de l'USGS (données incomplètes).

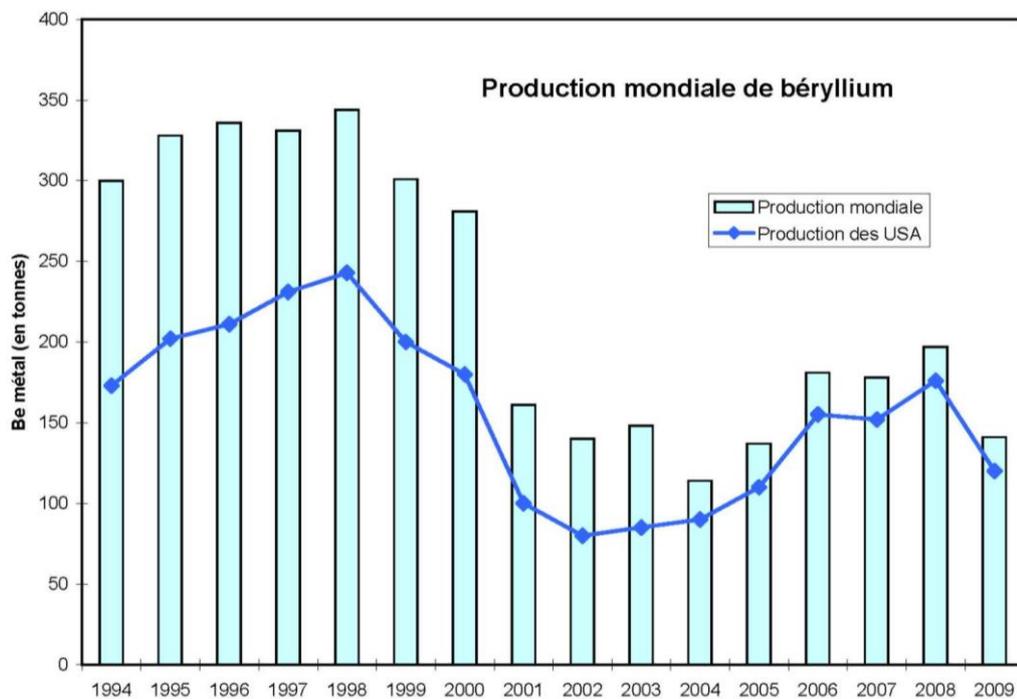


Figure 12 - Évolution de la production minière du béryllium depuis 1994. (d'après les Minerals Yearbook de l'USGS, données partielles).

Principales mines, usines de traitement et unités de production et transformation de béryllium

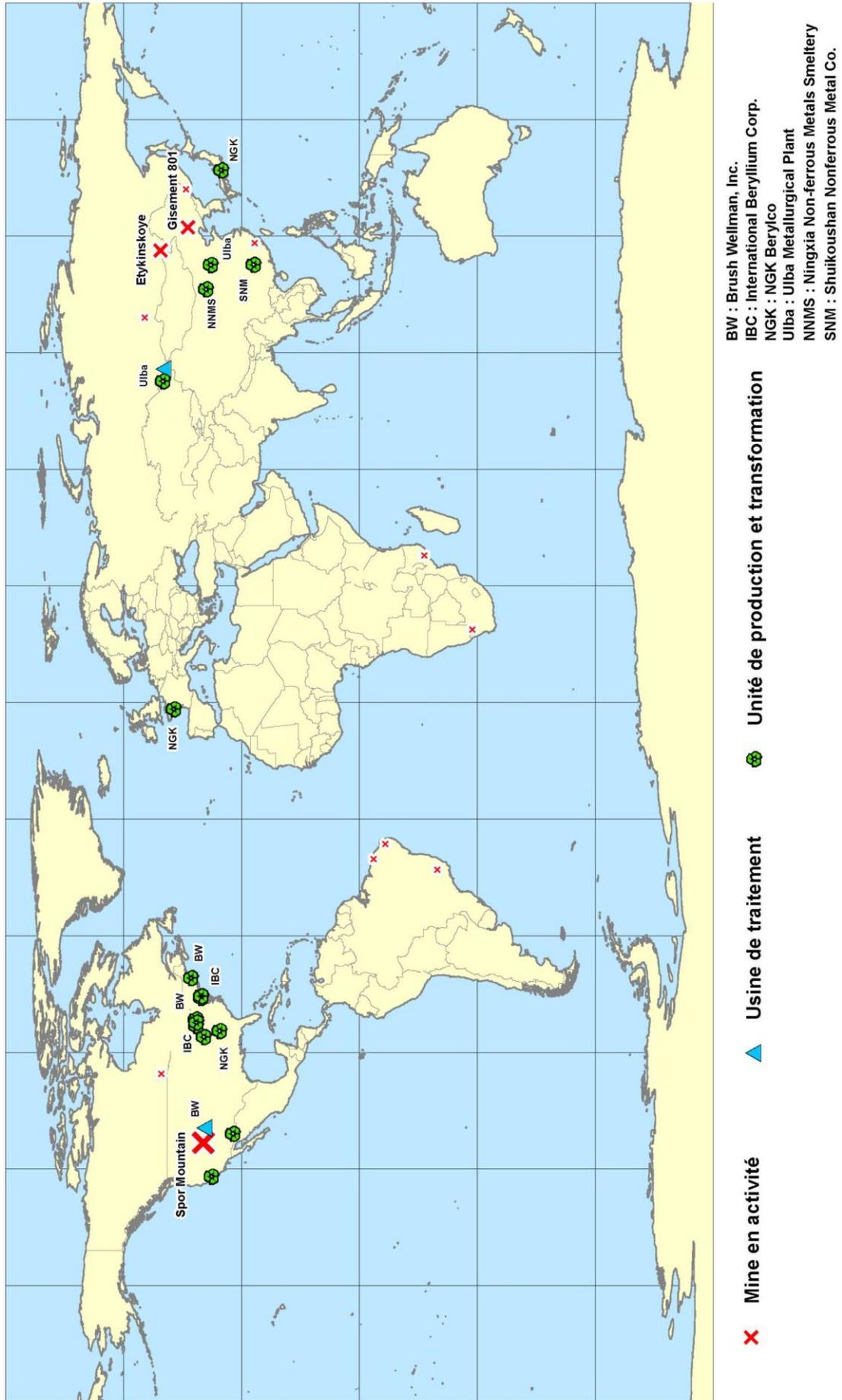


Figure 13 - Carte de localisation des principales mines, unités de traitement et usines de production et transformation de béryllium.

## 5. La filière industrielle

Le béryllium est utilisé sous forme élémentaire métallique, sous forme d'oxyde dans les céramiques et sous forme d'alliages, tout particulièrement les alliages Cu-Be. Les différents niveaux de transformation à partir des minerais (à bertrandite et à béryl) relèvent de la métallurgie. Avant de décrire les principales étapes, il convient de lister les principaux opérateurs mondiaux.

### 5.1. LES PRINCIPAUX OPÉRATEURS

Les compagnies productrices de béryllium métal, de céramiques et/ou d'alliages sont peu nombreuses :

- **Materion Inc.** (<http://materion.com>), précédemment dénommée **Brush Engineered Materials Inc.**, maison-mère de **Brush Wellman Inc.** (changement de nom le 8 mars 2011), est la principale compagnie intégrée. Elle exploite le gisement de Spor Mountain (Utah), produisant le concentré d'hydroxyde de béryllium à l'usine Delta (Utah), le métal et les alliages à Elmore (Ohio), les poudres céramiques à Lorain (Ohio), et les produits plats et les fils à Reading (Pennsylvanie). Les poudres céramiques provenant d'Elmore alimentent les usines de Tucson (Arizona) et Newburyport (Massachusetts).
- **NGK Metals Corp.** (USA) ([www.ngkmetals.com](http://www.ngkmetals.com)) est le premier producteur mondial d'alliages Cu-Be (produits plats et barres) avec des usines à Nagoya (Japon), Couëron (France) et Sweetwater (États-Unis).
- Au Kazakhstan, **Ulba Metallurgical Plant JSC** ([www.ulba.kz](http://www.ulba.kz)), du groupe Kazatomprom ([www.kazatomprom.kz](http://www.kazatomprom.kz)) produit depuis 2000 des alliages au béryllium (Cu-Be, Ni-Be, Al-Be), du béryllium raffiné non ouvré et de l'oxyde. Le béryllium produit a une pureté moindre que celui de Brush Wellman.
- En Chine, **Ningxia Non ferrous Metal Smeltery** ([www.nniec.com](http://www.nniec.com)) et sa filiale Ningxia Orient Tantalum Industry Co., situées en Mongolie Intérieure, ainsi que **Shuikoushan Nonferrous Metal Co** ([www.csksg.com](http://www.csksg.com)), dans la province du Hunan, produisent environ 20 t de béryllium principalement sous forme d'alliages Cu-Be. Ces sociétés achèteraient une partie de leur matière première à Ulba (Kazakhstan) mais il est également probable que l'une d'entre elle (Ningxia Non ferrous Metal Smeltery) produise du béryllium à partir de minerais. Les informations sont peu abondantes cependant Ulba Metallurgical Plant JSC affirme l'existence de trois usines de traitement intégrées et la compagnie chinoise se définit comme la seule base de production de béryllium de Chine.

Ulba a aussi formé en 2007 une JV avec Xingye Copper International Group Ltd ([www.xingyecopper.com](http://www.xingyecopper.com)) sous le nom de **Yingtian Ulba Shine Metal Materials Co, Ltd** ([www.ulba-shine.com](http://www.ulba-shine.com)), dans le Jiangxi, pour produire et commercialiser des produits plats (rouleaux de bandes de Cu-Be, capacité de 2 000 t/an à  $\pm 2$  % de Be).

- **International Beryllium Corp.** (Canada) ([www.ibcadvancedalloys.com](http://www.ibcadvancedalloys.com)), dont le siège est à Vancouver (Canada), cherche à se développer en tant que producteur intégré de la mine à l'alliage. Il est propriétaire d'usines d'alliages aux États-Unis, et vient d'acquiescer des mines au Brésil et en Ouganda ainsi que plusieurs permis autour de Spor Mountain et de Boomer Mine (États-Unis). IBC reste toutefois un acteur mineur sur le marché du béryllium mais il se positionne pour devenir le principal concurrent de Brush Wellman.
- En Russie, la société Kamensk-Uralsky Non Ferrous Metals Working Plant (**Kuzocm**) du groupe Renova ([www.kuzocm.ru](http://www.kuzocm.ru)) produit des barres en Cu-Be. Elle s'approvisionne auprès d'Ulba.

## 5.2. LES PROCÉDÉS DE TRANSFORMATION

Les procédés d'extraction du béryllium à partir des minerais et de production de ses composés sont décrits succinctement ci-après (résumés d'après Jdid et Blazy, 2005).

### 5.2.1. Traitement minéralurgique

La minéralurgie ne concerne que les minerais à béryl. Le minerai à bertrandite de Spor Mountain est directement traité par hydrométallurgie, après concassage, sans subir de phase préliminaire de concentration.

Le béryl est encore exploité de manière artisanale. Après abattage et concassage des gros blocs, le béryl est concentré par scheidage manuel. Or de nombreuses occurrences à béryl présentent des minéralisations trop fines pour être triées. Aussi a-t-on essayé de concentrer le béryl par flottation lors d'un stade minéralurgique précédant l'extraction du béryllium. Dans les années 1950 et 1960, ont eu lieu des tentatives d'enrichissement par flottation sur des minerais bruts de béryl titrant au moins 2 à 3 % BeO, avec des résultats peu satisfaisants.

### 5.2.2. Métallurgie

Les minerais de bertrandite et les concentrés de béryl sont traités par hydrométallurgie pour obtenir l'oxyde BeO. L'usine de Brush Wellman Delta (Utah) utilise le procédé à l'acide sulfurique, qui permet de traiter indifféremment la bertrandite et des concentrés de béryl à plus de 10 % BeO importés. Cette usine fabrique du carbonate basique  $\text{BeCO}_3 \cdot \text{Be}(\text{OH})_2$ , qui est transformé en hydroxyde de béryllium  $\text{Be}(\text{OH})_2$  et oxyde BeO.

#### ***Production de l'oxyde brut***

Les minerais de bertrandite sont broyés à 0,8 mm, puis lixiviés par de l'acide sulfurique à une température voisine du point d'ébullition. La solution contenant le sulfate de béryllium est séparée des solides par décantation dans des épaisseurs opérant à contre-courant. Elle titre alors 0,4 à 0,7 g/l Be, 4 à 7 g/l Al, 3 à 5 g/l Mg et 1,5 g/l Fe, et contient quelques impuretés mineures.

Les concentrés de béryl sont fondus à 1 650 °C sans additifs, puis trempés dans l'eau. Après ce traitement, seuls 50 % à 60 % du béryllium sont dissouts par l'acide sulfurique, car une partie du BeO forme une solution solide avec SiO<sub>2</sub>. Cette solution solide est détruite à une température de 900 à 1 000 °C. Un nouveau traitement thermique en four tournant augmente le taux de mise en solution du béryllium à 90 à 95 %.

Les solutions de lixiviation sont traitées par extraction par solvant organique. Après séparation des phases organique et aqueuse, les métaux sont ré-extraits de la phase organique par une solution de carbonate d'ammonium à 70 °C.

Après précipitation des hydroxydes de fer et d'aluminium à 85°C et filtration, un chauffage à 95 °C provoque la précipitation quasi totale du béryllium sous forme de carbonate basique BeCO<sub>3</sub> + Be(OH)<sub>2</sub>. Un chauffage le décompose en hydroxyde de béryllium Be(OH)<sub>2</sub> appelé glucine, calcinée pour obtenir de l'oxyde BeO brut.

### ***Production du métal brut***

Les principales difficultés rencontrées dans la production du métal sont sa réactivité, son point de fusion élevé et l'extrême stabilité de l'oxyde. Il existe deux principaux procédés pour obtenir le métal.

- **Procédé au magnésium (magnésiothermie)**

Ce procédé, adopté aux États-Unis lors de la Seconde Guerre Mondiale, consiste à réduire le fluorure de béryllium BeF<sub>2</sub> par le magnésium.

L'hydroxyde est converti en fluorure par dissolution dans une solution aqueuse de bifluorure d'ammonium (NH<sub>4</sub>)HF<sub>2</sub>, évaporée ensuite pour cristalliser du fluobéryllate d'ammonium (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>, décompose en BeF<sub>2</sub> par chauffage à 900-1 000 °C.

La réduction du fluorure par le magnésium se fait à 1 300 °C environ dans un four à creuset de graphite, selon la réaction  $\text{BeF}_2 + \text{Mg} \rightarrow \text{MgF}_2 + \text{Be}$ .

- **Procédé par électrolyse en milieu chlorure**

Ce procédé a été utilisé en Allemagne pendant la Seconde Guerre Mondiale, aux États-Unis de 1943 à 1958 et en France par Pechiney aux ateliers de La Praz (Savoie) entre 1952 et 1964.

On fabrique du BeCl<sub>2</sub> par carbo-chloruration à 800 °C, à partir de briquettes d'oxyde obtenues avec du brai et du charbon de bois, et rendues poreuses par un chauffage à 1 000 °C, selon la réaction  $\text{BeO} + \text{C} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{BeCl}_2 + \text{CO}$ .

On électrolyse les mélanges de sels fondus NaCl-BeCl<sub>2</sub> (à 350-400°C) ou LiCl-KCl-BeCl<sub>2</sub> (à 450-550°C). La cathode est un creuset en nickel ou fer, et l'anode centrale est une tige en fer ou en graphite. La tension d'électrolyse est de 6 V en début de procédé, pour terminer aux environs de 8 V. Le métal se dépose sur les parois du creuset sous

forme de paillettes qui sont ensuite détachées, lavées à l'eau froide, puis épurées. On obtient un produit à 99,5 % Be.

### ***Raffinage du métal brut***

Les billes ou les paillettes de métal brut contiennent encore des impuretés, dont la présence est incompatible avec les usages. Les qualités de haute pureté sont raffinées par sublimation du béryllium ou par fusion sous vide de l'oxyde. Ces procédés permettent de fournir seulement de faibles quantités de métal. Elles conviennent pour obtenir une pureté nucléaire.

En revanche, on obtient un béryllium de très bonne qualité commerciale par raffinage électrolytique, par voie ignée en bain de chlorure avec anode soluble en béryllium ordinaire. Cette méthode permet de traiter aussi les chutes d'usinage.

### **5.2.3. Fabrication des composés commercialisés**

#### ***Les alliages***

Les alliages Cu-Be constituent le principal usage du béryllium. Les alliages communs contiennent entre 0,25 % et 2,6 % de béryllium dissous dans le cuivre pour former une série dont la résistance mécanique est le double des autres alliages au Cu. L'alliage-mère est produit en faisant réagir, au four électrique à arc, une charge composée de glucine, de carbone et de cuivre. Ces alliages possèdent des niveaux élevés de conductivité thermique et de conductivité électrique. Ils résistent à la corrosion, n'adhèrent pas lorsqu'ils sont soumis à des pressions extrêmes, et sont peu magnétisables.

Dans les alliages Al-Be, la proportion de Be peut atteindre jusqu'à 65 %. Ce sont des alliages très légers, résistant à la corrosion, utilisés en aéronautique. D'autres alliages (Ti-Be, Ni-Be, Fe-Ni-Co-Be, Be-Si, etc.) ont également des usages très spécifiques.

#### ***Les céramiques***

L'oxyde de béryllium permet d'obtenir une céramique dure et blanche à point de fusion élevé (2 570 °C). Pour la céramique, tous les contaminants doivent être exclus et la poudre doit titrer au moins 99,8 % BeO. Cet excellent isolant électrique a une conductivité thermique plusieurs fois supérieure à celle de l'alumine. Des couches métalliques peuvent être appliquées sur la surface des céramiques de sorte que le brasage et la soudure soient possibles, ainsi que la fixation directe de transistors.

### **5.3. LES ACTEURS FRANÇAIS**

Il n'y a eu en France d'exploitation minière de béryl qu'à très petite échelle dans la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle (Monts d'Ambazac, cf. 4.4.).

Depuis 1976, la France ne produit plus ni glucine ( $\text{Be}(\text{OH})_2$ ), ni béryllium métal, ni alliage-mère de cupro-béryllium. Péchiney s'est désengagé complètement du béryllium en 1976, en arrêtant ses usines de Salindres et de La Praz, pour des raisons économiques et des problèmes d'environnement. La France conserve en revanche un rôle important de transformateur et de distributeur de produits finis au niveau européen, en particulier avec les sociétés suivantes :

**NGK Berylco France** ([www.ngkbf.com](http://www.ngkbf.com)), située à Couëron (44220), dans la banlieue de Nantes. Filiale du groupe japonais NGK, cette société est spécialisée dans le laminage et l'étirage d'alliages Cu-Be. Ces derniers sont livrés sous forme de couronnes ou de bobines par la maison-mère NGK, qui se fournit elle-même en béryllium auprès de Brush Wellman, d'Ulba ou d'acteurs chinois. NGK effectue les mélanges et envoie à ses filiales les bobines et couronnes. NGK Berylco France se positionne comme l'un des leaders mondiaux dans le domaine de la transformation de haute précision de bandes, fils et barres d'alliage en cuivre au béryllium.

**Atmostat** ([www.atmostat-alcen.com](http://www.atmostat-alcen.com)) est un concepteur usineur spécialisé dans le béryllium. Cette société est impliquée dans l'industrie de défense, notamment avec la Direction des Applications Militaires (DAM) du CEA et avec Thales Optronique. Elle cherche aussi à se placer auprès de la Communauté Européenne pour les panneaux intérieurs du tore du réacteur de fusion expérimental international ITER.

**Acal BFI France** ([www.bfi-optilas.fr](http://www.bfi-optilas.fr)), installé à Evry (ancien BFI Optilas et acquis en novembre 2009 par le groupe britannique Acalplc, [www.acalplc.co.uk](http://www.acalplc.co.uk)), est un des plus importants distributeurs de béryllium métal, d'alliages Al-Be et de composites en oxyde de béryllium en France. Le groupe est lié par un partenariat avec Brush Wellman depuis les années 1960.

**Stainless** (25410 Dannemarie-sur-Crête) ([www.stainless.eu](http://www.stainless.eu)) distribue du cuivre-béryllium acheté auprès de Brush Wellman. Toutefois, la société tente de diversifier ses sources, peut-être avec la Chine.

**AzelisElectronics** (75019 Paris, [www.azeliselectronics.com](http://www.azeliselectronics.com)), division d'Azelis Arnaud ([www.arnaudgroup.com](http://www.arnaudgroup.com)) est un fournisseur de matériaux semi-conducteurs, autres matériaux ultrapurs et accessoires pour l'industrie des composants électroniques. AzelisElectronics commercialise en particulier du béryllium à 99,99 %.

Parmi les utilisateurs finaux, on citera :

- le **CEA / DAM** (Direction des Applications Militaires) ;
- **Alcatel Lucent** : béryllium ultrapur pour des composants de liaison par fibres optiques ;
- le **Groupe Thalès** et ses multiples filiales (Thalès Security Solutions and Services, Thalès Angénieux, Thalès Optronique, Thalès Alenia Space, Thalès Electron Device, TDA Armements, etc.) ;
- **MBDA** (missilier) : alliages cuivre-béryllium ;
- **Safran** (aéronautique) ;

- **Valeo** et autres équipementiers automobiles, pour la connectique des équipements électriques et électroniques. Ces fournisseurs s'adressent eux-mêmes à des fabricants de connectique, qui à leur tour s'approvisionnent auprès de spécialistes de l'usinage de pièces contenant du béryllium.

## 6. Risques et réglementation sanitaire

Le béryllium et ses composés sont principalement dangereux sous forme de particules inhalables qui peuvent causer des cancers des poumons ainsi qu'une maladie respiratoire chronique, la béryllose. Les objets contenant du béryllium peuvent également causer des pathologies immuno-allergiques par contact cutané (Afsset, 2010). Selon l'INRS (2009), à travers une enquête réalisée en 2003 et 2004 auprès de 5 000 établissements industriels représentatifs (hors aéronautique et armement), environ 12 000 travailleurs seraient exposés au béryllium et à ses composés en France (cf. fig. 14). Il faut noter que certains employés exposés travaillent dans des domaines où le béryllium n'est pas volontairement ajouté dans les matériaux utilisés, mais est présent comme impureté (production d'aluminium).

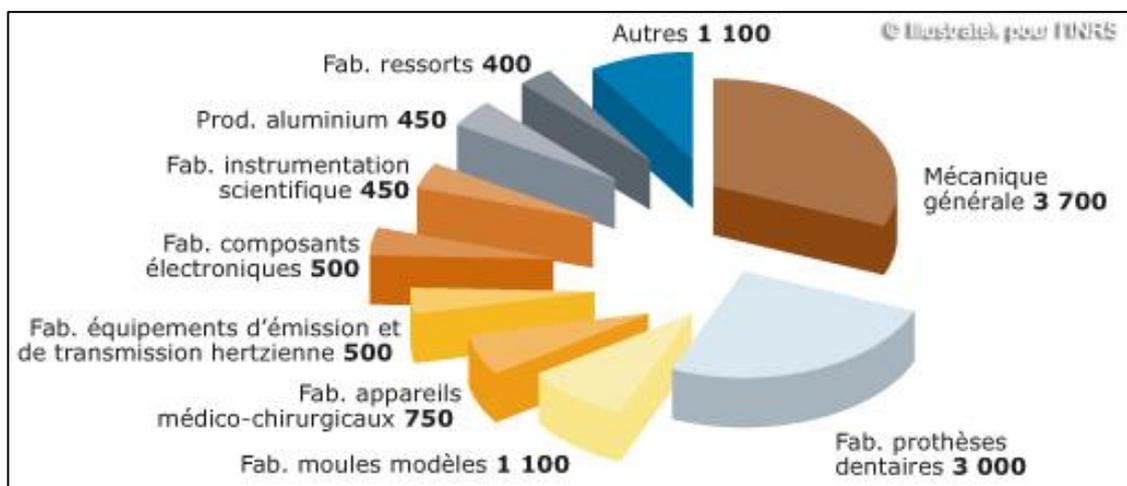


Figure 14 - Travailleurs exposés au béryllium en 2004 (INRS, 2009).

La réglementation française actuelle d'encadrement de l'usage du béryllium et de ses composés vise principalement à limiter les risques liés à l'inhalation. Ainsi, la Valeur Limite d'Exposition Professionnelle (VLEP) du béryllium a été fixée à  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pendant  $8 \text{ h}^6$  par la circulaire du 12 janvier 1985 (Afsset, 2010).

L'exposition des travailleurs est mesurée par prélèvement en pompant de l'atmosphère à travers un filtre qui sera dissout et analysé pour définir la quantité de béryllium présent dans le volume d'air ainsi pompé. Cette méthode ne fait donc pas de distinction entre les différentes formes de béryllium (métal, oxyde, alliage, autres composés).

L'enquête de l'INRS (2009) sur les secteurs d'activité utilisant du béryllium a permis de sélectionner 99 établissements où ont été mesurés les niveaux d'exposition en

<sup>6</sup> C'est-à-dire pour des journées de travail de 8 h, 5 jours par semaine, pendant une vie professionnelle.

béryllium des travailleurs (hors aéronautique et armement). Selon cette enquête, c'est lors des procédés à chaud et des opérations d'usinage (fraisage, tournage, ponçage, polissage), soudage, récupération et recyclage que les salariés risquent d'être le plus exposés aux poussières, fumées et vapeurs toxiques contenant du béryllium (cf. tab. 5 et 6).

Secteur d'activité	Minimum	Maximum	Moyenne
Métallurgie	0,005 µg/m <sup>3</sup>	95,4 µg/m <sup>3</sup>	5,37 µg/m <sup>3</sup>
Fabrication d'équipements de radio, télévision et communication	0,004 µg/m <sup>3</sup>	19,24 µg/m <sup>3</sup>	2,4 µg/m <sup>3</sup>
Fabrication de meubles ; industries diverses	0,005 µg/m <sup>3</sup>	2,19 µg/m <sup>3</sup>	0,46 µg/m <sup>3</sup>
Fabrication d'instruments médicaux, de précision, d'optique et d'horlogerie	0,001 µg/m <sup>3</sup>	2,23 µg/m <sup>3</sup>	0,16 µg/m <sup>3</sup>
Travail des métaux	0,001 µg/m <sup>3</sup>	1,84 µg/m <sup>3</sup>	0,18 µg/m <sup>3</sup>
Commerce de gros et intermédiaires du commerce	0,004 µg/m <sup>3</sup>	0,96 µg/m <sup>3</sup>	0,067 µg/m <sup>3</sup>
Fabrications d'autres matériels de transport	0,005 µg/m <sup>3</sup>	0,15 µg/m <sup>3</sup>	0,008 µg/m <sup>3</sup>
Récupération	0,019 µg/m <sup>3</sup>	0,1 µg/m <sup>3</sup>	0,054 µg/m <sup>3</sup>

Tableau 5 - Exemples de niveaux d'exposition au béryllium dans certains secteurs d'activité (INRS, 2009 ; Données mesurées en 2006).

En rouge, données supérieures à la réglementation actuelle.

Activité	Moyenne
Production d'aluminium	0,39 µg/m <sup>3</sup>
Première transformation du cuivre	2,53 µg/m <sup>3</sup>
Fonderie d'acier	3,44 µg/m <sup>3</sup>
Fonderie de métaux légers	0,017 µg/m <sup>3</sup>
Fonderie d'autres métaux non ferreux	13,02 µg/m <sup>3</sup>

Tableau 6 - Exemples de niveaux d'exposition au béryllium dans certaines activités de la métallurgie (INRS, 2009 ; Données mesurées en 2006).

En rouge, données supérieures à la réglementation actuelle.

Il reste toujours des inconnues dans certains secteurs notamment l'aéronautique et la défense qui n'ont pas participé à l'étude de l'INRS. Les risques dans le secteur du recyclage pourraient également évoluer, étant donnée l'obligation légale récente en Europe de recycler les déchets des équipements électriques et électroniques (DEEE) dont certains contiennent du béryllium (contacteurs en alliage cuivre-béryllium, en particulier).

Une expertise scientifique visant à mettre à jour les VLEP de certains produits dont le béryllium a été confié à l'AFSSET entre 2005 et 2009 puis reprise par l'Anses<sup>7</sup> depuis le 1<sup>er</sup> juillet 2010. Les conclusions de cette étude concernant le béryllium et ses composés, publiées le 1<sup>er</sup> octobre 2010, sont les suivantes :

- le comité d'experts spécialisés propose une réduction de la valeur d'exposition professionnelle VLEP à  $0,01\mu\text{g}/\text{m}^3$ , soit une exposition 200 fois moindre que le seuil précédemment toléré ;
- il s'agit d'une proposition de VLEP basée sur l'établissement d'une « Concentration maximale sans effets nocifs observés » de  $0,2\mu\text{g}/\text{m}^3$  et un facteur de marge de précaution de 20 (division par 20 de cette concentration, pour tenir compte de possible variations de sensibilité individuelle et des incertitudes des études), concernant essentiellement le risque de béryllose chronique. Il est en effet considéré que relation dose/réponse concernant les risques de cancers du poumon n'est pas quantifiable dans l'état des connaissances actuelles ;
- cette valeur devrait également permettre de protéger de l'effet sensibilisant du béryllium et de ses composés (réaction immuno-allergiques) ;
- le conseil d'experts préconise l'usage de la mention « peau » sur le VLEP indiquant une possibilité de pénétration cutanée importante.

Par comparaison, la VLEP au Québec est de  $0,15\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Aux États-Unis, l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) émet aussi une recommandation de baisse à  $0,05\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

On notera qu'un seuil de  $0,01\mu\text{g}/\text{m}^3$  sans distinction de sa forme chimique du béryllium approcherait de l'ordre de grandeur de ce qui pourrait être naturellement observé dans certains milieux empoussiérés sans liens avec cette industrie. En effet, l'abondance naturelle moyenne du béryllium dans la croûte terrestre est estimée à 2,8 ppm. Il suffirait donc de 3,5 mg de poussière minérale de composition moyenne par  $\text{m}^3$  d'air pour atteindre la VLEP proposée de  $0,01\mu\text{g}/\text{m}^3$  de béryllium<sup>8</sup>. Ces teneurs en poussières minérales peuvent être facilement atteintes dans des environnements naturellement empoussiérés tels que les vents de poussière désertique (harmattan) ou les panaches volcaniques. Par exemple une étude récente dans le sud du Niger a montré une teneur de  $1,2\text{mg}/\text{m}^3$  de poussières minérales en suspension dans l'air en moyenne pendant le mois de janvier, au maximum du harmattan, avec des pics à  $13,7\text{mg}/\text{m}^3$  (Ozer et al., 2005), d'où des teneurs en béryllium probablement naturellement supérieures une partie du temps à la VLEP envisagée par l'Anses.

Les poussières générées par les travaux publics, les exploitations de carrières pour granulats, ou même les poussières soulevées par les passages des véhicules sur les pistes africaines, conduisent peut-être aussi, localement, à de tels seuils.

---

<sup>7</sup> L'AFSSET (Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement et du Travail) et l'AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments) ont fusionné en juillet 2010 pour devenir l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail).

<sup>8</sup> 2,8 ppm (partie par million) de 3,5 mg (milligrammes) égal  $0,01\mu\text{g}$  (microgramme).

On déduira des tableaux 5 et 6 que :

- certaines filières de la métallurgie dépasseraient actuellement même la VLEP actuelle de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et devraient donc être améliorées ;
- d'autres secteurs d'activité respectent bien la limite actuelle de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et certains respecteraient même déjà en partie une limite de  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ;
- la filière du retraitement et du recyclage, avec des concentrations données dans le tableau de  $0,019$  à  $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respecterait dans tous les cas une VLEP à  $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (10 fois moins que la norme actuelle) mais dans aucun cas une VLEP qui serait fixée à  $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Un excès de précaution risquerait donc de pénaliser toute l'activité du retraitement et du recyclage.

Sous réserves d'études plus spécifiques, on pourrait penser qu'un seuil de  $0,15$  (VLEP du Québec) à  $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (correspondant à la Concentration maximale sans effets nocifs observés, sans marge supplémentaire de précaution, mais quand même dix fois plus faible que la VLEP actuelle) serait pertinent dans un premier temps et serait déjà un grand progrès sanitaire par rapport à la norme actuelle. Il est évidemment nécessaire de protéger les travailleurs de toute nocivité, mais peut-être sans forcément multiplier les marges de sécurité à l'excès au-delà du nécessaire avéré, ce qui pourrait être au détriment de toute une filière industrielle et de recherche technologique de pointe, ou, à l'aval, de celle du retraitement et du recyclage.

## 7. Conclusions

### 7.1. SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

RISQUES PESANT SUR LES APPROVISIONNEMENTS					IMPACTS ÉCONOMIQUES EN CAS DE TENSIONS SUR LES APPROVISIONNEMENTS
Quantités et concentration géographique des ressources et réserves	Concentration des exploitations minières et des raffineries	Restrictions au libre commerce de la matière première	Existence de problèmes environnementaux spécifiques à la filière	Concentration de la métallurgie	Criticité économique de la filière
4	3	2	4	1	4
<p>Un seul gisement (Spor Mt, USA) fournit actuellement 85 % du béryllium mondial. Il n'y a pas actuellement de blocage géopolitique entre les USA et la France pour la fourniture de béryllium. Une diversification des sources d'approvisionnement est néanmoins souhaitable. Des gisements potentiels, moins exceptionnels que Spor Mt, existent dans de nombreux pays</p>	<p>Une seule société, Brush Wellman (USA) fournit 85% du béryllium mondial. Il n'aurait jusqu'à présent pas refusé de ventes. Néanmoins les USA sont considérés comme acheteurs prioritaires. Des fournisseurs montent en puissance (Chine, Kazakhstan...)</p>	<p>Les USA surveillent la destination des exportations de béryllium (Département du Commerce pour les semi produits, Département de la Défense pour les produits usinés)</p>	<p>Le béryllium est très toxique sous forme de poudre et sous forme de combinés. Il pose en revanche peu de problèmes dans les alliages Cu-Be (environ 2 % de Be) qui constituent 75 % des usages. Mais les réglementations deviennent de + en + strictes, sans forcément faire la distinction. En particulier, la division envisagée par 200 de la VLEP est susceptible de menacer la pérennité de la filière. Le béryllium est peu mobile dans l'environnement</p>	<p>La métallurgie des alliages au béryllium est assez présente en Europe</p>	<p>Le béryllium est mal substituable pour le nucléaire et la défense. Les alliages Cu-Be sont omniprésents dans les contacteurs électroniques dans tous les domaines (industrie, équipements grand public, etc.) et ne seraient substituables qu'avec une perte de fiabilité.</p>

Tableau 7 - Tableau des risques sur l'approvisionnement en béryllium.

La majorité des industriels français éprouve peu de difficulté à s'approvisionner en béryllium. Mais le fait que les producteurs soient peu nombreux conduit à évaluer la criticité sur les approvisionnements à « moyenne » (3 sur 5).

Au niveau impact pour les industries françaises concernées, l'importance stratégique du béryllium est évaluée à « forte » (4 sur 5).

La synthèse des criticités est résumée par la figure 15 ci-après.

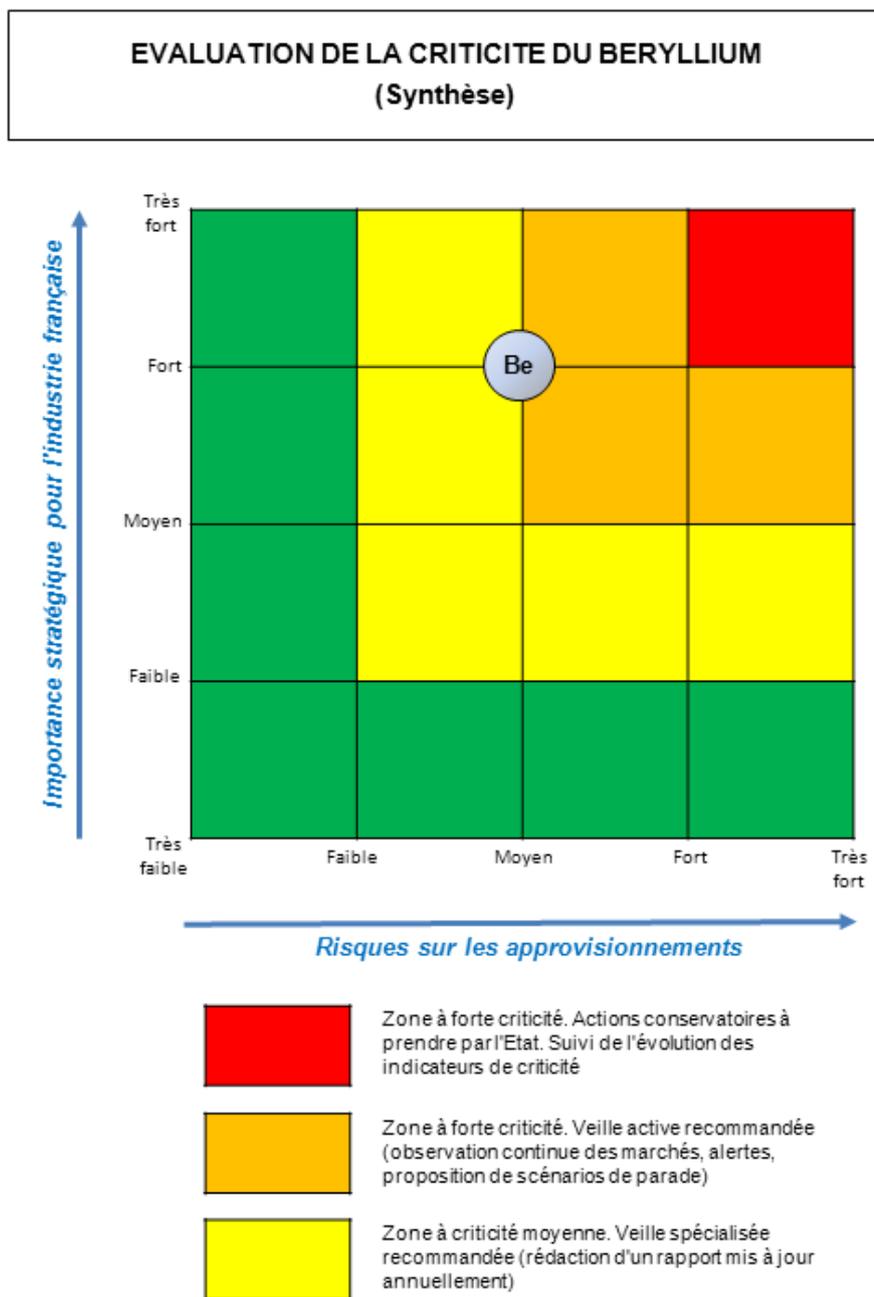


Figure 15 - Synthèse de la criticité du béryllium.

## 7.2. LA PERCEPTION DE LA CRITICITÉ

Le béryllium reste un élément important pour des usages aussi critiques que le nucléaire (réflecteur et modérateur de neutrons) et la défense (instruments de guidage de missiles, gyroscopes...) où il est mal substituable. Il est également utilisé dans de nombreux outils de l'industrie pétrolière, de l'aérospatiale, de mécanique de précision et d'électronique. Son usage a déjà été fortement réduit du fait de sa toxicité et il est difficile de le substituer de ses applications actuelles sans perdre en fiabilité.

Dans leur majorité, les industriels français n'éprouvent pas de crainte vis-à-vis de l'approvisionnement en béryllium. Le principal producteur (Materion Inc., ex-Brush Wellman, USA) ne leur ayant jamais posé de problème d'approvisionnement. Les réserves de béryllium exploitable sont relativement importantes et il existe d'autres gisements dans de nombreux pays. Des fournisseurs comme la Chine et le Kazakhstan montent ainsi en puissance, ce qui, à terme, apportera plus de sécurité sur l'approvisionnement.

Le fait que les producteurs soient peu nombreux peut tout de même créer des craintes pour l'approvisionnement futur. À rappeler également que le producteur majoritaire, Materion / Brush Wellman, avec 85 % de la production mondiale, dépend toujours du Département du Commerce des USA pour obtenir l'autorisation à l'exportation des demi-produits, et du Département de la Défense pour les pièces usinées.

Les transformateurs de béryllium sont assez nombreux en Europe malgré les limitations liées à la toxicité du béryllium. Cette toxicité dépend beaucoup du type de produit, métal, oxyde ou alliage. Or, ceci n'est pas suffisamment pris en compte par l'évolution de la législation actuelle, de plus en plus stricte, ce qui pourrait contribuer à une réduction progressive de la filière béryllium en Europe.

Seul l'approvisionnement en béryllium métal de très haute pureté pose un réel problème pour les utilisateurs spécifiques. En effet, la production d'un tel produit a cessé, et malgré des stocks stratégiques et une consommation très faible (quelques grammes par an), l'entreprise n'a pas de solution de remplacement.

## 7.3. LES PROBLÈMES D'ÉCHELLE ET D'INFORMATION

Le béryllium est un élément toxique qui n'est presque plus utilisé que dans les domaines où il n'est pas substituable. De ce fait, la consommation mondiale est très faible, de l'ordre de quelques centaines de tonnes de métal par an.

De plus les procédés de tri, de transformation et de raffinage du minerai sont assez complexes, et il n'y a que trois usines de traitement, Delta aux USA qui traite le minerai du plus gros gisement (SporMountain, USA), Ulba au Kazakhstan et Ningxia en Chine.

Il existe de nombreux autres gisements potentiels d'échelle moindre, mais leur coût de production serait plus élevé. Au vu de la consommation actuelle, il est peu probable que soient mis en exploitation de nouveaux districts compte tenu des investissements qui seraient nécessaires.

Par ailleurs, la connaissance de l'offre et la demande reste imprécise. De nombreux pays comme la Chine ou la Russie ne communiquent pas sur leur production, leurs gisements éventuels ou leurs stocks stratégiques résiduels. Ainsi, pour tenter de résoudre l'équation de la criticité du béryllium, on ne peut qu'estimer les possibilités d'ouverture du marché sur de nouveaux producteurs.

De manière réciproque, il est difficile de connaître les réels besoins de l'industrie française. Ces besoins étant souvent de faibles quantités, la création de stocks stratégiques peut biaiser la perception des besoins réels des industriels. De même pour des utilisations stratégiques telles le nucléaire (centrales conventionnelles, ITER...) ou la défense, les besoins réels sont difficiles à estimer par manque de publication de données.

#### **7.4. DÉVELOPPEMENT DE LA VEILLE ÉCONOMIQUE**

En considérant la forte criticité du béryllium liée à ses différents usages stratégiques et le nombre limité de producteurs de béryllium, et bien que l'approvisionnement ne pose pas de problème actuellement, il est fortement recommandé de maintenir une veille spécialisée sur cet élément, sur l'évolution des filières de production et de transformation, sur l'évolution de ses usages (nucléaire, électronique, aérospatial, etc.).

#### **7.5. DÉVELOPPEMENT DE LA CONNAISSANCE DU POTENTIEL MINÉRAL FRANÇAIS ET EUROPÉEN**

En ce qui concerne les ressources françaises, comme européennes, il est peu envisageable dans un avenir proche de développer une filiale de production à partir des gisements spécifiques de béryllium. Les sources d'approvisionnement de l'élément sont aujourd'hui fiables, bien que peu diversifiées, et la consommation est trop faible pour justifier de tels investissements.

Cependant, cette option pourrait être reconsidérée positivement à l'issue d'une évaluation plus générale des ressources en métaux critiques du territoire national. S'il est procédé par exemple à une réévaluation des gisements de coupoles à étain tungstène (Échassières, Trégennec), de pegmatite ou de complexes alcalins à Nb, Ta, Terre Rares, Zr et Y, on pourra recommander d'en évaluer les ressources connexes en béryllium.

À l'échelle de l'Union Européenne, il pourrait être proposé une réévaluation des teneurs et ressources en béryllium des divers gisements de pegmatites et de coupoles à étain tungstène ou greisen (Portugal, Irlande)

On pourra aussi recommander des actions de recherche destinées :

- à améliorer le recyclage contrôlé des déchets de béryllium non seulement primaires mais aussi secondaires (produits finis en fin de vie...) ;
- à améliorer les procédés de traitement du minerai de béryllium et le raffinage de son métal ;

- à étudier la possibilité de récupération de béryllium dans les cendres de certains charbons (Pologne).

## **7.6. DÉVELOPPEMENT DES RELATIONS BILATÉRALES AVEC LES PAYS PRODUCTEURS**

Pour assurer un approvisionnement stable en béryllium de l'industrie française, il serait utile de développer les relations bilatérales spécifiques avec les différents pays producteurs de béryllium, notamment les USA, le Kazakhstan et la Chine.

## **7.7. AMÉLIORATION DE LA CONNAISSANCE DES RISQUES SANITAIRES ET PROMOTION D'UNE RÉGLEMENTATION PROTECTRICE RAISONNÉE**

La toxicité du béryllium dépend aussi du type de produit, métal, oxyde ou alliage. Or ceci n'est pas suffisamment pris en compte par les études récentes (INRS, Afsset puis Anses) destinées à faire évoluer la législation actuelle, de plus en plus stricte. Une meilleure spécification des risques liés à la toxicité du béryllium par type de produit est donc recommandée. Ceci pourrait protéger la filière européenne de métallurgie du béryllium de contraintes non justifiées et continuer à permettre un usage raisonné de cet élément.



## Bibliographie

**AFSETT** (2010) - Expertise en vue de la fixation de valeurs limites d'exposition à des agents chimiques en milieu professionnel. Évaluation des effets sur la santé et des méthodes de mesure des niveaux d'exposition sur le lieu de travail pour le béryllium et ses composés. Rapport d'expertise collective, 74 p. [www.anses.fr](http://www.anses.fr)

**ANSES** (2010) - Avis de l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à la proposition de valeurs limites d'exposition à des agents chimiques en milieu professionnel, Évaluation des effets sur la santé et des méthodes de mesure des niveaux d'exposition sur le lieu de travail pour le béryllium et ses composés. [www.anses.fr](http://www.anses.fr)

**Aubert G.** (1969) - Les coupoles granitiques de Montebras et d'Échassières (Massif Central français) et la genèse de leurs minéralisations en étain, lithium, tungstène et béryllium. *Mémoires du BRGM*, n° 46, 349 p.

**Barbery G., Robert J.C.** (1977) - Étude de la valorisation de minerais polymétalliques disséminés et fins. Rapport BRGM 77 SGN 392 MIN, 45 p., 35 ann.

**Bariand P., Cesbron F., Geffroy J.** (1978) - Les minéraux, leurs gisements, leurs associations. Tome 2 : Minéraux de concentration d'éléments communs et d'éléments rares, 298 p.

**Béziat P., Bornuat M.**, avec la collaboration de Gentilhomme Ph. et Huijbregts Ch. (1995) - Carte minière de la France métropolitaine à 1/1 000 000. Situation 1994. Notice explicative. BRGM Ed., 102 p.

**Biz Acumen** (2009) - Beryllium.A Global Market Perspective. November 2009. BRM-5011. Biz Acumen, Inc., USA. 59 p.

**Blazy P., Jdid E.H.** (2005) - Métallurgie du béryllium. *Techniques de l'ingénieur*. [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr).

**Bonnard N., Brondeau M.T., Protois J.C., Schneider O.** (2006) - Fiche toxicologique FT92 - béryllium et composés minéraux. INRS, 8 p. [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr).

**Burkowicz A., Galos K., Kamyk J., Kobylec K., Lewicka E., Smakowski T., Szlugaj J.** (2009) - Minerals Yearbook of Poland 2007.

**Burnol L.** (1974) - Géochimie du béryllium et types de concentration dans les leucogranites du Massif Central français. Relations entre les caractéristiques géochimiques des granitoïdes et les gisements endogènes de type départ acide (Be, Sn, Li) ou de remaniement tardif (U, F, Pb et Zn). *Mémoires du BRGM*, n° 85, 168 p.

**European Commission** (2010) - Critical raw materials for the E. Commission Européenne, DG Entreprises (Bruxelles, Belgique). <http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/>

**Foley N.K., Seal R.R., Piatak N.M., Hetland B.** (2010) - An Occurrence Model for the National Assessment of Volcanogenic Beryllium Deposits. USGS, Open-File Report 2010-1195.

**INRS Institut National de Recherche et de Sécurité** (2009) - Le béryllium, métal discret mais dangereux. <http://www.inrs.fr/dossiers/beryllium.html>

**Jébrak M. et Marcoux E.** (2008) - Géologie des ressources minérales. *Société de l'Industrie Minérale*. 667 p.

**Lindsey D.A.** (1977) - Epithermal Beryllium Deposit in Water-Laid Tuff, Western Utah. *Economic Geology*, Vol. 72, 1977, p. 219-232.

**Lulzac Y**, avec la collaboration de Apolinarski F. (1986) - Inventaire du territoire métropolitain. Les minéralisations à étain, tantale et lithium de Tréguennec (Finistère). État des connaissances au 31 mars 1986. Rapport BRGM 86 DAM 011 OP4, 16 p.

**McNeil D.** (2005) - Beryllium. Roskill Mineral Services.

**Ozer P., Bodart C. et Tychon E.** (2005) - Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental : récentes modifications et impacts environnementaux. *Cybergeo*, European Journal of Geography, article 308. <http://cybergeo.revues.org/3338>.

**Routhier P.** (1963) - Les gisements métallifères. Géologie et principes de recherches. Masson et Cie. 1 282 p.

**Schiller E. A.** (1985) - Beryllium – geology, production and uses. *Mining Magazine*, avril 1985, p. 317-322.

**Soja A.A., Sabin A.E.** (1986) - Beryllium Availability – Market, Economy Countries. A Minerals Availability Appraisal. US Bureau of Mines, 19 p.

**Vincent R., Catani J., Créau Y., Frocaut A.M., Good A., Goutet P., Hou A., Leray F., André-Lesage M.A., Soyez A.** (2009) - Exposition professionnelle au béryllium dans les entreprises françaises. Évaluation des niveaux d'exposition atmosphérique et de contamination surfacique. INRS, Point de repère HST PR45-220. *Annals of Occupational Hygien*, Vol.53, No.4, p. 363-372. [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)

**Zajec O, Anquez M.** (2010) - Stratégies de sécurisation des approvisionnements en matériaux critiques. Audit de perception industrielle. Béryllium, Molybdène, Rhénium, Sélénium, Tellure. Rapport de la CEIS, 95 p.



**Centre scientifique et technique**  
**Service ressources minérales**  
3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34