

Panorama 2010 du marché du sélénium

BRGM/RP-60202-FR
Août 2011

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

J.F. Labbé
avec la collaboration de
P. Christmann

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

<p>Vérificateur :</p> <p>Nom : Patrick LEBRET</p> <p>Date : 5/10/2011</p> <p>Signature :</p> 

<p>Approbateur :</p> <p>Nom : Christian BRAUX</p> <p>Date : 6/10/2011</p> <p>Signature :</p> 

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 : Sélénium, Stratégie économique, Stratégie des matières premières, Économie, Matières premières minérales, Industrie, Politiques publiques.

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

Labbé J.F. et Christmann P., avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2011) - Panorama mondial 2010 du marché du sélénium. BRGM/RP-60202-FR, 90 p., 18 fig., 17 tabl.

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

Résumé

LE SÉLÉNIUM

Le sélénium est l'élément n° 34 du tableau de Mendeleïev. C'est un métalloïde de la famille du soufre avec des propriétés chimiques voisines. C'est un élément très peu abondant de l'écorce terrestre (50 ppb). Sa production annuelle est de l'ordre de 2 700 tonnes, essentiellement comme sous-produit de l'exploitation minière du cuivre. Son prix était de 100 US\$/kg en moyenne sur octobre-novembre 2010. Le sélénium représente donc un marché mondial de l'ordre de 270 MUS\$.

Propriétés et usages

Le sélénium est un semi-conducteur dont la conductivité augmente fortement avec l'intensité de l'éclairage, d'où des usages électroniques multiples en photo-détection. Il a aussi des propriétés photovoltaïques, d'où un usage en développement récent, en particulier sous forme de séléniures complexes (filière des panneaux photovoltaïques en couche minces CIGS).

Son adjonction en quantité minime dans certains aciers et autres alliages (cuivre, etc.) en facilite l'usinabilité (« aciers de décolletage »). Il est aussi utilisé en catalyse de la production de manganèse électrolytique.

Certains de ses composés ont des propriétés colorantes, d'où des usages en pigments (plastiques) et décoloration et coloration du verre.

Le sélénium est toxique à forte dose, mais c'est un oligoélément indispensable à la santé humaine et animale à très faible dose. Il a des vertus anti-oxydantes et anti-âge et aide à lutter contre certains cancers, d'où un usage dans des compléments alimentaires et en pharmacie (homme et animal) et dans des engrais pour garantir une teneur suffisante en sélénium dans les produits agricoles.

La répartition de ses usages est la suivante :

- industrie du verre (décoloration et coloration) : 32 % à 40 % ;
- métallurgie (amélioration de l'usinabilité) : 23 % à 27 % ;
- agriculture (engrais, alimentation du bétail) : 15 % ;
- composants électroniques (dont photorécepteurs, photovoltaïque) : 10 % ;
- pigments : 9 à 10 % ;
- autres (chimie, pharmacie, divers) : 5 à 10 %.

La consommation pour la plupart des usages devrait suivre une croissance modérée proche de la croissance globale, sauf la consommation pour la filière photovoltaïque en couches minces CIGS, où, d'une consommation totale de 1 t en 2007 au démarrage de

la filière, il est prévu un besoin de 165 t en 2030 et de 336 t en 2050 (Angerer *et al.*, 2009).

Substituabilité

En tant qu'oligoélément pour la santé humaine et animale, le sélénium n'est pas substituable. Pour certains usages industriels, il existe des substitutions possibles (silicium pour les panneaux photovoltaïques, soufre pour l'usinabilité des aciers, etc.), malgré des propriétés non exactement équivalentes (les panneaux photovoltaïques au silicium ont par exemple un plus mauvais bilan énergétique).

Ressources

L'abondance moyenne du sélénium dans la croûte terrestre est estimée à 50 ppb (50 mg/t), soit moins que l'argent ou le mercure. Seuls le tellure, le bismuth, l'or, les platinoïdes et le rhénium sont moins abondants.

Le sélénium ayant des propriétés chimiques voisines de celles du soufre, il se retrouve en petites quantités dans la plupart des sulfures métalliques naturels et en particulier dans les gisements de cuivre et de cuivre-nickel sulfurés. Il n'existe pas de gisements de sélénium. Celui-ci n'est extrait que comme sous-produit d'exploitations de cuivre et de cuivre-nickel, plus rarement de plomb-zinc.

Il est très difficile d'estimer les ressources et réserves minières mondiales en sélénium car, contrairement au cas du cuivre et des autres métaux de base, les opérateurs miniers qui évaluent leur gisement et déclarent des ressources et des réserves pour ces substances, ne les déclarent pas (et ne les évaluent pas) pour le sélénium. L'USGS estime les réserves à 88,5 kt¹ (George, 2011) et les « réserves base » (ressources les plus susceptibles d'être exploitables) à 172 kt (George, 2009). Une estimation mise à jour évalue les ressources à 320 kt de sélénium extractible. Pour une production annuelle actuelle de 2,7 kt, il n'y a pas de problème de disponibilité à court-moyen terme avec les ressources connues. Pour le moyen-long terme, la recherche prévisible de nouvelles ressources et réserves en cuivre pour faire face à la demande en ce métal devrait permettre l'accroissement des ressources en sélénium liées, mais dans les limites de l'accroissement matériellement possible de la production de cuivre, qui n'est pas indéfini.

Production

Le sélénium est produit par le retraitement des boues anodiques résiduelles issues de l'électroraffinage du cuivre, et accessoirement des mattes de nickel.

¹ Dans tout le document, « t » désigne la tonne métrique (= 1 000 kg), et « kt » désigne la kilotonne, soit 1 000 t ou 10⁶ kg).

Une cinquantaine de raffineries de cuivre récupèrent leurs boues anodiques (USGS, 2009), dont une trentaine en extrait le sélénium (décompte BRGM, ce rapport). Elles se répartissent dans des pays variés (Japon, Canada, Belgique, Russie, Suède, Pologne, Chili, Kazakhstan, Finlande, Philippines, Chine, Pérou, Mexique, Inde, Allemagne, USA...), sous le contrôle de sociétés variées (Xstrata, Freeport, Codelco, Norilsk, Southern Copper, Boliden, KGHM, Jiangxi Copper, etc. au niveau minier, Umicore, Aurubis, 5NPlus, Nippon M&M, Mitsui M&M, Nikko Shoji, Pacific Rare Metals and Chemicals, etc. au niveau raffinage).

Vu le large éventail de pays producteurs et de sociétés productrices, la situation du sélénium est très peu monopolistique.

Mais seule une minorité des sociétés productrices publient leur production, et seuls de rares pays publient leur production nationale (Canada, Japon, Pologne). Il est donc très difficile de rassembler les chiffres de production mondiale de sélénium.

L'USGS a publié en janvier 2011 un tableau de production mondiale de 2 260 t en 2010, mais en précisant qu'il n'intégrait pas la production américaine (gardée confidentielle) ni celle d'autres pays producteurs tels que la Chine, le Kazakhstan, la Pologne ou le Mexique. Compte tenu du faible recyclage et d'une consommation évaluée à 2 700 t (Metal-Pages, 2008), la production primaire annuelle est vraisemblablement d'au moins 2 500 t.

La production de sélénium provenant essentiellement du traitement des résidus d'électroraffinage du cuivre, l'accroissement prévisible de la production de cuivre, estimé à environ 4 % par an, devrait permettre une croissance parallèle de la production de sélénium d'environ 4 % par an aussi. Ceci devrait permettre, techniquement, de soutenir une croissance de la demande du même ordre.

Il n'y a en France ni exploitations minières métalliques sulfurées, ni raffineries de cuivre. Il n'y a donc pas de production de sélénium.

Il y a une production minière européenne à partir des mines de cuivre de Pologne (KGHM) et de Suède (Boliden), et des raffineries productrices principalement en Belgique (Umicore), en Allemagne (Aurubis), qui dépendent de concentrés importés, et en Suède et en Finlande (Boliden).

Recyclage

Seul le sélénium utilisé en électronique est recyclable. Le sélénium qui a été utilisé dans les anciens tambours de photocopieurs est en bonne partie recyclé en fin de vie. Les panneaux photovoltaïques au sélénium (CIGS) ne sont apparus que très récemment (développement à partir de 2007), et ne pourront devenir une source de sélénium recyclé qu'en fin de leur vie, à partir de 2030 et au-delà. Les usages du sélénium en verrerie, en métallurgie, en pigmentation, en agriculture, en alimentaire et en pharmacie sont très dispersifs et ce sélénium n'est pratiquement pas recyclable.

On estime entre 100 et 200 t la quantité de sélénium secondaire produite annuellement à partir du recyclage (moins de 10 % de la consommation annuelle).

Prix

Le prix du sélénium est resté assez faible et stable entre 6,6 et 8,9 US\$/kg entre début 2001 et mi-2003, puis a nettement augmenté pour osciller entre 35 et 120 US\$/kg depuis mars 2004. Il s'est stabilisé vers 80 US\$/kg entre mars et août 2010, pour remonter à 105 US\$/kg en novembre 2010. Malgré la modestie de son marché, le sélénium est l'un des éléments dont le prix s'est le plus fortement accru depuis le début des années 2001-2003.

Les raisons qui ont justifié l'accroissement récent du prix du sélénium sont vraisemblablement liées à un déficit de l'offre par rapport à la demande, mais ce déficit est difficile à établir avec précision, du fait de l'absence de statistiques fiables sur l'offre : la production rapportée ne couvre que 55 à 75 % de la consommation, elle-même peu précisément connue. Il est donc difficile aussi de pronostiquer une évolution des prix.

Les besoins émergents en sélénium liés au développement des panneaux solaires CIGS devraient continuer à conforter la demande.

Néanmoins, pour la plupart des usages et même pour l'industrie du photovoltaïque CIGS, les quantités utilisées sont très faibles et le prix du sélénium est peu significatif dans celui du produit final : les industries utilisatrices seront davantage sensibles à la disponibilité physique du sélénium.

Les utilisateurs français

Quelques sociétés françaises utilisent ou commercialisent du sélénium et communiquent à ce sujet (sites Internet des sociétés) – sans toutefois que soient publiées les quantités utilisées ou vendues :

- *AzelisElectronics* (division d'*Azelis Arnaud*) fournit de matériaux semi-conducteurs, dont du sélénium et ses composés, pour l'industrie des composants électroniques.
- *MCP-France* (filiale commerciale de la société britannique *Mining and ChemicalProducts Ltd*) et *Alfa Aesar France* (filiale de la société allemande de produits chimiques *Alfa Aesar*, elle-même filiale du groupe américain *Johnson Matthey*), commercialisent du sélénium et certains de ses composés.
- *Nexcis* est une jeune société française créée en 2008 qui prévoit produire des panneaux CIGS mais n'a pas encore démarré de production industrielle. Elle a inauguré le 3 mars 2010 son unité de conception de modules photovoltaïques de nouvelle génération à Rousset (13). Elle se fournit auprès d'*Alfa Aesar France* et d'*Umicore* (Belgique).
- *L'Oréal* utilise du sélénium pour certains produits de soins et de cosmétique.

D'autres sociétés françaises utilisent probablement du sélénium mais ne fournissent pas d'information en ligne à ce sujet. À titre indicatif, on pourra citer :

- *Saint-Gobain*, le n° 2 mondial du vitrage et du verre de conditionnement, est probablement consommateur de sélénium pour son industrie verrière (verres décolorés, verres colorés, verres à faible transmission thermique). Saint-Gobain est aussi impliqué dans la filière CIGS des panneaux photovoltaïques au travers de sa filiale allemande Avancis (usine à Torgau, Allemagne).
- Les sociétés impliquées dans l'électronique utilisent probablement du sélénium, pas forcément individualisé comme tel, dans certains de leurs composants électroniques ou optiques (par exemple *Alcatel Lucent* ou *Thalès*).
- Les constructeurs automobiles (PSA, Renault) utilisent vraisemblablement du sélénium, non individualisé comme tel, dans certains alliages (aciers), dans les vitrages et dans certains de leurs composants électroniques.
- La société minière et métallurgique française *Eramet* consomme vraisemblablement de petites quantités de sélénium pour sa branche Alliages.

De nombreux *laboratoires pharmaceutiques* proposent des compléments alimentaires avec des oligoéléments dont du sélénium, sous forme de comprimés, gélules et ampoules, des crèmes de soins au sélénium, ainsi que des médicaments. Mais la consommation globale en sélénium de cette branche est probablement minime, vu les quantités infinitésimales entrant dans la composition des produits finis.

L'industrie française de l'alimentation du bétail concerne 214 entreprises en France. Elle produit annuellement 21,2 millions de tonnes d'aliments composés. Beaucoup sont complétés avec des vitamines et des oligoéléments minéraux. On citera par exemple des compléments alimentaires bovins dosés à 400 à 800 µg/kg. Il n'a pas été trouvé de statistiques totalisant la consommation française de sélénium dans cette branche (ordre de grandeur possible d'une dizaine de tonnes). L'enquête de CEIS, focalisée dans un premier temps sur les industries technologiques, pourra être étendue aux agro-industries. L'enjeu est d'importance puisque la consommation mondiale de sélénium pour l'agriculture est évaluée à 15 % du total, soit 400 t annuelles, soit davantage aujourd'hui que ce qui est anticipé comme besoin pour le photovoltaïque en 2050 (336 t d'après Angerer *et al.*, 2009).

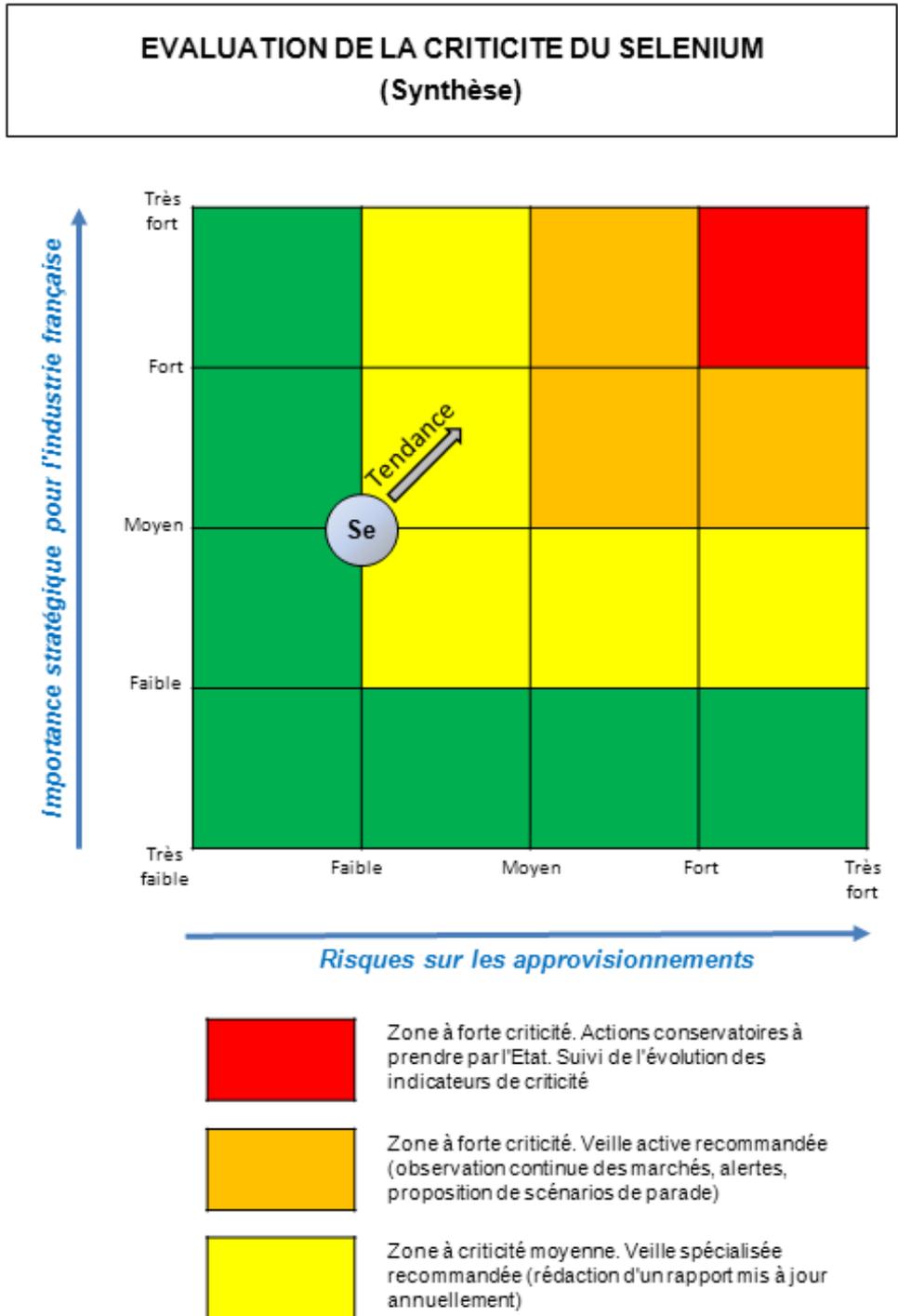
Criticité

Vu le nombre élevé et la répartition variée des producteurs de sélénium et les quantités minimales utilisées par les industriels français, la criticité sur les approvisionnements est évaluée à « faible » (2 sur 5).

Le sélénium est bien entendu critique pour une société comme Nexcis dont l'objet principal est le photovoltaïque CIGS. Pour la plupart des autres utilisateurs, il est considéré comme peu critique compte tenu des faibles quantités utilisées. La criticité industrielle du sélénium est évaluée à « moyenne » (3/5). Elle pourra toutefois être

appelée à s'accroître au fur et à mesure du développement de la filière photovoltaïque CIGS.

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



Propositions

Pour mieux appréhender la criticité sur la disponibilité et l'équilibre offre-demande et donc l'évolution des prix, il serait souhaitable d'avoir une meilleure connaissance statistique chiffrée de la production.

Les producteurs importants de sélénium de l'Union Européenne, comme Umicore (Belgique), Aurubis (Allemagne) et Boliden (Suède) ne publient pas leur production. De la même manière, les États-Unis considèrent leur production comme confidentielle et non publiable. Il serait souhaitable d'entreprendre des efforts, déjà au niveau européen, pour accroître la publication de statistiques pour cette filière².

On pourra aussi chercher à améliorer la perception de la consommation en France par des recherches d'informations complémentaires auprès des industriels, en particulier dans les secteurs du verre et de l'alimentation du bétail, par exemple.

Il est recommandé de maintenir la veille sur cet élément et la possible évolution de ses usages.

Au niveau des ressources, en cas de succès des recommandations plus générales de relance d'acquisition de connaissances sur les ressources minérales du territoire national, on pourra recommander, s'il est procédé à une réévaluation des amas sulfurés français (Chessy, Rouez...), d'en évaluer les teneurs en sélénium et sa récupérabilité.

On pourra aussi recommander des projets de recherche destinés :

- à améliorer le recyclage et à étudier la recyclabilité à partir de certains des usages pour l'instant dispersifs (verre) ;
- à étudier la récupérabilité du sélénium à partir d'autres sources (soufre, uranium, charbon, résidus de raffinage du pétrole, etc.).

² Dans les limites des exigences de la confidentialité industrielle. Mais une entreprise comme par exemple Boliden publie précisément et sans problème, dans ses rapports annuels entre autres, sa production de cuivre, de zinc, de plomb, d'argent et d'or. On peut penser que non-publication de la production de sélénium n'est peut-être pas due au caractère confidentiel et stratégique de ce chiffre mais plutôt que cette donnée est omise car considérée comme très secondaire et marginale.

Sommaire

1. Introduction	19
1.1. DÉFINITIONS	19
1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE	20
1.3. SOURCES DES DONNÉES.....	20
2. Le sélénium	23
2.1. DONNÉES DE BASE	23
2.2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.....	24
2.3. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES	24
2.4. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES ET TOXICITÉ.....	25
3. Usages, consommation, prix.....	27
3.1. USAGES DU SÉLÉNIUM PAR DOMAINES	27
3.1.1. Industrie du verre	27
3.1.2. Métallurgie	28
3.1.3. Agriculture	29
3.1.4. Électronique / Photoréception / Photovoltaïque	29
3.1.5. Pigments	33
3.1.6. Chimie.....	33
3.1.7. Pharmacie, parapharmacie, diététique, alimentation humaine.....	33
3.2. USAGES DU SÉLÉNIUM PAR COMPOSÉS	36
3.3. ÉVOLUTION RÉCENTE ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION À MOYEN TERME.....	36
3.4. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DES USAGES DANS LES PROCHAINES ANNÉES	39
3.4.1. Photovoltaïque	39
3.4.2. Photorécepteurs, xérographie	42
3.4.3. Autres usages	42
3.5. SUBSTITUTIONS.....	42
3.5.1. Verrerie	42
3.5.2. Pigments	42
3.5.3. Métallurgie	42

3.5.4. Électronique - Xérogaphie	43
3.5.5. Photovoltaïque	43
3.5.6. Agriculture, alimentation, pharmacie.....	43
3.6. RECYCLAGE	43
3.7. LES PRIX ET LES MARCHÉS DU SÉLÉNIUM : ÉVOLUTION ET SPÉCIFICITÉS	43
3.7.1. Évolution récente et historique des prix	44
3.7.2. Évolution future des prix	47
4. Ressources et production mondiale.....	49
4.1. LES SOURCES DE SÉLÉNIUM	49
4.1.1. Abondance du sélénium dans l'écorce terrestre	49
4.1.2. Minéraux et minerais	49
4.1.3. Principaux types de gisements	51
4.1.4. Gisements et potentiel en France	52
4.2. RESSOURCES ET RÉSERVES.....	53
4.2.1. Estimation publiée par l'USGS.....	54
4.2.2. Actualisation de l'estimation sur la base des ressources en cuivre sulfurés	55
4.3. PRODUCTION	58
4.3.1. Données récentes et actuelles	58
4.3.2. Facteurs sous-tendant l'évolution de la production au cours des prochaines années	63
5. La filière industrielle.....	65
5.1. DU MINÉRAI AU MÉTAL : ÉTAPES DE LA TRANSFORMATION.....	65
5.1.1. Grillage alcalin oxydant	65
5.1.2. Grillage sulf atant	67
5.1.3. Purification du sélénium	67
5.1.4. Procédé hydrométallurgique sur mattes nickelifères.....	67
5.2. LES PRODUCTEURS DE SÉLÉNIUM	68
5.2.1. Europe.....	68
5.2.2. CEI	70
5.2.3. Amériques	70
5.2.4. Asie	73
5.2.5. Afrique.....	75
5.2.6. Océanie.....	75
5.2.7. La Selenium-Tellurium Development Association (SDTA)	75

5.3. DU MÉTAL AU PRODUIT FINI : ÉTAPES AVAL DE LA FILIÈRE	75
5.3.1. Les acteurs français	75
5.3.2. Autres acteurs européens	81
5.3.3. Les principaux acteurs dans le reste du monde.....	82
6. Conclusions	85
6.1. SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ	85
6.2. COMMENTAIRES SUR LA PERCEPTION DE LA CRITICITÉ	86
6.3. LE PROBLÈME STATISTIQUE	87
6.4. DÉVELOPPEMENT DE LA VEILLE ÉCONOMIQUE	87
6.5. DÉVELOPPER LA CONNAISSANCE DU POTENTIEL MINÉRAL FRANÇAIS ET EUROPÉEN.....	87
Bibliographie.....	89

Liste des figures

Figure 1 -	Position du sélénium (Se) dans le tableau périodique des éléments.....	23
Figure 2 -	Répartition des usages du sélénium en 2008.	27
Figure 3 -	Coupe d'une cellule photovoltaïque CIGS.	31
Figure 4 -	Répartition des panneaux photovoltaïques par technologie en 2008.	31
Figure 5 -	Quelques exemples de compléments alimentaires au sélénium.	35
Figure 6 -	Évolution de la consommation en sélénium par continent et par usages, d'après GIA, 2008.....	37
Figure 7 -	Comparaison de la répartition des usages du sélénium entre 1993 et 2008.....	38
Figure 8 -	Évolution de la capacité photovoltaïque mondiale cumulée d'ici jusqu'en 2050 selon trois scénarios (axe de gauche) et selon les technologies dans le scénario réaliste (axe de droite), © IZT, avril 2010, adapté.	41
Figure 9 -	Évolution de la demande annuelle en sélénium pour la production de cellules photovoltaïques CIGS jusqu'en 2050 (© IZT, avril 2010).....	41
Figure 10 -	Sélénium élémentaire en poudre, en granules et en pastilles.	44
Figure 11 -	Évolution du prix du sélénium à 99,5 % rendu Union Européenne depuis 2001.....	45
Figure 12 -	Évolution du prix annuel moyen du sélénium depuis 1909.	45
Figure 13 -	Répartition indicative des ressources minières potentielles en sélénium.	56
Figure 14 -	Répartition mondiale des ressources minières en cuivre connues en 2009.	57
Figure 15 -	Évolution historique de la production et de la consommation de sélénium.	61
Figure 16 -	Position de la production des boues anodiques à sélénium et autres éléments dans le processus de production de cuivre par pyrométallurgie.	66
Figure 17 -	Exemples de produits cosmétiques et diététiques au sélénium.....	80
Figure 18 -	Synthèse de la criticité du sélénium.	86

Liste des tableaux

Tableau 1 -	Les isotopes naturels du sélénium.	24
Tableau 2 -	Efficacité et impacts comparés de différentes technologies photovoltaïques.	32
Tableau 3 -	Parts de Se, In, Ga et Cu dans les panneaux photovoltaïques CIGS.	32
Tableau 4 -	Apports journaliers recommandés en sélénium pour l'être humain.	34
Tableau 5 -	Contenu en sélénium de quelques aliments (source: Anses).	35
Tableau 6 -	Usages des principaux composés du sélénium (d'après Bisson et al., Ineris, 2009).....	36
Tableau 7 -	Prévision de capacité de production photovoltaïque d'ici 2050, avec part CIGS et CdTe.	40

Tableau 8 - Prévion de besoins en éléments rares pour le photovoltaïque en couche mince d'ici 2050.	40
Tableau 9 - Comparatif des facteurs multiplicatifs des prix des matières premières minérales entre la moyenne de 2002 (sur 1 an) et octobre-novembre 2010 (sur 2 mois).	48
Tableau 10 - Teneur en sélénium des principaux minéraux source (d'après Jdid & Blazy, 2008)	50
Tableau 11 - Teneur en sélénium des principaux minéraux des gisements de cuivre-nickel de Norilsk (d'après Sindeeva, 1964).....	50
Tableau 12 - Estimations des réserves primaires en sélénium, en t, d'après l'USGS.....	54
Tableau 13 - Production de sélénium par pays, telle que publiée par l'USGS.....	58
Tableau 14 - Récapitulatif de la production mondiale de sélénium par pays, selon les sources. Tentative de réconciliation.....	60
Tableau 15 - Estimation d'un ordre de grandeur de la capacité de production minière de sélénium par pays.	62
Tableau 16 - Catalogue de produits séléniés commercialisés par Azelis Electronics.	76
Tableau 17 - Composantes de la criticité du sélénium.	85

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 matière(s) première(s) minérale(s) étudiée(s). 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 par géochimie, géophysique, etc.

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. 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, le BRGM n'est pas en mesure de garantir l'exactitude des informations et des données citées. L'industrie du sélénium est peu transparente et les données ouvertes peuvent être incomplètes et/ou sujettes à erreurs, intentionnelles ou non. Peu de données sont disponibles sur l'éventuelle production de sélénium de nombreux pays, dont en particulier les Etats-Unis dont l'organisme qui publie habituellement les statistiques minérales du pays, l'USGS, précise qu'il ne publie pas la production nationale en raison de son caractère confidentiel.

À noter que le sélénium ne fait pas partie des 41 substances minérales dont la criticité a été analysée 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 (« CriticalMaterials for the E.U. », Commission Européenne, 30 juillet 2010). Il ne fait donc *a fortiori* pas partie des 14 matières premières minérales retenues comme particulièrement stratégiques dans cette étude.

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) (George, 2008 et 2010) ;
- le document « Selenium, a Global Strategic Business Report », une étude spécialisée sur le sélénium produite par Global IndustryAnaysts, Inc. (GIA) en avril 2008 ;
- le document « Métallurgie du Sélénium et du Tellure » (Jadida & Blazy, juin 2008) publié par « Techniques de l'Ingénieur » ;

- le document « Selenium, Global Market Overview » publié par Metal-Pages en 2008 ;
- la fiche de données toxicologiques et environnementales du sélénium et de ses composés publiée par l'Ineris (Bisson et al, 2009) ;
- le document « Selenium, contrary stuff » (Vulcan, T, février 2010) publié par Hard Assets Investors, le site d'information de la société américaine de gestion de placements Van Eck and Associates ;
- la présentation sur Internet de la « Selenium-Tellurium Development Association », apparemment non mise à jour depuis 2002.
- 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 sélénium

2.1. DONNÉES DE BASE

Le sélénium (Se) est un élément métalloïde du groupe VI-A du tableau de Mendeleïev, qui comprend aussi l'oxygène, le soufre, le tellure et le polonium :

- symbole : Se ;
- numéro atomique : 34 ;
- masse atomique : 78,96 ;
- abondance dans la croûte terrestre : 50 ppb (50 mg/t) (cf. 4.1.1).

	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	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Acti- nides :	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

Figure 1 - Position du sélénium (Se) dans le tableau périodique des éléments.

Le sélénium a été découvert en 1817 par le chimiste suédois Jöns Jakob Berzelius dans les résidus rouges de grillage de la pyrite de la mine de Fahlun, en Suède, utilisée pour la fabrication de l'acide sulfurique. Son nom a été dérivé de Séléné, la déesse grecque de la Lune, par similarité avec le Tellure, élément proche du Sélénium, découvert un peu plus tôt et nommé d'après la Terre.

Il existe six isotopes naturels du sélénium, dont cinq stables et un faiblement radioactif (Tab. 1). D'autres isotopes, instables et radioactifs, ont été produits artificiellement, en particulier ^{75}Se et ^{79}Se .

Isotope	Abondance naturelle	Période radioactive
⁷⁴ Se	0,87 %	stable
⁷⁶ Se	9,36 %	stable
⁷⁷ Se	7,63 %	stable
⁷⁸ Se	23,78 %	stable
⁸⁰ Se	49,61 %	stable
⁸² Se	8,73 %	1,08 x 10 ²⁰ a

Tableau 1 - Les isotopes naturels du sélénium.

2.2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Sous sa forme pure, le sélénium est solide à température ambiante et se présente sous deux formes désordonnées (forme amorphe et forme vitreuse), et sous trois formes cristallines, les variétés monocliniques α et β et la variété trigonale grise, ou « sélénium gris » :

- densité :
 - . Sélénium amorphe : 4,28,
 - . Sélénium monoclinique : 4,46,
 - . Sélénium trigonal gris : 4,81 ;
- point de fusion : 217 °C ;
- point d'ébullition : 685 °C.

Le sélénium gris est semi-conducteur sensible à la lumière : sa conductivité augmente jusqu'à 200 fois en fonction de l'intensité de l'éclairage. Sa conductivité électrique varie aussi en fonction de la tension appliquée, de la fréquence du courant et de la température. D'où son usage historique pour des cellules photoélectriques et les photocopieurs. Le sélénium a aussi des propriétés photovoltaïques (conversion de lumière en électricité) où son usage est en développement, en particulier sous forme de séléniures complexes (cf. § 3.1.4.).

2.3. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

Le sélénium a des propriétés chimiques proches de celle du soufre. Il se trouve d'ailleurs dans la nature essentiellement en substitution en très faible proportion du soufre dans les minéraux sulfurés.

Ses états d'oxydation les plus courants sont :

- 0 (sélénium élémentaire) ;
- -2 (séléniures semblables aux sulfures : H_2Se , Cu_2Se , $ZnSe$, $CdSe$, $Cu(Ga,In)Se_2$, etc.). C'est sous cette forme que le sélénium se rencontre généralement dans les roches et minerais à l'abri de l'oxydation atmosphérique. La plupart des minéraux

identifiés de sélénium sont des séléniures, ou bien le sélénium est dispersé en remplacement marginal du soufre dans certains sulfures ;

- +4 (sélérites, semblables aux sulfites : SeO_2 , H_2SeO_3 , Na_2SeO_3 , sélérites de divers métaux). C'est généralement sous forme de sélérites hydratés que se présentent les minéraux individualisés de sélénium dans les parties oxydées des gisements sulfurés ;
- +6 (séléates, semblables aux sulfates : H_2SeO_4 , etc.). Les séléates sont bien plus instables que les sulfates. Ils ont un fort pouvoir oxydant, et contrairement aux sulfates ils ne se rencontrent presque jamais sous forme de minéraux.

Le sélénium élémentaire brûle dans l'air avec une flamme bleue pour donner du dioxyde de sélénium SeO_2 . Le sélénium forme aussi des composés organiques dont la production s'est développée à partir des années 1960 pour usages dans les domaines de l'agriculture, la pharmacie et la biologie (diéthylthiocarbamate de sélénium, sélénométhionine, sélémourée, sélélocystéine, etc.).

2.4. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES ET TOXICITÉ

Le sélénium est un oligoélément indispensable à la santé humaine et animale à très faible dose. Il a aussi des vertus médicales et pharmaceutiques qui ont fait l'objet d'abondantes études scientifiques. Mais il est toxique à plus forte dose (cf. § 3.1.7.).

Le sélénium élémentaire et les séléniures métalliques ont une faible toxicité car ils sont peu bio-disponibles, mais les sélérites et séléates, ainsi que le séléniure d'hydrogène (H_2Se), gazeux, sont très toxiques.

3. Usages, consommation, prix

3.1. USAGES DU SÉLÉNIUM PAR DOMAINES

Les données sur la répartition des usages du sélénium selon les secteurs sont très variables selon les sources (USGS, STDA, GIA, Retorte). Pour 2007-2008, elle serait la suivante :

- industrie du verre (décoloration et coloration) : 32 % à 40 % ;
- métallurgie : 23 % à 27 % ;
- agriculture (engrais, alimentation du bétail) : 15 % ;
- composants électroniques (dont photorécepteurs, photovoltaïque) : 10 % ;
- pigments : 9 à 10 % ;
- autres (chimie, pharmacie, divers) : 5 à 10 % ;

pour une consommation totale de sélénium estimée à 2 693 t en 2008.

Répartition approximative des usages du sélénium en 2008

(sources mixées USGS, GIA, Retorte, STDA)

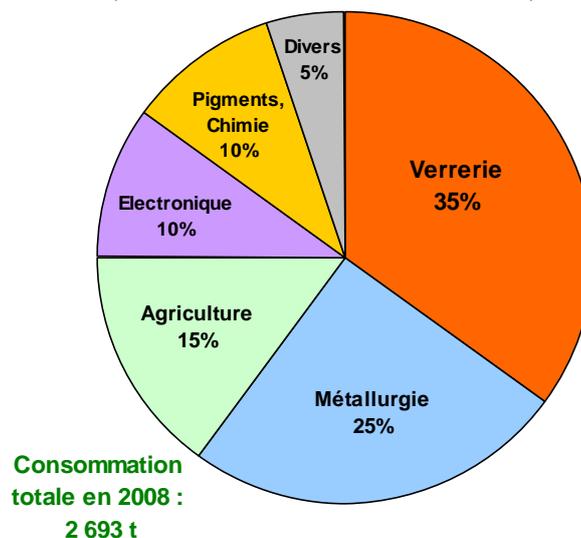


Figure 2 - Répartition des usages du sélénium en 2008.

3.1.1. Industrie du verre

Le sélénium est principalement utilisé pour décolorer les verres, pour en neutraliser la teinte verdâtre due à des impuretés ferrugineuses. Il est aussi utilisé pour colorer le verre en rouge vif, par exemple pour les feux rouges de signalisation. Le sélénium réduit aussi la transmission thermique des vitres dans les voitures et l'architecture.

L'USGS (2004), citant Hoffmann & King (1997) et Roskill (1988), fournit les précisions suivantes :

- **Décoloration du verre** : la silice naturelle (sable), même ultra-pure, utilisée pour la production du verre, contient toujours quelques centièmes de % d'oxydes de fer, qui colorent légèrement le verre. On peut ajouter un peu de trioxyde d'arsenic au verre en fusion pour oxyder les ions ferreux en ions ferriques, puis on neutralise la couleur résiduelle en ajoutant du sélénium, sous forme élémentaire ou de sélénite de baryum (BaSeO_3) ou de sodium (Na_2SeO_3), ce qui donne un verre clair et incolore. Selon la teneur en fer du verre, on ajoute 10 à 30 g de sélénium par tonne de verre. Seuls environ 20 % de ce sélénium sont retenus dans le verre, le reste est perdu par volatilisation à partir du verre fondu.
- **Coloration du verre** : l'ajout de 0,05 à 1 % de sélénium dans le verre fondu dans des conditions oxydantes colore le verre en rose. L'ajout de 1 % de sélénium et jusqu'à 2 % de sulfure de cadmium (CdS) sous conditions réductrices donne des verres allant du jaune-orange au rouge rubis, par micro-cristallisation au sein du verre de sulfoséléniure de cadmium. Les verres rouge-rubis obtenus ainsi transmettent très bien la lumière rouge avec une coupure spectrale nette, et sont largement utilisés pour les feux rouges de signalisation routière ou maritime. D'autres couleurs peuvent être obtenues par l'ajout d'oxydes de sélénium combinés avec d'autres oxydes (antimoine, arsenic, bismuth, cobalt, fer...).
- **Absorption thermique** : avec des oxydes de cobalt et de fer et du sulfure de cadmium, le sélénium, à une concentration d'environ 1 kg par tonne, donne les verres gris neutre atténuant la transmission de la chaleur pour l'automobile (pare-brises teintés etc.) et l'architecture (immeubles modernes de bureaux, etc.). Selon les dosages, on obtient les verres architecturaux gris foncé à bronze.

3.1.2. Métallurgie

Du sélénium peut être ajouté en petites quantités dans certains aciers et alliages de cuivre pour en améliorer l'usinabilité (permettant un usinage plus rapide, plus précis, avec une meilleure finition de surface, et avec une moindre usure des outils).

On peut ajouter ainsi 0,04 à 0,08 % de sélénium, en complément ou en remplacement du soufre et du plomb pour la production des aciers de décolletage au carbone (aciers destinés à un usinage fin et précis)³, et 0,15 % de sélénium dans certains aciers inoxydables (Inox 302, 303, 430), dans lesquels il réduit la porosité et réduit encore la sensibilité à la corrosion.

L'amélioration de l'usinabilité des aciers est plus souvent obtenue par du soufre (0,2 à 0,35 %) et éventuellement du plomb (0 à 0,35 %), mais le remplacement du soufre par le sélénium atténue certains effets indésirables sur la résistance à la corrosion ou la ténacité.

³ Les fabricants d'aciers de décolletage, ou « Free-cuttingsteels », consultés (sites web) ne présentent pas dans leurs catalogues d'aciers au sélénium. Ils présentent une série d'aciers au soufre et au plomb.

On peut ajouter entre 0,025 et 1 % de sélénium au cuivre ou à certains de ses alliages aussi pour en améliorer l'usinabilité ou leur aptitude au moulage.

Du sélénium peut aussi être ajouté dans certains alliages de plomb pour les mêmes raisons.

Du sélénium peut être ajouté au plomb de certaines batteries au plomb pour affiner le grain des plaques de plomb, en particulier dans les batteries hybrides au calcium (plaques positives au plomb-antimoine-sélénium et plaques négatives au plomb-calcium).

Dans le processus de production de manganèse électrolytique, on peut ajouter dans l'électrolyte jusqu'à 2 kg de dioxyde de sélénium (SeO_2) par tonne de manganèse électrolytique produit (Merchant R&C, 2009), à la place du dioxyde de soufre (SO_2), pour accroître l'efficacité et la productivité en diminuant la consommation d'énergie.

3.1.3. Agriculture

Du sélénium est ajouté à certains engrais, par exemple en Chine, en Finlande, en Nouvelle-Zélande (GIA, 2008) pour pallier des déficits naturels en sélénium dans certains sols. Il est ajouté dans certains aliments du bétail en complément alimentaire et dans certains traitements vétérinaires pour le contrôle de certaines maladies et pour favoriser la croissance et la fertilité⁴.

3.1.4. Électronique / Photoréception / Photovoltaïque

Le sélénium élémentaire et des alliages au sélénium sont utilisés dans les photorécepteurs des tambours de photocopieurs et d'imprimantes laser, des récepteurs de Rayons X pour l'imagerie médicale, pour les détecteurs infrarouge, des redresseurs de courant, des protecteurs de surtension, des cellules photoélectriques, et plus récemment pour certains types de cellules photovoltaïques en couche mince. Les analystes généralistes (USGS, etc.) ont souvent regroupé ces différents usages sous le terme d'« Electronique ».

- **Photocopie par xérogaphie** (USGS, 2004) : depuis leur première apparition commerciale en 1959, les photocopieurs xérogaphiques en noir et blanc sur papier utilisaient jusqu'à il y a peu des tambours photorécepteurs au sélénium. Le photorécepteur utilise les propriétés photoconductrices du sélénium, c'est-à-dire sa propriété d'être isolant dans le noir et conducteur lorsqu'il est éclairé. Il est déposé sous forme d'un film de 50 à 60 μm sur les tambours des photocopieurs par sublimation sous vide. Le photorécepteur est chargé électrostatiquement, puis exposé à l'image : là où l'image est claire, la charge s'évacue. On amène ensuite en face une poudre de toner avec une charge électrostatique inverse, qui adhère donc seulement sur les parties du photorécepteur correspondant aux parties sombres de

⁴ Les vertus vétérinaires du sélénium sont bien documentées et ont fait l'objet de nombreuses études et publications scientifiques qui dépassent le cadre de la présente étude.

l'image. La poudre de toner est ensuite transférée sur le papier blanc et y est fixée par chauffage. Les premières imprimantes laser noir et blanc apparues au début des années 1990 utilisent ce même principe.

On a d'abord utilisé du sélénium amorphe pur, mais qui était fragile et devait être fréquemment remplacé, puis on a amélioré avec des alliages et composés contenant aussi de l'arsenic ou du tellure.

De nombreux photocopieurs et imprimantes laser au sélénium sont encore en usage, mais dans les appareils récents (depuis la fin des années 1990) le sélénium est de plus en plus remplacé par des photorécepteurs organiques, en particulier pour les copieurs et imprimantes laser couleur et pour les appareils grand public.

Les photorécepteurs organiques deviennent plus performants, sont moins chers, et sont soumis à moins de contraintes réglementaires environnementales.

À l'inverse, le recyclage des récepteurs au sélénium, encouragé pour des raisons environnementales, était aussi la source majeure de sélénium secondaire.

- **Redresseurs de courant** : les redresseurs au sélénium consistent en une plaque d'acier ou d'aluminium revêtue d'un film d'1 μm de nickel ou de bismuth, sur lequel on dépose 50 à 60 μm de sélénium dopé aux halogènes, puis un film d'alliage de cadmium. Ces redresseurs sont plus efficaces et plus fiables, mais bien plus coûteux, que les diodes classiques au silicium, et sont surtout utilisés sur des marchés de niche (postes à soudeuse à arc, etc.).
- **Cellules photoélectriques** : une cellule photoélectrique au sélénium classique consiste en une fine couche de sélénium sur un substrat métallique et recouvert par un film très fin d'or, translucide. Une lumière incidente peut en multiplier la conductance par 1000, d'où des usages pour une multitude de dispositifs sensibles à la lumière, dont des cellules détectrices, des photomètres et des capteurs photo numériques.

En détection infrarouge, le séléniure de plomb (PbSe) est sensible à l'intervalle spectral de longueur d'onde de 1,5 à 5,2 μm .

- **Cellules et panneaux photovoltaïques** : le sélénium est désormais utilisé pour les cellules photovoltaïques en couche mince, sous forme de diséléniure de cuivre et d'indium, CuInSe_2 (« CIS »), ou de diséléniure d'indium et de gallium, Cu(In,Ga)Se_2 , ou disulfoséléniure d'indium et de gallium Cu(In,Ga)(S,Se)_2 (« CIGS »), tous composés ayant une structure de chalcopyrite. La figure 2 présente une coupe schématique d'une cellule CIGS. L'épaisseur de la couche de CIS ou CIGS est de 2 μm .

La première génération de panneaux photovoltaïques, en silicium mono ou polycristallin, conserve la majorité du marché (environ 85 % des panneaux en 2010). Une deuxième génération de panneaux, en couche mince, arrive progressivement depuis 2007 sur le marché. Leurs techniques de production industrielle ont été mises au point depuis quelques années et continuent à s'améliorer. Les cellules en couche mince sont composées de feuillets très minces de quelques μm d'épaisseur (voir fig. 2), contre 200 μm pour les cellules au silicium cristallin. D'où des gains de masse et de coût.

Les technologies en couche mince se partagent essentiellement entre le silicium amorphe, le tellure de cadmium (CdTe) et le CIS-CIGS.

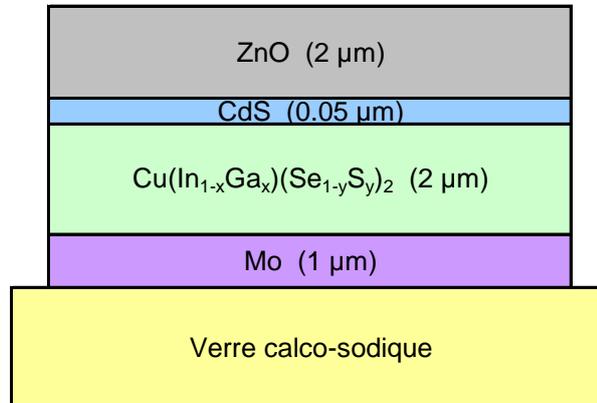


Figure 3 - Coupe d'une cellule photovoltaïque CIGS.
(d'après Angerer *et al.*, 2009, lui-même d'après Falk, 2006)

En 2007, pour 4,3 GWc⁵ de puissance photovoltaïque installée dans le monde, les couches minces en représentaient 10,1 %, desquels 5 % étaient des CIGS (Syndicat des Energies Renouvelables, 2008, et Angerer *et al.*, 2009). En 2008, pour 7.6 GWc installés, les couches minces seraient passées à 14 %, desquels 15 % étaient des CIGS (159 MWc), selon l'USGS :

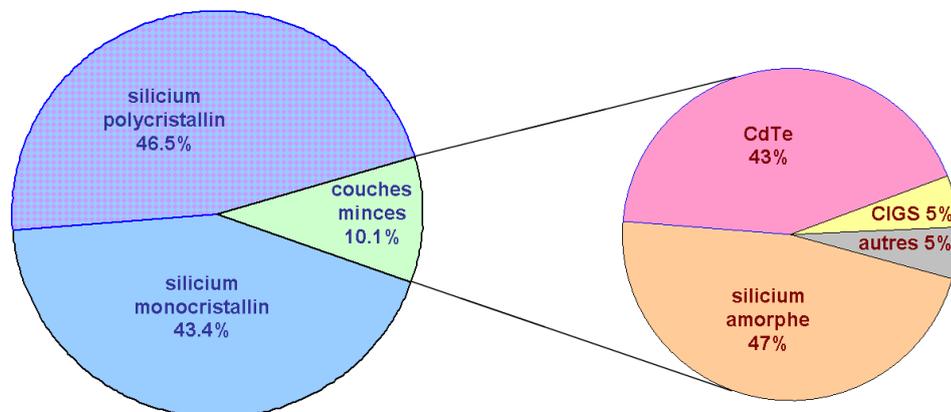


Figure 4 - Répartition des panneaux photovoltaïques par technologie en 2008.
(Source : USGS ajusté avec les données du Syndicat des Energies Renouvelables)

Le rendement énergétique des cellules CIGS est actuellement de 9 à 11 % pour les produits commerciaux et atteint 19 % en laboratoire.

⁵ Le « watt-crête » (« Wc ») utilisé dans l'industrie photovoltaïque est l'unité de mesure de la puissance électrique maximale produite par des cellules ou panneaux photovoltaïques sous une énergie lumineuse reçue de 1 000 W/m² et pour une température des panneaux de 25 °C. 1 kWc = 1 000 Wc, 1 MWc = 10⁶Wc, 1 GWc = 10⁹Wc.

Même si le rendement des cellules en couches minces reste moindre que celui des cellules au silicium cristallin, leur impact environnemental global est moindre (Tableau 2). Les cellules en couches minces ont aussi un rendement qui décroît moins vite que celles au silicium lorsque l'énergie lumineuse décroît (ciel voilé ou nuageux).

Ces cellules et les panneaux qui en sont constitués sont aussi plus légers que les panneaux en couche épaisse au silicium et leur installation peut donc être étendue à tout type de toiture sans renforts de charpente spécifiques.

Type de cellule	Rendement de cellule	Rendement par panneau	Surface de panneau pour 3 kWc	Surface active pour 3 kWc	Capacité de production	Coût CO ₂ à la fabrication par kWc	Demande énergétique à la fabrication par kWc
Si monocristallin	15.3%	14.0%	21.4 m ²	19.6 m ²	140 Wc/m ²	18 kg CO ₂ -Equ.	355 MJ-Equ.
Si polycristallin	14.4%	13.2%	22.8 m ²	20.8 m ²	132 Wc/m ²	13 kg CO ₂ -Equ.	264 MJ-Equ.
Si-ruban	13.1%	12.0%	25.0 m ²	22.9 m ²	120 Wc/m ²	10 kg CO ₂ -Equ.	191 MJ-Equ.
Si amorphe en couche mince	6.5%	6.5%	46.5 m ²	46.5 m ²	65 Wc/m ²	4.1 kg CO ₂ -Equ.	66 MJ-Equ.
CIGS	10.7%	10.7%	28.1 m ²	28.1 m ²	107 Wc/m ²	12 kg CO ₂ -Equ.	215 MJ-Equ.
CdTe	7.6%	7.1%	42.2 m ²	39.2 m ²	71 Wc/m ²	4.1 kg CO ₂ -Equ.	73 MJ-Equ.

Wc = Watt-crête, puissance électrique produite sous une énergie lumineuse reçue de 1000 W/m²

Tableau 2 - Efficacité et impacts comparés de différentes technologies photovoltaïques.
(source : Ecoinvent, 2007 & 2008)

Pour 1 kWc de puissance installée sous forme de panneau CIGS, il faut actuellement les quantités suivantes (Tableau 3) :

par kWc	Selon IZT (avril 2010)	Selon Fraunhofer (févr.2009)	Selon USGS (2009)	Composition stoechiométrique de CuGaSe ₂	Composition stoechiométrique de CuInSe ₂
Sélénium	46 g	29 g	52%	54%	47%
Indium	34 g	50 g	28%		34%
Gallium	44 g	44 g	10%	24%	
Cuivre	non précisé	non précisé	10%	22%	19%

Remarque : IZT et Fraunhofer publient les masses nécessaires pour 1 kWc de puissance photovoltaïque CIGS installée. L'USGS publie les pourcentages des différents métaux. La couche mince étant réputée être du diséléniure de cuivre, de gallium et d'indium selon la formule Cu(Ga,In)Se₂, Ga et In se substituant l'un l'autre en proportions variables, on donne pour référence la composition des pôles CuGaSe₂ et CuInSe₂. On observe qu'il est vraisemblable qu'il y ait une erreur dans les données du Fraunhofer, qui fait du sélénium l'élément nettement minoritaire alors qu'il est nettement majoritaire pour tous les autres auteurs.

Tableau 3 - Parts de Se, In, Ga et Cu dans les panneaux photovoltaïques CIGS.

On constate que les chiffres et proportions sont variables selon les sources. Ce qui peut soit indiquer que les technologies et proportions des divers éléments dans le CIGS sont variables selon les fabricants, ou bien que les informations sont gardées confidentielles par les fabricants et ne sont pas communiquées.

En 2010, la puissance installée en photovoltaïque CIGS est estimée à 600 MWc, soit 2,8 % du photovoltaïque total, et les besoins en sélénium pour cet usage seraient de l'ordre de 6 tonnes pour l'année 2010 (soit 0,25 % de la consommation mondiale).

Mais la puissance photovoltaïque installée est appelée à croître fortement, ainsi que la proportion d'installations en couches minces dont le CIGS. Cet usage du sélénium est donc très probablement celui qui est appelé à un plus grand développement dans les prochaines années, d'où une augmentation de la demande en sélénium, ainsi qu'en indium et gallium (cf. § 3.4).

Le sélénium ainsi utilisé devrait pouvoir être recyclable, mais les panneaux photovoltaïques ayant une durée de vie espérée d'au moins 25 ou 30 ans, il n'arrivera pas de tels déchets au sélénium sur le marché du recyclage avant quelques dizaines d'années.

3.1.5. Pigments

Le sélénium est utilisé sous forme de sulfoséléniures de cadmium, Cd(S,Se), sous diverses proportions pour produire des couleurs oranges, rouges et marron dans les céramiques, les émaux, les plastiques, les peintures, les encres pour des produits exposés à des conditions agressives (chaleur, humidité, ultraviolets, expositions chimiques).

La présence de cadmium, élément très toxique, dans les pigments au sulfoséléniure de cadmium, a conduit à une baisse de leur usage depuis les années 1990 dans les peintures et revêtements, avec le développement de substituts.

3.1.6. Chimie

Le sélénium est utilisé dans certains lubrifiants, comme additif dans certains caoutchoucs, comme fongicide et pour la production de certains catalyseurs en chimie organique.

Il est aussi utilisé pour le brunissage des armes à feu, pour des produits destinés à donner une patine antique, pour la production d'amorces et détonateurs dans l'industrie des explosifs.

3.1.7. Pharmacie, parapharmacie, diététique, alimentation humaine

(NB : ce secteur est en général inclus dans le secteur Chimie dans la plupart des données statistiques)

Le sélénium est utilisé comme substance active sous forme de sulfure de sélénium dans les shampoings antipelliculaires (0,5 à 1 % SeS ou SeS₂).

Il entre dans la composition de certains médicaments, en particulier comme substance anticancéreuse (doses de 100 à 200 µg/jour), et dans des traitements dermatologiques⁶.

Le sélénium est aussi utilisé pour des compléments alimentaires humains, étant un oligo-élément indispensable à la santé et aidant, à dose adaptée, à la prévention de certains désordres et maladies. Il a des vertus anti-oxydantes et améliore la protection contre le vieillissement. Ses apports journaliers recommandés pour l'homme sont de 20 à 70 µg par jour selon l'âge, le sexe et le poids (Tab. 4). Les recommandations de l'ANSES⁷ d'apport journalier en sélénium se résument comme suit :

Enfants de 1 à 12 ans (progressif selon âge)	20 à 40 µg
Adolescents de 12 à 19 ans et femmes adultes	50 µg
Hommes adultes, femmes enceintes ou allaitantes, femmes au-delà de 55 ans	60 µg
Hommes au-delà de 65 ans	70 à 80 µg

Tableau 4 - Apports journaliers recommandés en sélénium pour l'être humain.

Les traces naturelles de sélénium dans l'alimentation humaine normale sont en général suffisantes pour subvenir aux besoins, mais il existe des carences dans certaines régions du monde où les sols et donc les produits agricoles sont particulièrement pauvres en sélénium. Ces carences peuvent induire des problèmes cardiaques, osseux ou neuromusculaires. À l'inverse, ses bénéfices incluent une contribution à la lutte contre le vieillissement des cellules, au renforcement du système immunitaires, à une diminution des risques cardiovasculaires et de cancer. Ces éléments s'appuient sur de nombreuses études épidémiologiques et pharmacologiques, dont certaines se poursuivent.

Les quantités de sélénium naturellement contenues dans des aliments usuels sont, pour 100 grammes :

Thon, maquereau, moules, foie, rognons	40 à 100 µg
Dinde, rôti de porc, colin, cabillaud, saumon, moutarde	20 à 40 µg
Hamburger, pizza, œufs, pâtes aux œufs, jambon cuit, haricots secs	10 à 20 µg

⁶ Les vertus médicales et pharmaceutiques du sélénium sont bien documentées et ont fait l'objet de très nombreuses études et publications scientifiques, qui dépassent le cadre de la présente étude.

⁷ ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire, anciennement AFSSA, Agence Française de Sécurité Sanitaire et Alimentaire, ayant changé de nom au 1/07/2010.

Fromages, pain, biscuits, lentilles	3 à 10 µg
-------------------------------------	-----------

Tableau 5 - Contenu en sélénium de quelques aliments (source: Anses).

On trouve dans le commerce en France et ailleurs (pharmacie et parapharmacie, y compris dans les rayons parapharmacie et compléments alimentaires des grandes surfaces) et sur Internet des comprimés et gélules contenant pour la plupart entre 15 à 50 µg de sélénium (Fig.5).



Figure 5 - Quelques exemples de compléments alimentaires au sélénium.
(Sources : Sites de vente sur Internet).

Il est recommandé de ne pas dépasser 400 µg/jour. À bien plus forte dose, une toxicité apparaît, avec possibilité de « sélénose », avec des symptômes d'haleine alliagée, de désordres gastro-intestinaux, de perte de cheveux, d'irritabilité et de dommages neurologiques, et allant dans les cas extrêmes à la cirrhose du foie, l'œdème pulmonaire et la mort.

NB : On notera que, pour une population mondiale de 7 milliards d'êtres humains qui consommeraient en moyenne 40 µg/j de sélénium (forte proportion d'enfants), les besoins annuels seraient d'environ de 100 t de sélénium. Même si le quart de ce besoin devait être couvert par des compléments alimentaires artificiels, cela ne représenterait qu'environ 1 % de la demande mondiale actuelle en sélénium, estimée de l'ordre de 2 500 t. Cet usage est donc assez peu significatif sur le marché mondial du sélénium.

3.2. USAGES DU SÉLÉNIUM PAR COMPOSÉS

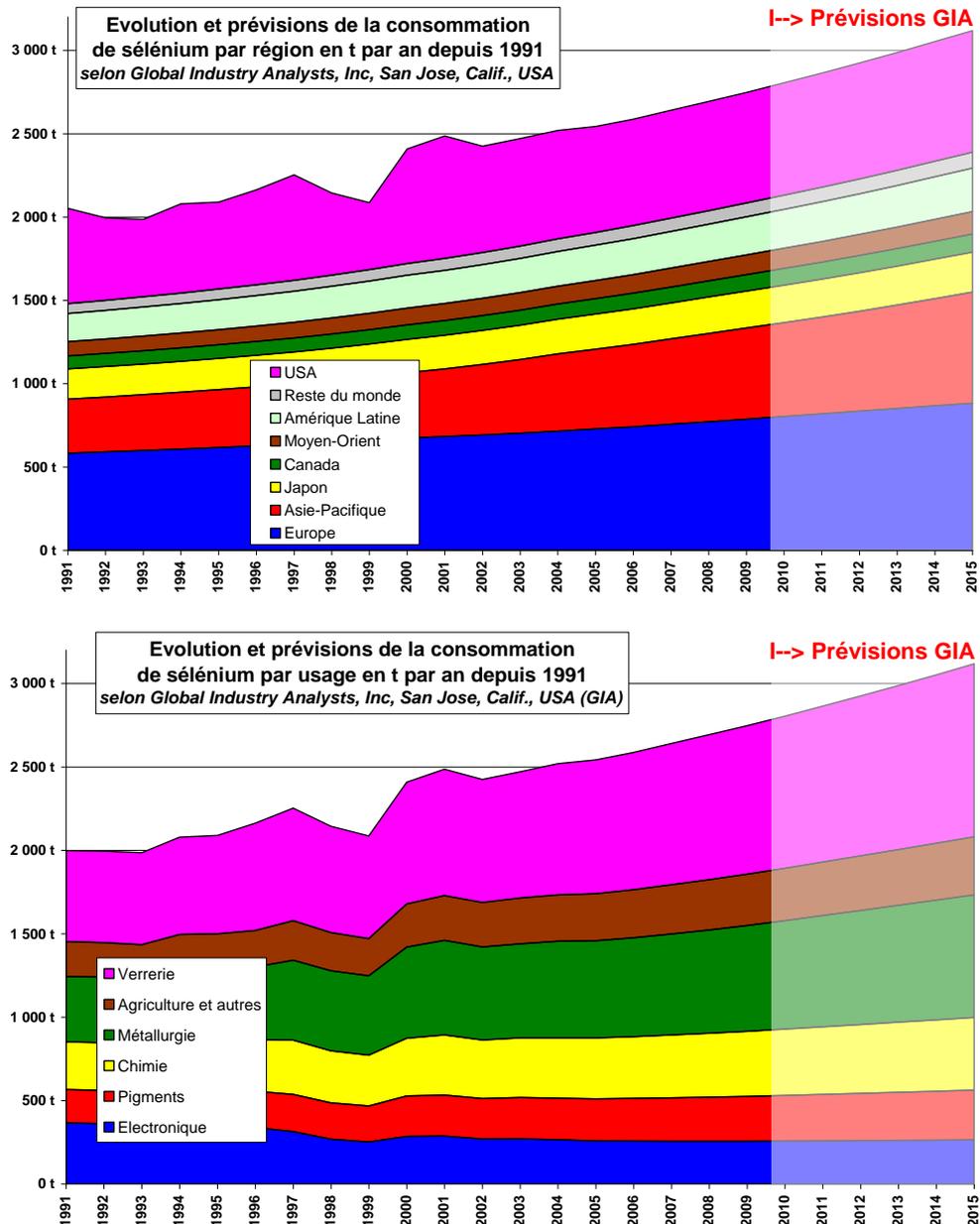
Le tableau 6 ci-dessous récapitule l'usage des principaux composés du sélénium.

Composé	Formule	Utilisation	N° CAS
Sélénium élémentaire	Se	Redresseurs, cellules photoélectriques, détonateurs, tambour de photocopieurs, industrie du verre, métallurgie (aciers), catalyseur pour déshydrogénation.	7782-49-2
Séléniat de sodium	Na ₂ SeO ₄	Insecticides, industrie du verre, médecine vétérinaire.	13410-01-0
Sélénite de sodium	Na ₂ SeO ₃	Industrie du verre, additif de sols ne contenant pas de sélénium	10102-18-8
Disulfure de sélénium	SeS ₂	Médecine vétérinaire, Shampoing anti-pelliculaire.	7488-56-4
Sulfure de sélénium	SeS	Shampoing anti-pelliculaire, utilisation en médecine humaine et vétérinaire comme oligo-élément.	7446-34-6
Dioxyde de sélénium	SeO ₂	Catalyseur pour des procédés d'oxydation, d'hydrogénation, de déshydrogénation dans la synthèse de composés organiques.	7446-08-4
Hexafluorure de sélénium	SeF ₆	Isolant électrique gazeux.	7783-79-1
Oxychlorure de sélénium	SeOCl ₂	Solvant du soufre, du sélénium, du tellure, du caoutchouc, de la bakélite, des gommes, des résines, de la glu, de l'asphalte et autres matériaux.	7791-23-3
Séléniure d'aluminium	Al ₂ Se ₃	Préparation du séléniure d'hydrogène pour les semiconducteurs.	1302-82-5
Sélénite d'ammonium	(NH ₄) ₂ SeO ₃	Industrie du verre rouge, feux de signalisation.	7783-19-9
Séléniure de cadmium	CdSe	Photoconducteurs, cellules photoélectriques, redresseurs.	1306-24-7
Diséléniure de cuivre et indium	CuInSe ₂	Cellules photovoltaïques en couches minces (CIS)	
Diséléniure de cuivre, indium et gallium	Cu(In,Ga)Se ₂	Cellules photovoltaïques en couches minces (CIGS)	
Séléniat de cuivre	CuSeO ₄	Coloration du cuivre et des alliages de cuivre.	10041-45-5
Diséléniure de tungstène	WSe ₂	Additifs des lubrifiants.	12067-46-8
Diéthylthiocarbamate de sélénium	[(C ₂ H ₅) ₂ NCS] ₂ Se	Fongicide, plasturgie, agent vulcanisant	144-34-3
Sélenocystéine	H-Se-CH-NH ₂ COOH	Pharmacie et biologie	
Sélenométhionine	H-Se-(CH ₂) ₂ -CH-NH ₂ COOH		
Diméthylséléniure	CH ₃ -Se-CH ₃		
Autres composés organiques du sélénium	(divers)		

Tableau 6 - Usages des principaux composés du sélénium (d'après Bisson et al., Ineris, 2009).

3.3. ÉVOLUTION RÉCENTE ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION À MOYEN TERME

Les données statistiques primaires de consommation comme de production sont très partielles et très incomplètes. La société américaine d'études de stratégie industrielle « Global Industry Analysts, Inc. » (GIA) a publié en 2008 une synthèse de l'évolution de la consommation de sélénium depuis 1991 et des perspectives d'évolution jusqu'à 2015, par grande zone géographique et par grande famille d'usages, présentées dans les graphiques de la figure 6.



NB : Pour le GIA, les zones géographiques prennent en considération les pays suivants :

- Europe : Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Russie, Slovaquie, Suède, Suisse, Tchéquie, Turquie ;
- Asie-Pacifique (hors Japon) : Australie, Chine, Corée du Sud, Inde, Indonésie, Malaisie, Nouvelle-Zélande, Philippines, Singapour, Taiwan, Thaïlande ;
- Moyen-Orient : Arabie Saoudite, EAU, Iran, Iraq, Israël, Koweït, Syrie ;
- Amérique Latine : Argentine, Brésil, Chili, Colombie, Equateur, Mexique, Pérou, Venezuela.

Figure 6 - Évolution de la consommation en sélénium par continent et par usages, d'après GIA, 2008.

Mais ces données du GIA et leur représentation graphique sur la figure 6 doivent être prises avec prudence et appellent plusieurs réserves :

- le GIA ne spécifie pas ses sources. Vu par ailleurs la difficulté d'obtenir les chiffres aux sources (seules de rares sociétés et de rares pays donnent leurs chiffres de

production), il est vraisemblable que les nombres sont bien plus estimés qu'établis sur de véritables statistiques à la source ;

- le GIA fournit des données avec 5 chiffres significatifs (consommations données en tonnes, qui sont généralement de l'ordre de plusieurs centaines de tonnes, que ce soit par usage ou par zone géographique, avec deux décimales), ce qui n'est peu compatible avec le fait qu'il souligne que les données jusqu'à 2010 sont données à $\pm 10\%$ et les estimations pour 2011-2015 à $\pm 15\%$;
- mis à part les données de consommation pour les États-Unis jusqu'à 2003⁸, toutes les courbes montrent une progression très régulière et très lisse, malgré des nombres donnés à deux décimales. Ceci laisse penser que tous les chiffres n'ont été obtenus que par calculs à partir d'un taux de croissance estimé *a priori* et non pas sur la base de vraies données statistiques prises à la source et vérifiées.

En conséquence, les courbes fournies par le GIA ne doivent être prises qu'avec circonspection et à titre indicatif. Elles sont néanmoins présentées ici pour illustration car il ne semble pas exister de données plus fiables disponibles.

La figure 7 montre une comparaison de la répartition de la consommation par usages en 1993 et en 2008. On y constate une diminution de la part utilisée en électronique (remplacement, en xérophotographie, des anciens photorécepteurs au sélénium par des photorécepteurs organiques, et pas encore de décollage de la production des panneaux photovoltaïques CIGS).

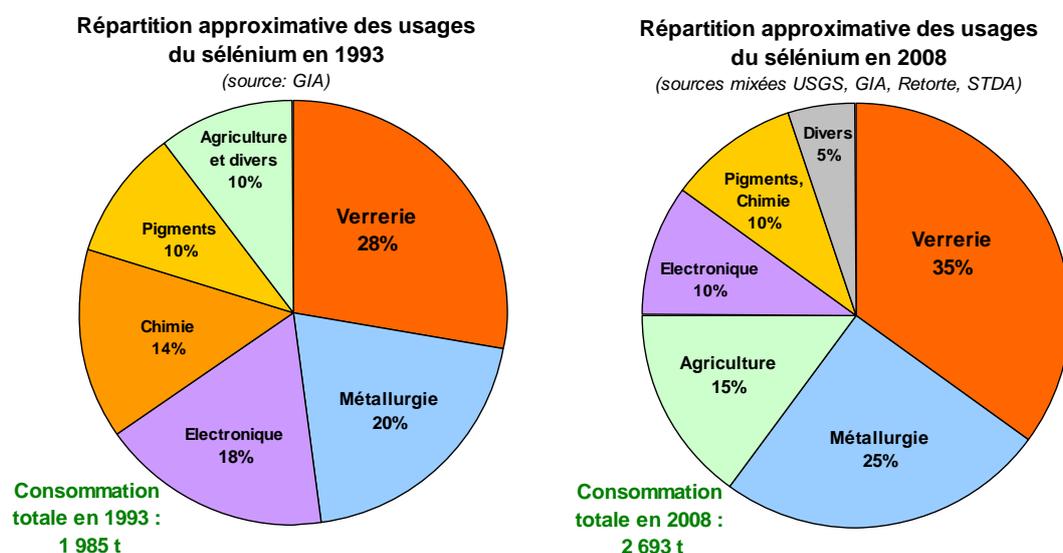


Figure 7 - Comparaison de la répartition des usages du sélénium entre 1993 et 2008.

⁸ L'USGS a publié en septembre 2005 les statistiques de la consommation américaine de sélénium par usages de 1975 à 2003, mais ne publie plus de statistiques depuis 2004 et considère les données américaines comme confidentielles.

On notera en particulier que les projections du GIA maintiennent la consommation du sélénium en électronique entre 258 et 264 t/an entre 2011 et 2015, soit un niveau comparable à celui de 2004 (265 t) qui avait lui-même diminué depuis un maximum de 376 t en 1994 (données chiffrées GIA). C'est-à-dire qu'elles n'intègrent pas les probables futurs besoins de sélénium pour un développement des panneaux photovoltaïques en couches minces au CIS ou CIGS.

3.4. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DES USAGES DANS LES PROCHAINES ANNÉES

3.4.1. Photovoltaïque

L'évolution des usages la plus attendue est probablement la croissance de la production de panneaux photovoltaïques en couche mince CIGS.

En effet, l'arrivée de ces panneaux sur le marché est assez nouvelle. Et, s'ils sont un peu moins performants que les panneaux au silicium (mono ou polycristallin) en termes de rendement nominal, ils ont des avantages en terme de poids, de coût, et d'un meilleur maintien du rendement par moindre éclairage (ciel voilé ou nuageux).

En terme de coût, les substances utilisées sont onéreuses (sélénium, indium et éventuellement gallium), mais les quantités utilisées sont très faibles du fait de la minceur des couches (1 à 2 μm). De plus, les technologies de fabrication sont moins onéreuses, moins énergivores et moins émettrices de CO_2 que la fabrication de silicium ultra-pur mono ou polycristallin, même si l'élément de base, le silicium, est le deuxième plus abondant de l'écorce terrestre (cf. § 3.1.4. et Tableau 2).

Non seulement le parc d'unités de production photovoltaïques est appelé à une forte croissance au niveau mondial dans la dynamique actuelle des énergies renouvelables, mais la part de marché des panneaux en couche mince est vraisemblablement appelée à croître au cours des prochaines années.

Et même si la part de marché des panneaux en couche mince par rapport aux panneaux en silicium cristallin n'évolue pas, la production de tels panneaux et donc la consommation de sélénium est appelée à croître de manière significative, en raison de la croissance prévisible des installations solaires photovoltaïques tant au niveau public qu'individuel, dans la dynamique actuelle des énergies renouvelables (même si, ponctuellement et localement, on peut attendre un affaiblissement temporaire de la croissance en France du fait de la récente baisse des avantages fiscaux associés).

Angerer *et al.* (2009), de l'Institut Fraunhofer, donnent les projections suivantes (Tab. 7 et 8). Angerer *et al.* (2009) évaluent à 165 t les besoins annuels en sélénium pour les panneaux photovoltaïques en couches minces en 2030 et 336 t en 2050.

Année	Puissance installée	dont CIGS		dont CdTe	
		GWc	%	GWc	%
2007	4.3 GWc	0.02 GWc	0.5%	0.2 GWc	4.7%
2010	21.1 GWc	0.6 GWc	2.8%	0.4 GWc	1.9%
2020	200.0 GWc	10.0 GWc	5.0%	6.0 GWc	3.0%
2030	947.0 GWc	67.0 GWc	7.1%	40.0 GWc	4.2%
2040	1 693.0 GWc	153.0 GWc	9.0%	91.0 GWc	5.4%
2050	2 440.0 GWc	269.0 GWc	11.0%	159.0 GWc	6.5%

GWc = GigaWatt-crête

Tableau 7 - Prévission de capacité de production photovoltaïque d'ici 2050, avec part CIGS et CdTe.
(Source : Angerer et al., 2009).

Année	Sélénium pour CIGS	Indium pour CIGS	Gallium pour CIGS	Cadmium pour CdTe	Tellure pour CdTe
2007	1 t/a	1 t/a	1 t/a	20 t/a	9 t/a
2010	6 t/a	10 t/a	9 t/a	5 t/a	2 t/a
2020	29 t/a	50 t/a	44 t/a	57 t/a	25 t/a
2030	165 t/a	285 t/a	251 t/a	336 t/a	148 t/a
2040	249 t/a	430 t/a	378 t/a	511 t/a	225 t/a
2050	336 t/a	580 t/a	510 t/a	687 t/a	302 t/a

Tableau 8 - Prévission de besoins en éléments rares pour le photovoltaïque en couche mince d'ici 2050.
(Source: Angerer et al., 2009)

Une étude plus approfondie de l'*Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung* (IZT)⁹ de Berlin publiée en avril 2010 (Wehnert et Handke, avril 2010) présente un éventail de scénarios de développement des panneaux photovoltaïques selon des hypothèses optimistes, réalistes et pessimistes (Fig. 8) et des besoins correspondants en sélénium d'ici 2050, selon les taux de recyclage (Fig. 9).

⁹ « Institut d'Études Prospectives et d'Évaluation Technique » allemand (www.izt.de)

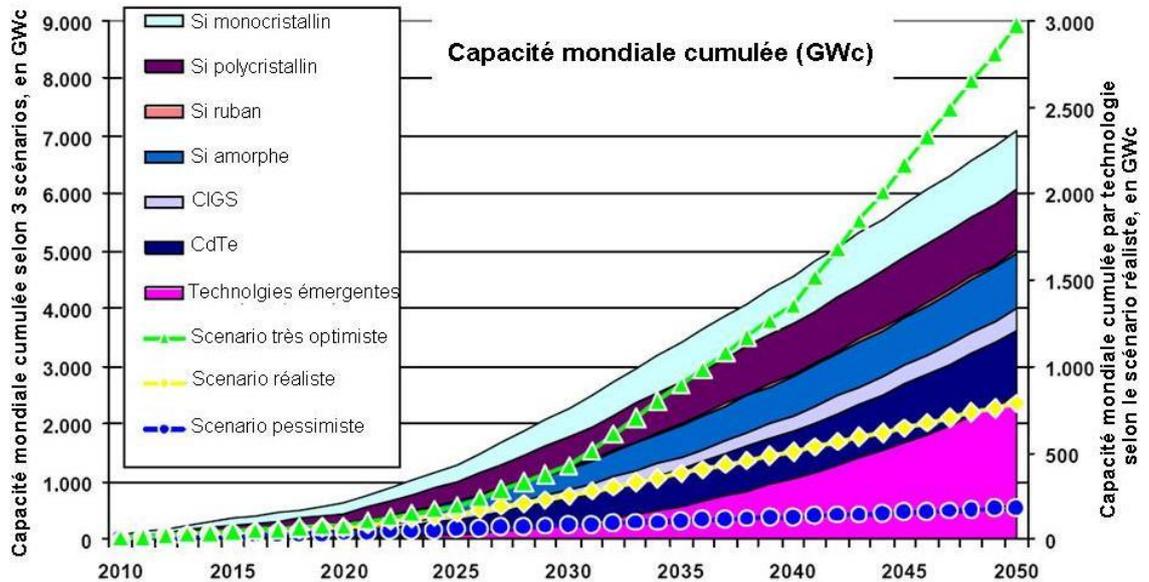


Figure 8 - Évolution de la capacité photovoltaïque mondiale cumulée d'ici jusqu'en 2050 selon trois scénarios (axe de gauche) et selon les technologies dans le scénario réaliste (axe de droite), © IZT, avril 2010, adapté.

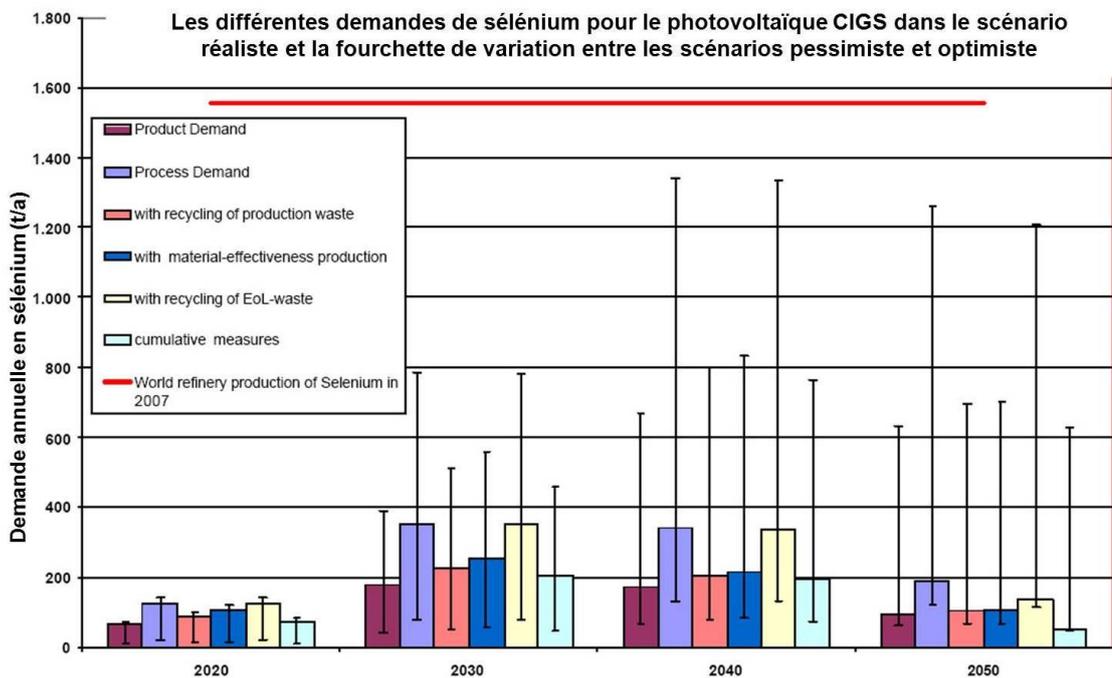


Figure 9 - Évolution de la demande annuelle en sélénium pour la production de cellules photovoltaïques CIGS jusqu'en 2050 (© IZT, avril 2010).

3.4.2. Photorécepteurs, xérographie

À l'inverse du photovoltaïque, les usages du sélénium en xérographie semblent être amenés à décroître encore du fait du remplacement généralisé des photorécepteurs au sélénium par des photorécepteurs organiques.

Les usages pour les autres types de photorécepteurs (cellules photoélectriques, capteurs infrarouge, imagerie médicale, capteurs photo numérique) devraient croître selon la croissance globale, mais les quantités de sélénium concernées sont très faibles.

3.4.3. Autres usages

Les usages en métallurgie devraient suivre la croissance industrielle globale et en particulier en Chine et les autres pays émergents (cf. Fig. 6, GIA).

Les usages en verrerie sont probablement appelés à augmenter avec la poursuite d'une urbanisation dynamique et de l'accroissement du parc automobile en Chine et dans d'autres pays émergents, pour la production des verres plats architecturaux et des vitrages de véhicules limitant la transmission thermique.

Les usages en diététique et en compléments alimentaires humains sont probablement appelés à poursuivre leur croissance modérée, avec la sensibilisation croissante des populations aux effets bénéfiques des oligo-éléments. Il en est de même pour les usages en compléments alimentaire pour les animaux d'élevage.

3.5. SUBSTITUTIONS

3.5.1. Verrerie

Diverses substances dont l'oxyde de cérium peuvent être utilisées pour la décoloration et la coloration du verre. Mais le cérium, même s'il est globalement plus abondant que le sélénium, sera probablement lui-même confronté à un déficit d'offre dans les prochaines années (cf. Christmann *et al.*, 2010).

3.5.2. Pigments

Des pigments organiques et des oxydes de terres rares sont développés en substitution des pigments au sulfoséléniure de cadmium. Mais la substitution par les terres rares n'est pas forcément une solution vu les tensions existant actuellement sur le marché des terres rares (cf. Christmann *et al.*, 2010).

3.5.3. Métallurgie

Pour la production d'aciers de décolletage et autres alliages à usinabilité améliorée, c'est plutôt le sélénium qui est employé marginalement en substitution partielle du

soufre ou du plomb. Le bismuth et le tellure peuvent aussi s'y substituer, ainsi que pour l'amélioration de l'usinabilité des laitons et autres alliages de cuivre. Le bismuth et le tellure sont cependant des éléments encore bien moins abondants que le sélénium.

3.5.4. Électronique - Xérogaphie

Le sélénium est désormais largement substitué par des photorécepteurs organiques ou au silicium amorphe dans les photocopieurs et imprimantes lasers.

Le silicium de haute pureté remplace le sélénium dans les redresseurs de courant.

3.5.5. Photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques au sélénium (CIGS) sont en concurrence avec les panneaux au silicium (cristallin en couche épaisse ou amorphe en couche mince) et ceux au tellure de cadmium (CdTe) - voir tableau 2.

3.5.6. Agriculture, alimentation, pharmacie

Le sélénium en tant qu'oligoélément n'est pas substituable, mais, en ce qui concerne les besoins humains et vétérinaires, l'essentiel des apports se fait par l'alimentation normale.

3.6. RECYCLAGE

Les usages du sélénium en verrerie, en métallurgie, en pigmentation, en agriculture, en alimentaire et en pharmacie sont très dispersifs et ce sélénium est difficilement recyclable.

Seul le sélénium utilisé en électronique, qui ne représentait en 2008 que 10 % de la quantité consommée, est recyclable. Le sélénium qui a été utilisé dans les anciens tambours de photocopieurs est en bonne partie recyclé en fin de vie. Les panneaux photovoltaïques au sélénium (CIGS) ne sont apparus que très récemment (développement à partir de 2007), et ne pourront devenir une source de sélénium recyclé qu'en fin de leur vie, à partir de 2030 et au-delà.

Metal-Pages (2008) estime entre 20 à 250 t la quantité de sélénium secondaire produite annuellement à partir du recyclage. D'autres sources donnent une estimation plus resserrée entre 100 et 200 t par an (dans tous les cas < 10 % de la consommation annuelle).

3.7. LES PRIX ET LES MARCHÉS DU SÉLÉNIUM : ÉVOLUTION ET SPÉCIFICITÉS

Le sélénium est commercialisé sous forme de :

- Sélénium élémentaire technique « 2N5 » à 99,5 % Se ;

- Sélénium élémentaire technique « 3N » à 99,9 % Se ;
- Sélénium élémentaire de haute pureté « 5N » à 99,999 % Se ;
- divers composés (alliages sélénium-antimoine, sélénium-arsenic, sélénium-tellure ; Dioxyde de sélénium ; Acide sélénieux ; Séléniures de fer, de cuivre, de zinc, de bismuth ; Sélérites de calcium, de baryum, de sodium, de zinc ; Sélémates de baryum, de sodium, de potassium, etc.).



Figure 10 - Sélénium élémentaire en poudre, en granules et en pastilles.
(© Minor Metals Trade Association, www.mmta.co.uk)

3.7.1. Évolution récente et historique des prix

Le sélénium n'est pas coté publiquement. Metal-Pages (www.metal-pages.com) publie deux fois par semaine une fourchette de prix (prix minimum, prix maximum) en US\$/lb tels que négociés entre vendeurs pour le sélénium à la teneur commerciale de 99,5 % livré en Union Européenne (Rotterdam).

La figure 11 montre la variation du prix moyen du sélénium à 99,5 % disponible en Union Européenne depuis le 1^{er} janvier 2001, converti en US\$/kg (1 lb = 0,4536 kg).

Le prix moyen est calculé ici comme la moyenne entre le prix minimum et le prix maximum dans une demi-semaine donnée, sachant que l'écart par rapport à la moyenne est généralement entre $\pm 3\%$ à $\pm 5\%$.

On constate que le prix du sélénium est resté assez faible et stable entre 6,6 et 8,9 \$/kg entre début 2001 et mi-2003, puis a nettement augmenté pour osciller entre 35 et 120 \$/kg depuis mars 2004. Il s'est stabilisé entre 79 et 83 \$/kg entre mars et août 2010, pour remonter à 105 \$/kg en novembre 2010, soit une multiplication par 12 du prix depuis mi-2003.

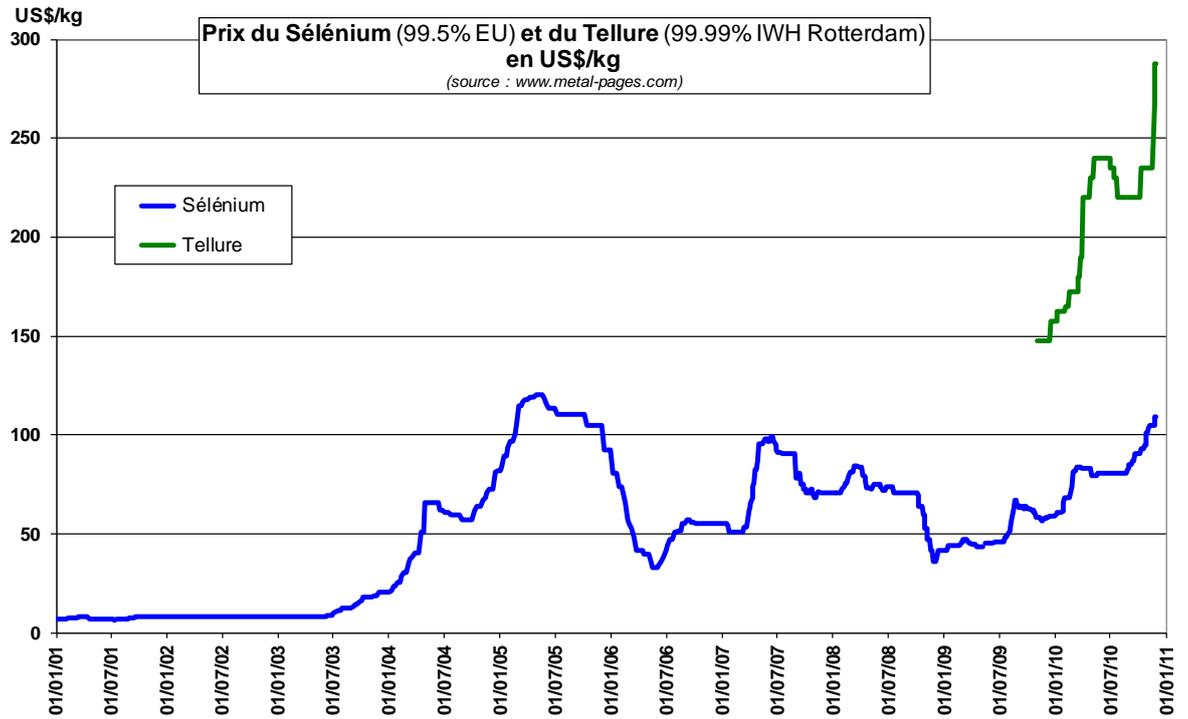


Figure 11 - Évolution du prix du sélénium à 99,5 % rendu Union Européenne depuis 2001.
 (source : Metal-pages)

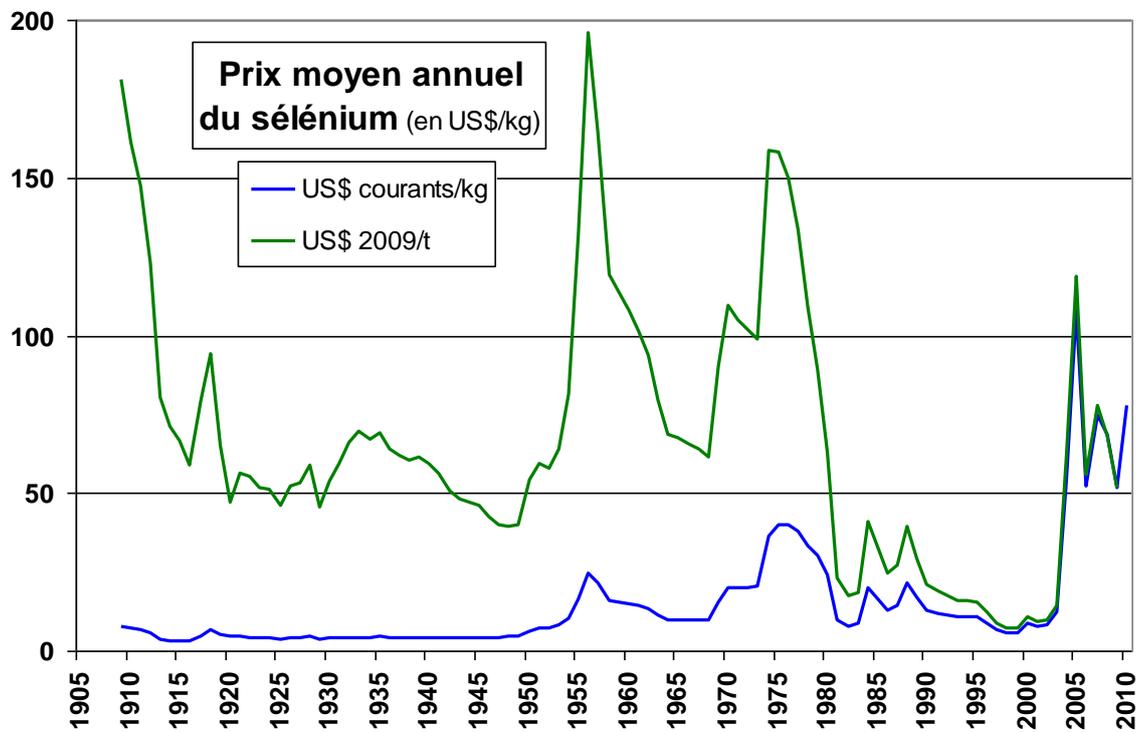


Figure 12 - Évolution du prix annuel moyen du sélénium depuis 1909.

Il y a eu une flambée au-dessus de 100 \$/kg entre mi-février et fin novembre 2005, puis une deuxième au-dessus de 90 \$/kg entre mai et août 2007. Cette deuxième hausse coïncide avec une flambée du prix du manganèse, passé momentanément au-dessus de 4 000 \$/t pendant cette même période, d'où une demande accrue soudaine en sélénium de la part de la Chine pour accroître sa production de manganèse électrolytique¹⁰. Mais cette corrélation ponctuelle ne se vérifie pas sur d'autres périodes, du fait que la part du sélénium utilisé pour la production de manganèse reste mineure.

La figure 12 présente le prix moyen annuel du sélénium depuis 1909, en US\$ courants (données USGS) et convertis en US\$ de 2009.

Au-delà des fluctuations de l'économie en général, le bombement global des prix entre 1955 et 1990 peut être interprété comme lié au développement des diverses applications du sélénium, dont l'industrie des photocopieurs (xérogaphie). La baisse des prix dans les années 1990 peut être interprétée comme liée d'une part au remplacement progressif, dans les photocopieurs, des photorécepteurs au sélénium par des photorécepteurs organiques, et d'autre part à l'exportation massive de matières premières par les pays de l'ancienne Union Soviétique juste après son démantèlement. Puis la forte remontée des prix à partir de 2005 se corrèle avec la forte hausse de la quasi-totalité des matières premières minérales à partir de 2003-2004, liée à la très forte croissance économique chinoise et la très forte croissance de sa demande en matières premières, combinée avec une certaine faiblesse de l'offre due aux ralentissements qui avaient justement été induits par les prix faibles des matières premières dans les années 1997-2002.

On remarquera que le sélénium, malgré la modestie de son marché, est l'un des éléments dont le prix s'est le plus fortement accru depuis le début des années 2000.

La plupart des prix des matières premières minérales sont restés à un plancher entre mi-2001 et mi-2003, date à partir de laquelle la forte croissance économique chinoise a tiré la demande et les prix vers le haut. Beaucoup de prix ont fortement augmenté jusqu'à mi-2008, puis fortement chuté avec la crise, et ont remonté progressivement en 2009 et 2010. Mais les prix de certaines substances ont augmenté plus fortement que d'autres.

Le tableau 9 compare les prix de certaines substances minérales entre la moyenne de l'année 2002 (année de prix uniformément faibles) et la moyenne des deux derniers mois (octobre et novembre 2010). On observe que le prix du sélénium a été multiplié par 12. Parmi les matières premières minérales, seules quelques Terres Rares (La, Nd, Pr, Dy) ont vu leurs prix s'accroître du même ordre (Tab. 9).

Les raisons qui ont justifié cette flambée des prix du sélénium sont difficiles à établir avec précision. La figure 11 tend à indiquer que, sur le long terme, cette hausse, plutôt que de correspondre à des prix élevés depuis 2004, correspond plutôt à des prix

¹⁰ Demande accrue en manganèse pour produire des aciers inox pauvres en nickel en raison de la flambée des cours du nickel jusqu'à un pic extrême de 54 000 US\$/t mi-mai 2007.

particulièrement bas entre 1981 et 2003. Sur les dix dernières années, la hausse a vraisemblablement pour origine une faiblesse de l'offre par rapport à la demande, mais ce déficit est impossible à chiffrer puisque l'offre (la production de sélénium) n'est connue que très partiellement : la production rapportée ne couvre que 55 à 75 % de la consommation (cf. § 4.3.1. et Fig. 14). Il est difficile aussi de savoir s'il y a une composante spéculative dans cette évolution des prix, vu la discrétion du marché, mais elle ne semble pas dominante.

3.7.2. Évolution future des prix

Les besoins émergents en sélénium liés au développement des panneaux solaires CIGS devraient continuer à conforter la demande.

De même, la demande chinoise en verre plat architectural (éventuellement dopé au sélénium pour atténuer la transmission thermique) et la probable croissance de la production de manganèse électrolytique devraient aller dans un sens de l'accroissement de la demande.

En réponse, la forte hausse des prix de ces dernières années devrait encourager à une plus forte proportion de récupération du sélénium dans les raffineries de cuivre et permettre à l'offre de suivre, d'une manière globale et à moyen terme. Mais les déséquilibres offre-demande à court terme, impossibles à chiffrer compte tenu du manque de données précises et fiables, pourrait continuer à faire varier les prix. .

Il est donc bien difficile, en l'absence de statistiques fiables, de pronostiquer une évolution des prix.

Pour l'industrie du photovoltaïque CIGS, le prix du sélénium est peu significatif vu les très faibles quantités utilisées : cette industrie sera davantage sensible à la disponibilité physique du sélénium.

Pour la pharmacie et la parapharmacie où le sélénium est non substituable, son prix est encore moins significatif : une boîte de 30 comprimés de compléments alimentaires contenant 50 µg de sélénium est vendue environ 10 €. Même à 100 US\$ le kg de sélénium, soit environ 75 €, le prix du sélénium contenu dans la boîte est de 0,01 centime d'Euro (soit 0,001 % du prix de la boîte). Le prix du sélénium pourrait donc encore centupler et davantage sans effet significatif.

	Moyenne 2002	Moyenne Oct.+Nov. 2010	Unité	Facteur multiplicatif
Index des prix à la consommation US (www.inflationdata.com)				
US CPI	179.9	218.8	index	1.2
Matières premières énergétiques				
Pétrole WTI	25.0	83.1	US\$/baril	3.3
Charbon*	27.1	107.3	US\$/t	4.0
U (U ₃ O ₈)	22.8	116.6	US\$/kg	5.1
Minerai de fer et acier				
Minerai de fer**	0.26	1.82	US\$/dmu	7.0
Acier***	105	487	US\$/t	4.6
Métaux de base (www.lme.co.uk)				
Al	1 349	2 340	US\$/t	1.7
Cu	1 558	8 383	US\$/t	5.4
Zn	779	2 331	US\$/t	3.0
Pb	452	2 378	US\$/t	5.3
Ni	6 775	23 348	US\$/t	3.4
Sn	4 064	25 921	US\$/t	6.4
Mo	6 327	34 083	US\$/t	5.4
Co	15 543	38 434	US\$/t	2.5
Métaux précieux (www.kitco.com)				
Au	310	1 357	US\$/oz	4.4
Ag	4.6	25.0	US\$/oz	5.4
Pt	540	1 692	US\$/oz	3.1
Pd	337	636	US\$/oz	1.9
Rh	768	2 293	US\$/oz	3.0
Métaux des Terres Rares (www.metal-pages.com)				
Y	37	78	US\$/kg	2.1
La	3.5	44	US\$/kg	12.5
Ce	4.5	47	US\$/kg	10.3
Pr	6.2	87	US\$/kg	13.9
Nd	6.9	95	US\$/kg	13.8
Eu	957	785	US\$/kg	0.8
Dy	36	400	US\$/kg	11.2
Tb	195	770	US\$/kg	4.0
Autres métaux (www.metal-pages.com)				
W (APT)	56	286	US\$/mtu	5.1
Sb	1 838	10 959	US\$/t	6.0
In	75	540	US\$/kg	7.2
Ga	263	631	US\$/kg	2.4
Ge	620	914	US\$/kg	1.5
Se	8.1	100	US\$/kg	12.4
Te	63	241	US\$/kg	3.8
Re	1 030	4 328	US\$/kg	4.2

* Charbon thermique australien. Source: www.steelonthenet.com

** Minerai brésilien à 67.5%FE, FOB Ponta de Madeira. Source: www.steelonthenet.com

***Steel billet LME

Tableau 9 - Comparatif des facteurs multiplicatifs des prix des matières premières minérales entre la moyenne de 2002 (sur 1 an) et octobre-novembre 2010 (sur 2 mois).

4. Ressources et production mondiale

4.1. LES SOURCES DE SÉLÉNIUM

4.1.1. Abondance du sélénium dans l'écorce terrestre

Le sélénium se situe, par ordre d'abondance décroissante, au 69^e rang sur 83 éléments significativement présents dans l'écorce terrestre¹¹.

Son abondance moyenne dans la croûte terrestre (« clarke ») est estimée à 50 ppb (50 mg/t), soit légèrement moins que l'argent (75 ppb) ou le mercure (85 ppb)¹² (CRC Handbook, Kaye & Laby). Seuls le tellure, le bismuth, les métaux précieux (or et platinoïdes), le rhénium et les gaz rares sont moins abondants.

L'eau de mer contient entre 0,1 et 0,2 µg de sélénium par litre¹³.

4.1.2. Minéraux et minerais

Le sélénium ayant des propriétés chimiques voisines de celles du soufre, il se retrouve souvent concentré dans les sulfures métalliques d'origine magmatique ou hydrothermale, en particulier dans les gisements de cuivre et de cuivre-nickel sulfurés.

Le sélénium peut entrer en particulier dans le réseau cristallin de divers sulfures, comme la chalcopyrite, la bornite, la pyrite, la pentlandite. Les teneurs en sélénium des principaux minéraux de sulfures métalliques sélénifères sont récapitulés dans le tableau 10 ci-après (Jdid & Blazy, 2008).

Le sélénium, à la différence de certains autres éléments rares comme Ag, Hg, Au, Pt, etc. qui se concentrent bien dans des minéraux spécifiques, forme peu de minéraux propres et reste dispersé.

Sur un exemple plus spécifique, les teneurs moyennes en sélénium des minéraux sulfurés des gisements de cuivre-nickel de Norilsk ont été publiées comme suit (Sindeeva, 1964) :

¹¹ 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.

¹² CRC Handbook of Chemistry and Physics.

¹³ Le CRC Handbook donne 0,2 µg et Kaye&Laby donne 0,09 µg par litre.

Industriellement, le sélénium est extrait presque exclusivement comme sous-produit d'exploitations de cuivre (porphyry, sediment-hosted) et de cuivre-nickel, plus rarement de plomb-zinc.

Minéral	Teneur en Se
Galène	0 à 2 %
Molybdénite	0 à 1 000 ppm
Pentlandite	25 à 70 ppm
Chalcopyrite	0 à 1 000 ppm
Bornite	100 à 150 ppm
Pyrite	0 à 3 %
Pyrrhotite	1 à 60 ppm
Sphalérite	1 à 120 ppm
Cinabre	0 à 4 000 ppm
Arsénopyrite	0 à 1 400 ppm
Bismuthinite	150 à 8 000 ppm

Tableau 10 - Teneur en sélénium des principaux minéraux source (d'après Jdid & Blazy, 2008)

Minéral	Teneur en Se
Pentlandite	67 ppm
Chalcopyrite	50 à 200 ppm
Bornite	100 à 150 ppm
Pyrite	traces
Pyrrhotite	36 à 140 ppm
Millérite	10 ppm

Tableau 11 - Teneur en sélénium des principaux minéraux des gisements de cuivre-nickel de Norilsk (d'après Sindeeva, 1964).

Dans les gisements de soufre d'origine volcanique, le sélénium peut atteindre des concentrations de 1 000 ppm (Jdid et Blazy, 2008), et parfois davantage (jusqu'à 5 % dans les sulfures bruns de certaines solfatares).

Les charbons contiennent des traces de sélénium, porté essentiellement par la pyrite. On trouve du sélénium dans les cendres et poussières issues de la combustion.

Des dizaines de minéraux de sélénium ont été décrits, mais ils ne constituent pas des gisements de sélénium en soi. Ils sont très marginaux et plutôt anecdotiques, et ont un intérêt essentiellement scientifique et minéralogique. Ils sont généralement de très petite taille.

Les minéraux de sélénium sont essentiellement des séléniures plus ou moins complexes de métaux, équivalents aux sulfures correspondants. Dans les parties

oxydées de ces occurrences, le sélénium forme des sélénites (composés avec l'anion SeO_3^{2-}). On rencontre aussi exceptionnellement le sélénium à l'état natif.

Quelques minéraux de sélénium :

- Sélénium natif : Se ;
- Sélénures de cuivre : Berzélianite (Cu_2Se), Krutaïte (CuSe_2), Athabascaïte (Cu_5Se_4), Umangite (Cu_3Se_2), Klockmannite (CuSe), Mgrite : Cu_3AsSe_3 ; Permingeatite (Cu_3SbSe_4), etc. ;
- Sélénures d'argent : Naumannite (Ag_2Se), Aguilarite (Ag_4SeS) ;
- Sélénures de zinc : Stilléite (ZnSe), de cadmium : Cadmosérite (CdSe), de mercure : Tiémannite (HgSe) ;
- Sélénure de plomb : Clausthalite (PbSe) ;
- Sélénures de fer : Ferrosérite (FeSe_2), etc. ;
- Sélénures de cobalt : Trogtalite (CoSe_2), Fréboldite (CoSe), Bornhardtite (Co_3Se_4) ;
- Sélénures de nickel : Mäkinenite (NiSe), Kullérudite (NiSe_2), Trusdeditite (Ni_3Se_4), Jolliféite (NiAsSe) ;
- Sélénures complexes de palladium : Padmaïte (PdBiSe), Kalungaïte (PdAsSe), Milotaïte (PdSbSe) ;
- Sélénures polymétalliques et complexes : Eskebornite (CuFeSe_2), Penroséite ($(\text{Ni},\text{Co},\text{Cu})\text{Se}_2$); Fischesserite (Ag_3AuSe_2), Kawazulite $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{Se}$, Hakite ($(\text{Cu},\text{Hg})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), Eucaïrite (AgCuSe), etc. ;
- Sélénites et sélénites hydratés divers : Chalcomenite ($\text{CuSeO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Francisite ($\text{Cu}_3\text{Bi}(\text{SeO}_3)_2\text{O}_2\text{Cl}$), Sopiïte ($\text{Zn}_2\text{Cl}_2\text{SeO}_3$), Molybdomérite (PbSeO_3), Mandarinoïte ($\text{Fe}_2\text{Se}_3\text{O}_9 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), Cobaltomérite ($\text{CoSeO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Ahlfeldite ($(\text{Ni},\text{Co})\text{SeO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Guilleminite ($\text{Ba}(\text{UO}_2)_3(\text{SeO}_3)_2(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), Marthozite ($\text{Cu}(\text{UO}_2)_3(\text{SeO}_3)_3(\text{OH})_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), Piretite ($\text{Ca}(\text{UO}_2)_3(\text{SeO}_3)_2(\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), Demesmaekerite ($\text{Pb}_2\text{Cu}_5(\text{UO}_2)_2(\text{SeO}_3)_6(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), Haynesite ($(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_2(\text{SeO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), Derriksite ($\text{Cu}_4\text{UO}_2(\text{SeO}_3)_2(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

On notera que le sélénium ne se trouve pas dans les silicates.

4.1.3. Principaux types de gisements

Le sélénium se trouve en petites quantités dans la plupart des sulfures, mais il est extrait essentiellement des résidus de raffinage du cuivre (boues des cuves d'électrolyse) et accessoirement des mattes de nickel.

Les gisements susceptibles de permettre l'extraction de sélénium lors des opérations de raffinage sont les types suivants :

- Amas sulfurés d'origine magmatique à cuivre-nickel (Norilsk et Pechenga en Russie, Sudbury au Canada, etc. ;
- Porphyries à cuivre \pm or \pm molybdène (Chili, Pérou, Mexique, USA, Canada, Indonésie, PNG, Mongolie, etc.) ;

- Gisements de cuivre encaissés dans les sédiments : Copper Belt en R.D. du Congo et en Zambie, Kupferschiefer de Lubin en Pologne, etc. ;
- Amas sulfurés volcanogéniques : Ceinture pyriteuse sud-ibérique, Oural.

La teneur en sélénium des boues résiduelles d'électroraffinage du cuivre sont généralement comprises entre 5 % et exceptionnellement 25 %, avec une moyenne évaluée à 7 % (George, 2008).

Le raffinage d'une tonne de cuivre peut fournir de l'ordre de 0,215 kg (Butterman & Brown, 2004) de sélénium. Pour des minerais sulfurés à environ 1 % de cuivre, on peut estimer qu'il faut 400 à 500 t de minerai pour fournir 1 kg de sélénium (STDA, 2002 ; Global Industry Analysts, 2008)¹⁴.

Les gisements de cuivre du Canada sont souvent plus riches en sélénium et le raffinage d'une tonne de cuivre peut y produire jusqu'à 0,64 kg de sélénium (Butterman & Brown, 2004).

Le sélénium se trouve aussi dans divers gisements hydrothermaux polymétalliques (à Pb-Zn), à métaux précieux (Au-Ag) et uranifères, où il peut s'exprimer sous forme minéralogique, mais il en est peu extrait (son extraction ne représente qu'une fraction minime de la production de sélénium).

À noter que le sélénium ne peut s'extraire que des minerais sulfurés traités par pyrométallurgie. Les procédés hydrométallurgiques SX-EW utilisés en particulier pour les minerais de cuivre oxydés ne permettent pas de récupérer le sélénium.

4.1.4. Gisements et potentiel en France

Les ressources potentielles de sélénium en France sont très mal connues. En effet, la plupart des gisements sulfurés du territoire métropolitain, susceptibles d'en contenir, ont été exploités ou étudiés il y a plus de 15 ou 20 ans et, vu les cours très faibles du sélénium entre 1981 et 2003, ils n'ont pas fait l'objet d'analyse du sélénium contenu.

On citera pour mémoire comme gisements parmi les plus importants susceptibles de contenir ou d'avoir contenu du sélénium qui aurait pu être récupérable :

- Amas sulfurés à cuivre : Chessy (69), amas pyriteux à or : Rouez (72) ;
- Gisement d'or-arsenic de Salsigne (11) ; d'or-antimoine de La Lucette (53) ;
- Filons hydrothermaux à métaux de base : Saint-Salvy (83), etc. ;
- Gisements d'uranium (Limousin, etc.).

Les gisements listés ci-dessus ont été exploités : Chessy a été exploité au XIX^e siècle puis abandonné et réétudié dans les années 1980, les autres ont tous été exploités au XX^e siècle mais sont désormais tous fermés. Il n'a pas été cité de production de

¹⁴ L'étude de Global IndustryAnalysts (GIA) d'avril 2008 cite 200 t de minerai pour 1 livre de sélénium (1 livre = 0,4536 kg).

sélénium de ces gisements, et leurs teneurs et ressources en sélénium n'ont semble-t-il jamais été évaluées ni publiées.

Lors du programme d'inventaire minier de la France de 1975 à 1991, au cours duquel une exploration systématique pour de nombreuses substances a été réalisée sur la majeure partie des massifs de socle du territoire métropolitain et de la Guyane, le sélénium n'était pas analysé et ne faisait pas partie des substances étudiées.

En revanche, le cuivre et autres métaux de base ont été activement inventoriés. Or il n'a pas été découvert de gisements de cuivre de moyenne ou grande taille dans la tranche de sous-sol des quelques premières centaines de mètres de profondeur. Le plus grand gisement de cuivre français, celui de Chessy, a des ressources connues de 4,1 Mt à 2,51 % de cuivre, soit 103 kt de cuivre contenu, ce qui en fait un gisement de taille extrêmement modeste au plan mondial, et son exploitation n'est pas envisagée dans un futur prévisible. On peut toutefois spéculer que, bien que les teneurs en sélénium n'y sont pas connues, si l'on calcule la ressource en utilisant la quantité moyenne de 0,215 kg de sélénium par tonne de cuivre, le gisement de Chessy contiendrait un total d'environ 22 t de sélénium récupérable, soit une ressource totale inférieure à 2 % de la production annuelle mondiale de sélénium.

Des minéraux de sélénium ont été répertoriés çà et là en France, mais en quantité infime, peu susceptible de représenter un intérêt économique au-delà de la curiosité minéralogique. On pourra citer en particulier les indices suivants, souvent associés à des gîtes hydrothermaux filoniens à uranium (sources : Inventaires Minéralogiques de la France, Pierrot et al., BRGM, 1974-1979)

- Traou Ru / Buhulien (Lannion, Côtes-du-Nord) : Sélénium natif (Se) en inclusion dans la pechblende d'un filon de quartz uranifère ;
- Quistiav (Pontivy, Morbihan) : Naumannite (Ag_2Se) ;
- Coutras (Lot-et-Garonne) : Sélénium natif (Se) dans un gîte d'uranium ;
- Prévinquières (Aveyron) : Klockmannite (CuSe) dans un gîte à U-Cu-Bi ;
- Liauzun (Olloix, Puy-de-Dôme) : Sélénium natif (Se), Clausthalite (PbSe) et divers sélénites (Guilleminite, etc.) ;
- Chaméane (Sauxillange, Puy-de-Dôme) : Athabascaïte (Cu_5Se_4), Clausthalite (PbSe), Chameanite ($(\text{Cu,Fe})_4\text{As}(\text{Se,S})_4$), Eskebornite (CuFeSe_2), Eucairite (AgCuSe_2), Umangite (Cu_3Se_2), etc. ;
- Les Clausis (Saint-Véran, Hautes-Alpes) : Clausthalite (PbSe) ;
- Col Amic (Rimbach, Haut-Rhin) : Clausthalite (PbSe).

4.2. RESSOURCES ET RÉSERVES

Malgré la présence de sélénium dans beaucoup de sulfures et l'existence de plusieurs dizaines de minéraux spécifiques, il n'existe pas de gisements de sélénium individualisé comme tel. Dans les gisements de cuivre et de nickel (plus rarement d'or, d'argent et de plomb), la récupération du sélénium reste secondaire.

Et contrairement au cas du cuivre et des autres métaux de base, les opérateurs miniers qui évaluent leur gisement et déclarent des ressources et des réserves pour ces substances, ne les déclarent pas (et ne les évaluent pas) pour le sélénium, ni d'ailleurs pour le tellure ou le rhénium.

On ne peut donc obtenir que des estimations indirectes des ressources mondiales en sélénium.

4.2.1. Estimation publiée par l'USGS

L'USGS publie les estimations suivantes :

	Réserves	Réserve base
	(données USGS 2010)	(données USGS 2009)
Chili	20 000 t	40 000 t
USA	10 000 t	19 000 t
Canada	6 000 t	10 000 t
Pérou	9 000 t	8 000 t
Philippines	500 t	3 000 t
Russie	20 000 t	92 000 t
Autres pays	23 000 t	
TOTAL	88 500 t	172 000 t

Tableau 12 - Estimations des réserves primaires en sélénium, en t, d'après l'USGS.
(à partir de 2010, l'USGS ne communique plus d'estimation de « réserve base »)

Dans son « Mineral Commodity Profiles » (Butterman & Brown, 2004), l'USGS expliquait que ses estimations étaient faites sur la base des réserves en cuivre sulfuré récupérable par pyrométallurgie, sur la base de 0,215 kg de sélénium par tonne de cuivre extractible hors Canada et 0.64 kg de sélénium par tonne de cuivre extractible au Canada.

En partant de ces estimations de l'USGS, on déduit que les réserves minières connues aujourd'hui seraient suffisantes pour satisfaire 32 ans de consommation au rythme de 2009 (2 747 t de sélénium consommés en 2009), hors recyclage, et les « Reserves base » (pour l'USGS, part des ressources les plus susceptibles d'être converties en réserves) pour 63 ans.

Sur la base d'un accroissement de la consommation de 2,1 % par an (hausse rapportée en 2007, 2008 et 2009 et extrapolée par le GIA pour les prochaines années), les réserves estimées par l'USGS pourraient satisfaire la demande jusqu'en 2034 et les « Réserve base » jusqu'en 2049.

NB : Les durées et échéances calculées ci-dessus ne sont pas à interpréter comme une perspective d'épuisement des ressources en sélénium, raisonnablement que l'on a pu voir dans certaines publications grand public pour nombre de substances. Il s'agit simplement de dire que les ressources et réserves connues devraient déjà permettre d'atteindre les échéances données. Ce ne sont que des indicateurs. En effet, la quantité de ressources connues pourra continuer à s'accroître avec la découverte de nouveaux gisements, la meilleure valorisation de gisement déjà connus, la baisse des teneurs de coupure permise par des progrès technologiques ou par la hausse des prix, etc.

4.2.2. Actualisation de l'estimation sur la base des ressources en cuivre sulfuré

Les estimations de ressources en sélénium par l'USGS sont été basées sur les estimations de ressources en cuivre (cf. § 4.2.1.).

Or ces ressources en cuivre ont fait l'objet de mises à jour récentes (BRGM, compilation interne de données actualisées).

On pourra donc faire une mise à jour de l'ordre de grandeur des ressources potentiellement disponibles en sélénium à partir de ces dernières données sur les ressources en cuivre, toujours sur la base de 0,215 kg de sélénium pour 1 t de cuivre devant être raffiné par électroraffinage après pyrométallurgie.

Les ressources minérales en cuivre identifiées (mesurées + indiquées + inférées) au niveau mondial sont de 2,1 Gt de cuivre contenu, dont 662 Mt de réserves. La répartition de ces ressources est illustrée en figure 14.

Sur ces totaux, on évalue qu'au moins 1,4 Gt des ressources en cuivre et 443 Mt des réserves correspondent à des minerais devant être traités par flottation et pyrométallurgie et donc susceptibles de permettre la récupération de sélénium¹⁵.

¹⁵ Les minerais de cuivre (ou de cuivre-nickel) sont traités

- soit par flottation (production de concentrés) puis pyrométallurgie – c'est généralement le cas pour les minerais sulfurés. On produit alors des mattes, du cuivre « blister » ou des anodes, qui doivent ensuite être raffinées par « électroraffinage ». C'est cette dernière étape qui produit des résidus (« slimes ») d'où peut être extrait le sélénium (cf. 5.1.). Rappelons que l'étape de raffinage est souvent menée dans un pays différent de l'exploitation minière, et les pays producteurs de sélénium (et de cuivre raffiné) sont souvent différents des pays d'extraction minière.
- soit par hydrométallurgie (pour le cuivre : extraction par solvant puis électrolyse – SX-EW), ce qui est généralement le cas pour les minerais oxydés. Mais cette méthode ne permet pas la récupération de sélénium.

Seule la part des ressources en cuivre à traiter par pyrométallurgie doit être prise en compte. Certaines opérations minières ou projets miniers traitent ou prévoient de traiter entièrement le minerai par flottation puis pyrométallurgie – et sont donc susceptibles de permettre une récupération du sélénium. D'autres traitent ou prévoient traiter entièrement le minerai par SX-EW. Mais d'autres encore sont mixtes et traitent ou prévoient traiter une partie du minerai (généralement la partie oxydée) par SX-EW, et l'autre par flottation et pyrométallurgie. Mais les opérateurs ne détaillent pas toujours, dans leurs déclarations de ressources de minerai, quelle est la proportion qui sera traitée par telle ou telle méthode. On a donc fait une estimation des ressources susceptibles de produire du sélénium sur la base de 100 % des ressources des opérations flottation/pyrométallurgie, 0 % des ressources des opérations et projets SX-EW, et 50 % des opérations et projets mixtes. Cette estimation est plutôt conservatoire, car dans un gisement partiellement oxydé, les ressources sulfurées sont généralement bien supérieures, en tonnage de cuivre contenu, aux ressources oxydées.

Sur ces hypothèses, les réserves en sélénium récupérable seraient de l'ordre de 95 kt de sélénium, et les ressources de 320 kt, soit de quoi satisfaire 35 ans de consommation pour les réserves et 116 ans pour les ressources au rythme de 2009 (2 747 t de sélénium consommé en 2009), hors recyclage.

Sur la base d'un accroissement de la consommation de 2,1 % par an (hausse constatée en 2007, 2008 et 2009), les réserves estimées ainsi pourraient satisfaire la demande jusqu'en 2035 et les ressources jusqu'en 2068.

On voit donc qu'il ne devrait pas y avoir de problèmes de ressources globales en terre en sélénium pour satisfaire la consommation à court et moyen termes.

Géographiquement, ces ressources se répartiraient de la manière illustrée en figure 13. Cette répartition n'est à considérer que de manière indicative, car la teneur en sélénium des divers gisements de cuivre n'est ni identique ni uniforme.

Répartition indicative des ressources minières potentielles en sélénium, sur la base des ressources en cuivre hors projets SX-EW

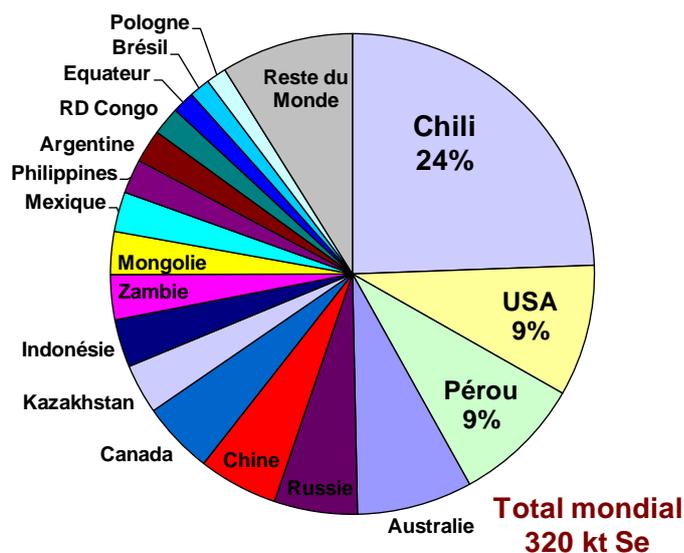


Figure 13 - Répartition indicative des ressources minières potentielles en sélénium.

On peut néanmoins constater que, comme pour le cuivre, les sources d'approvisionnement minier sont réparties dans un large ensemble de pays dont une bonne partie de pays politiquement stables, d'où un risque minime de rupture d'approvisionnement pour des raisons de décisions politiques unilatérales dans un pays ou un autre (comme c'est le cas pour les terres rares en 2009-2011).

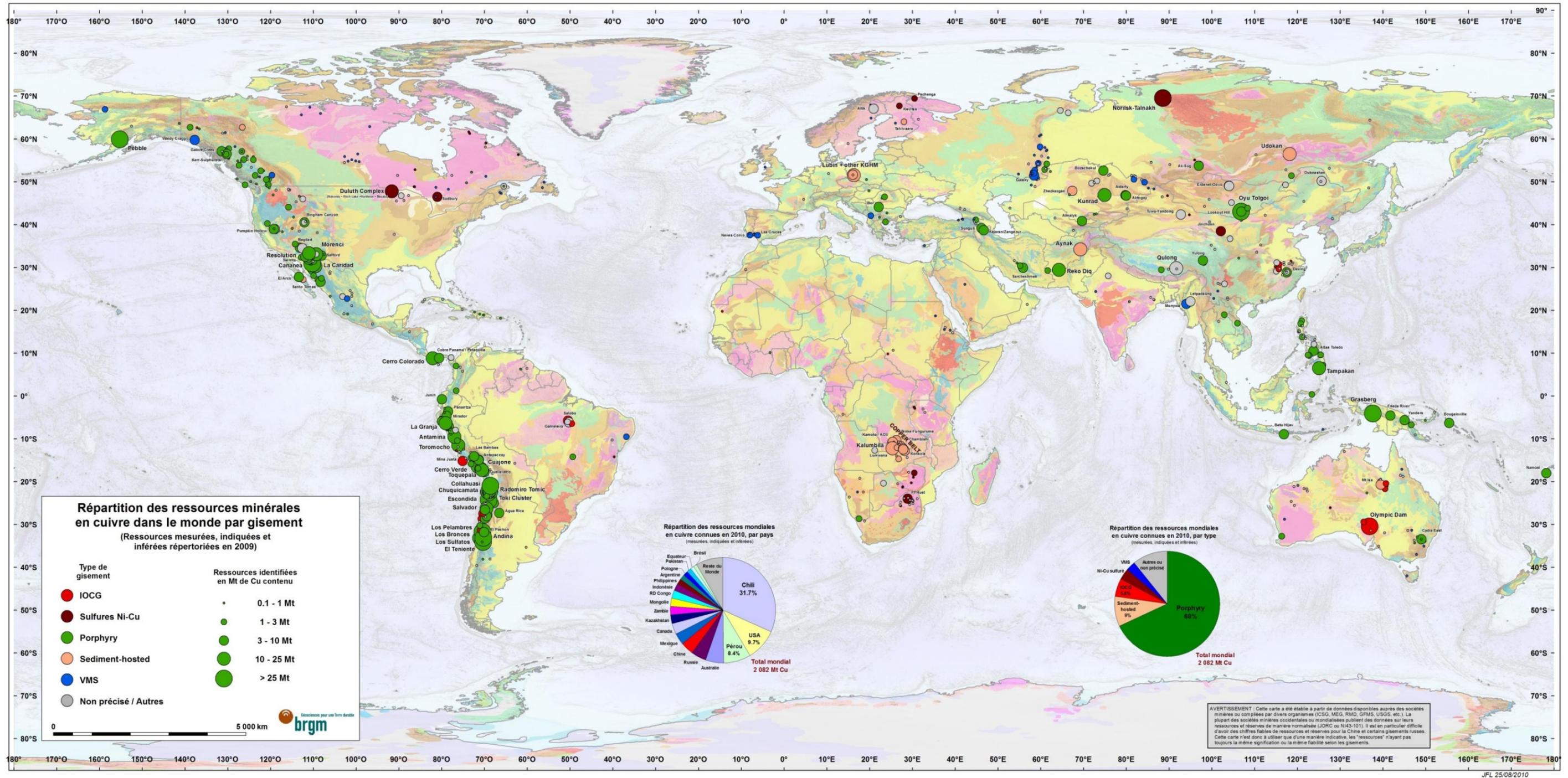


Figure 14 - Répartition mondiale des ressources minières en cuivre connues en 2009.

4.3. PRODUCTION

Pour les métaux majeurs, on peut généralement connaître une production minière par pays (c'est-à-dire la quantité du métal contenue dans les minerais extraits sur le territoire de chaque pays producteur). Mais pour le sélénium, on ne connaît éventuellement que la quantité de sélénium produite par pays retraitant des boues anodiques issues du raffinage du cuivre (voir § 4.4.), donc pour l'essentiel des pays raffineurs de cuivre issu de la pyrométallurgie, dont certains ne sont pas producteurs miniers, comme le Japon, la Belgique ou l'Allemagne.

En pratique, d'après l'USGS, sur 56 raffineries électrolytiques dans le monde, 52 récupèrent les boues résiduelles d'électrolyse pour retraitement (George, 2008). Global Industry Analysts (2008) écrit que, sur 80 raffineries de cuivre dans le monde, seule une vingtaine récupère le sélénium (GIA, 2008). Une nouvelle enquête serait nécessaire pour mieux appréhender la réalité. Il est toutefois possible que ces données soient cohérentes, puisque certaines raffineries récupèrent les boues mais ne récupèrent pas le sélénium, expédiant leurs boues pour retraitement ailleurs.

4.3.1. Données récentes et actuelles

Il est très difficile de rassembler les chiffres de production mondiale de sélénium, ceux-ci étant rarement publiés par les sociétés productrices et n'étant que rarement compilés par les services statistiques nationaux des pays concernés. Quelque pays, le Canada (NRCAN), l'Inde (Indian Bureau of Mines), le Japon et la Pologne (Annuaire statistique) publient officiellement des statistiques nationales de production.

L'USGS, qui publie régulièrement des compilations mondiales de production de la plupart des substances minérales, a publié en janvier 2010 le tableau de données suivant :

	2008	2009
Japon	754	755
Belgique	200	200
Canada	156	150
Russie	110	110
Chili	78	70
Philippines	65	65
Finlande	60	60
Pérou	45	45
Suède	20	20
Inde	14	14
USA	"withheld to avoid disclosing company proprietary data"	
Autres pays	9	10
TOTAL	1 511	1 499

Tableau 13 - Production de sélénium par pays, telle que publiée par l'USGS en 2010.

Or ces données sont très incomplètes et ne couvrent qu'environ 56 % de la consommation mondiale (de 2 693 t de sélénium en 2008, d'après GIA), laquelle est pourtant couverte, aux variations de stocks près, à 90 % par la production primaire, sachant que le recyclage ne fournit que 100 à 200 t/an. On constate :

- que les États-Unis ne publient plus de manière transparente leur production, considérée comme confidentielle. Cette production était publiée jusqu'en 1996 et variait selon les années de 200 à 380 t de sélénium ;
- que les pays de l'Union Européenne, exception faite de la Pologne, ne publient pas non plus de manière transparente leur production : la production de la Belgique (Raffinerie de Hoboken, Umicore) n'est pas publiée, et les analystes (dont l'USGS) se contentent de reporter d'année en année le chiffre de 200 t depuis longtemps. On fera la même remarque sur la Suède et la Finlande (Raffineries de Boliden), et sur l'Allemagne (Aurubis et sa filiale Retorte). La Pologne en revanche publie sa production nationale (de KGHM, 82 t en 2008) dans son annuaire statistique, donnée omise dans le tableau de l'USGS ;

Dernière minute : l'USGS vient de publier en janvier 2011 la nouvelle édition de son "Mineral Commodity Summary" pour le sélénium. Dans son édition précédente de janvier 2010, l'USGS n'avait inscrit aucune production de sélénium pour l'Allemagne pour les années 2008 et 2009. Mais dans cette nouvelle édition, l'USGS inscrit, pour l'Allemagne, une production de 700 t de sélénium en 2009 et 680 t en 2010. L'Allemagne serait ainsi le 2^{ème} producteur mondial de sélénium à quasi égalité avec le Japon. Cette information comblerait une bonne partie de l'écart constaté entre la production et la consommation mondiale de sélénium. L'USGS ne cite malheureusement pas la source de ses données. Une telle production viendrait a priori d'Aurubis. Il serait important, pour une meilleure compréhension du marché mondial du sélénium, d'obtenir les véritables chiffres de production à la source auprès d'Aurubis.

- plusieurs autres pays produisent du sélénium : le Kazakhstan (Kazakhmys aurait produit 155 t en 2007 et 56 t en 2008), le Mexique (Southern Copper Corp. a produit 47.3 t en 2008 à la raffinerie de La Caridad – production rapportée par l'USGS mais omise de son tableau récapitulatif), la Chine (Jiangxi Copper produirait une centaine de tonnes par an), l'Inde (capacité d'environ 14 t/an), la Serbie (environ 8 t/an). Les Etats-Unis exporteraient désormais une bonne partie de leurs boues anodiques résiduelles d'électroraffinage de cuivre pour traitement à l'extérieur, mais ils produiraient encore entre 20 et 40 t/an. L'Australie, la Zambie, l'Ouzbékistan, l'Afrique du Sud, la Corée du Sud et l'Iran produisent aussi ou ont produit du sélénium.

Le tableau 14 tente de récapituler les données de production issues de diverses sources pour les réconcilier avec la consommation rapportée. On observe que, même à consolidation maximale, le total de production obtenu reste à seulement environ 80 % de la consommation, et ce chaque année (ce qui ne permet pas de rétablir l'équilibre par les variations des stocks). On en déduit plutôt que la production de plusieurs pays reste probablement largement sous-évaluée (Belgique, pays scandinaves, Chine, Russie, Kazakhstan, etc.).

Récapitulatif de la production mondiale de sélénium par pays, selon les sources. Tentative de réconciliation

Année : Source :	2004				2005				2006				2007				2008				2009			
	USGS	BGS	NR CAN	Com- biné	USGS	BGS	NR CAN	Com- biné	USGS	BGS	NR CAN	Com- biné	USGS	BGS	NR CAN	Com- biné	USGS	BGS	NR CAN	Com- biné	USGS	BGS	NR CAN	Com- biné
Belgique	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Canada	271	277	271	271	107	107	216	106	74	144	144	251	156	191	144	251	156	191	144	251	156	191	144	251
Chili	82	82	84	84	84	84	84	74	70	70	70	70	78	70	70	70	78	70	70	70	78	70	70	70
Finlande	61	65	65	66	66	62	66	62	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Allemagne	1	14	14	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Inde	12	12	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Japon	599	599	599	599	625	625	625	730	806	806	806	806	806	806	806	806	806	806	806	806	806	806	806	806
Pérou	52	76	49	70	75	50	75	75	45	59	45	59	45	59	45	59	45	59	45	59	45	59	45	59
Philippines	48	48	68	68	68	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Russie	85	85	100	100	100	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
Serbie	5	5	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Suède	20	131	20	122	20	122	20	135	20	126	20	126	20	126	20	126	20	126	20	126	20	126	20	126
Chine	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65	65
Kazakhstan	100	100	60	60	60	70	70	70	70	155	70	155	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Pologne	83	83	82	82	82	87	87	87	87	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
Ouzbékistan	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Mexique																								
USA	Withheld				Withheld																			
Australie																								
Iran																								
Zambie																								
Afrique du Sud																								
Autres pays																								
Total production rapportée	1 437	1 763	1 856	1 811	1 338	1 605	1 811	1 440	1 536	1 899	1 899	2 153	1 511	1 789	1 789	2 075	1 499	1 499	1 499	2 075	1 499	1 499	2 075	1 499
Total production avec estim. haute des prod. Mex.+USA+Aus+Iran+Zamb.				1 951			2 033					2 293									2 215			2 215
Total consommation rapportée			2 519	2 542			2 587					2 640									2 693			2 693

Tableau 14 - Récapitulatif de la production mondiale de sélénium par pays, selon les sources. Tentative de réconciliation.

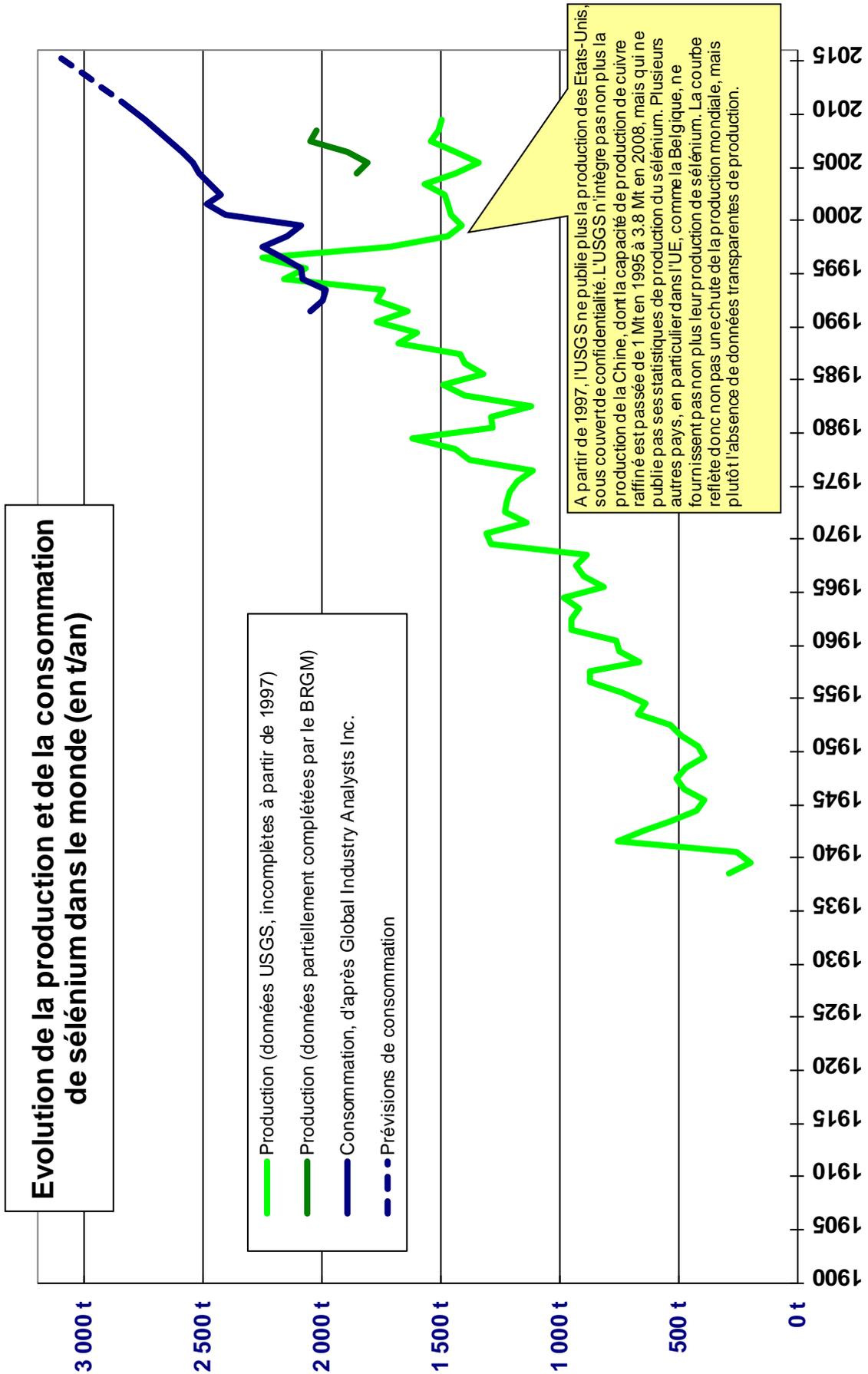


Figure 15 - Evolution historique de la production et de la consommation de sélénium.

Metal-Pages (2008) rapportait des estimations de la production 2008 dans la fourchette 2 300 - 2 700 t (cette dernière estimation correspondrait alors à la consommation de 2 693 t estimée par GIA),

La figure 15 montre l'évolution de la production rapportée et de la consommation de sélénium depuis la 2^{ème} Guerre Mondiale. On constate la tendance régulière à la croissance de la consommation, et la chute de la courbe de la production à partir de 1997, qui reflète en réalité la chute des informations statistiques fiables (arrêt de la publication des données américaines, non prise en compte de la production chinoise qui, si elle reflétait sa production de cuivre raffiné, pourrait être passée de 225 t en 1995 à plus de 750 t en 2008 et 2009).

Estimation de la capacité mondiale d'approvisionnement minier en sélénium sur la base de la production mondiale de cuivre en 2009			
Pays	Production minière de cuivre en 2009	Production minière de cuivre dans la filière pyrométallurgie	Capacité estimée de source de sélénium récupérable
Chili	5 393 kt	3 234 kt	695 t
Pérou	1 215 kt	1 058 kt	227 t
Chine	1 041 kt	980 kt	211 t
Indonésie	972 kt	972 kt	209 t
Australie	838 kt	834 kt	179 t
USA	1 206 kt	746 kt	160 t
Russie	699 kt	689 kt	148 t
Canada	480 kt	477 kt	103 t
Kazakhstan	468 kt	468 kt	101 t
Pologne	441 kt	441 kt	95 t
Zambie	620 kt	419 kt	90 t
Iran	234 kt	234 kt	50 t
Brésil	217 kt	212 kt	46 t
DR Congo	293 kt	200 kt	43 t
PNG	167 kt	167 kt	36 t
Mexique	242 kt	164 kt	35 t
Argentine	143 kt	143 kt	31 t
Mongolie	126 kt	124 kt	27 t
Afrique du Sud	110 kt	110 kt	24 t
Bulgarie	101 kt	101 kt	22 t
Reste du monde	773 kt	690 kt	148 t
TOTAL	15 780 kt	12 464 kt	2 680 t

Tableau 15 - Estimation d'un ordre de grandeur de la capacité de production minière de sélénium par pays.

(sur la base de la production minière de cuivre sous forme de concentré, et dans l'hypothèse moyenne de la récupération de 0.215 kg de sélénium pour 1 t de cuivre raffiné issu des concentrés)

La répartition de la production donnée dans les tableaux 13 et 14 est celle des pays raffineurs, mais pas celle des pays de l'origine minière des concentrés et donc de l'origine minière du sélénium. On peut estimer un plafond approximatif de la production de sélénium selon les pays de source minière à partir de leur production minière de cuivre sous forme de concentrés (c'est-à-dire en excluant la production minière de cuivre traitée par SX-EW qui exclut la production de sélénium) – sachant que 90 % de la production de sélénium vient du raffinage du cuivre. Le tableau 15 donne la production minière mondiale de cuivre en 2009 et estime la quantité de sélénium qui pourrait en être issue dans l'hypothèse d'école de 0,215 kg de sélénium produit pour 1 t de cuivre raffiné (cf. 4.1.3.).

Le tableau 15 donne un ordre de grandeur extractible de 2 680 t de sélénium, à comparer avec les 2 500 t estimés comme produits. On voit que l'ordre de grandeur est respecté, et on peut déduire, à titre indicatif, que l'ordre de grandeur de la production possible de sélénium pourrait difficilement être modifié : on ne peut pas imaginer produire rapidement 10 fois plus de sélénium qu'on en produit actuellement indépendamment d'un changement d'ordre de grandeur de la production de cuivre (sauf à développer de nouvelles sources alternatives).

4.3.2. Facteurs sous-tendant l'évolution de la production au cours des prochaines années

La production de sélénium provenant essentiellement du traitement des résidus d'électroraffinage du cuivre, l'accroissement prévisible de la production de cuivre, estimé à environ 4 % par an pour suivre l'accroissement de la demande, devrait permettre, si l'on traitait l'ensemble des résidus de raffinage, une croissance de la production de sélénium aussi d'environ 4 % par an. Ceci devrait permettre, techniquement, de soutenir une croissance de la demande du même ordre¹⁶.

Les analystes du GIA publient plutôt une prévision de croissance de la demande en sélénium de 2,1 % par an par extrapolation de la croissance constatée ces trois dernières années.

La production de sélénium primaire (hors recyclage) restera cependant plafonnée tant que l'on ne récupérera le sélénium qu'essentiellement des résidus de traitement des concentrés de cuivre sulfuré (un tel plafond aurait été de 2 680 t en 2009, voir Tableau 15 ci-dessus).

Le taux de récupération du sélénium ne serait améliorable qu'en retraitant une plus grande proportion, voire la totalité, des résidus d'électroraffinage (« slimes »). On estime qu'on retrouve dans ces résidus environ 70 % du sélénium initialement contenu dans le minerai, mais le processus conduisant du minerai aux anodes est mis au point pour optimiser la récupération du cuivre. Il est donc peu envisageable d'augmenter ce

¹⁶ Ce en faisant l'hypothèse (vraisemblable) que la proportion d'environ 25 % du cuivre qui est produit par la filière SX-EW (qui ne permet pas la récupération du sélénium) restera aux environs de 25 %, et que donc la production de cuivre par pyrométallurgie suivra aussi une croissance de 4 %.

taux. Ensuite, le taux de récupération du sélénium des résidus d'électroraffinage retraités (teneurs de l'ordre de 10 % de sélénium) est excellent, donc peu améliorable. Mais on ne retire pas encore la totalité des résidus dans toutes les raffineries.

Si la demande en sélénium devait s'accroître davantage que la production de cuivre et que celle-ci ne pouvait plus permettre une offre suffisante en sélénium, il conviendrait d'étudier d'autres filières d'extraction possibles (pétroles et bitumes, charbon, soufre, minerais d'uranium, etc.), peu étudiées jusqu'à présent faute de besoin.

5. La filière industrielle

5.1. DU MINERAI AU MÉTAL : ÉTAPES DE LA TRANSFORMATION

Lors de la fusion des concentrés de cuivre (ou de nickel-cuivre), les éléments tels que Se, Te, mais aussi Au et Ag se rassemblent dans la matte, puis dans le blister de cuivre à l'issue du convertissage. Le blister, coulé en anodes, est ensuite raffiné par électrolyse dans un bain de sulfate de cuivre (« électroraffinage »). Du cuivre purifié, raffiné (à 99,99 %) se dépose en cathode, et les résidus constituent une boue anodique ou « slime » (voir Fig. 16).

Ces résidus contiennent du sélénium, du tellure, mais aussi d'autres éléments tels que des métaux précieux (Au, Ag) et divers (Pb, As, Sb, Cu résiduel, etc.). Selon l'origine des anodes, les teneurs en sélénium et tellure des boues anodiques peuvent atteindre 10 à 25 % Se et 5 à 10 % Te (Jdid et Blazy, 2008).

Ces boues anodiques (« slimes ») résiduelles de l'électroraffinage du cuivre issu du traitement pyrométallurgique des concentrés de minerais de cuivre sulfuré sont la source de 90 % du sélénium ainsi que du tellure produits dans le monde. Le retraitement de ces boues anodiques a pour objectif non seulement de produire du sélénium et du tellure commercialisable, mais aussi de rejeter des déchets débarrassés de ces éléments potentiellement nuisibles à l'environnement et dont le rejet est en général très réglementé.

Il existe plusieurs procédés industriels d'extraction du sélénium (et du tellure) à partir des boues anodiques. Les principales voies sont décrites succinctement en § 5.1.1. et 5.1.2. ci-après (résumées d'après Jdid et Blazy, 2008)

5.1.1. Grillage alcalin oxydant

Dans ce procédé, on convertit d'abord le sélénium et le tellure à l'état hexavalent par un grillage alcalin oxydant. On mélange les boues avec du carbonate de sodium afin d'obtenir une pâte consistante, qui est ensuite extrudée ou bouletée, puis séchée en veillant à conserver une bonne porosité aux boulettes pour faciliter l'oxydation. Le grillage oxydant s'effectue à 530-650 °C, sans volatilisation de Se et Te. On broie le produit grillé et on le lixivie en milieu alcalin : le sélénate de sodium passe en solution alors que le tellurate reste dans le résidu. On extrait alors le sélénium soit par réduction du sélénate de sodium en séléniure de sodium par du charbon de bois, puis en faisant précipiter le sélénium élémentaire un barbotage d'air dans le séléniure mis en solution ($\text{Na}_2\text{Se} + \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NaOH} + \text{Se}^0$), soit en réduisant le sélénate en sélénite par l'acide chlorhydrique concentré, puis en réduisant le sélénite par des sels ferreux ou du SO_2 ($\text{SeO}_3^{2-} + 2 \text{SO}_2 \rightarrow 2 \text{SO}_4^{2-} + \text{Se}^0$).

Schéma du processus de production du cuivre par pyrométallurgie

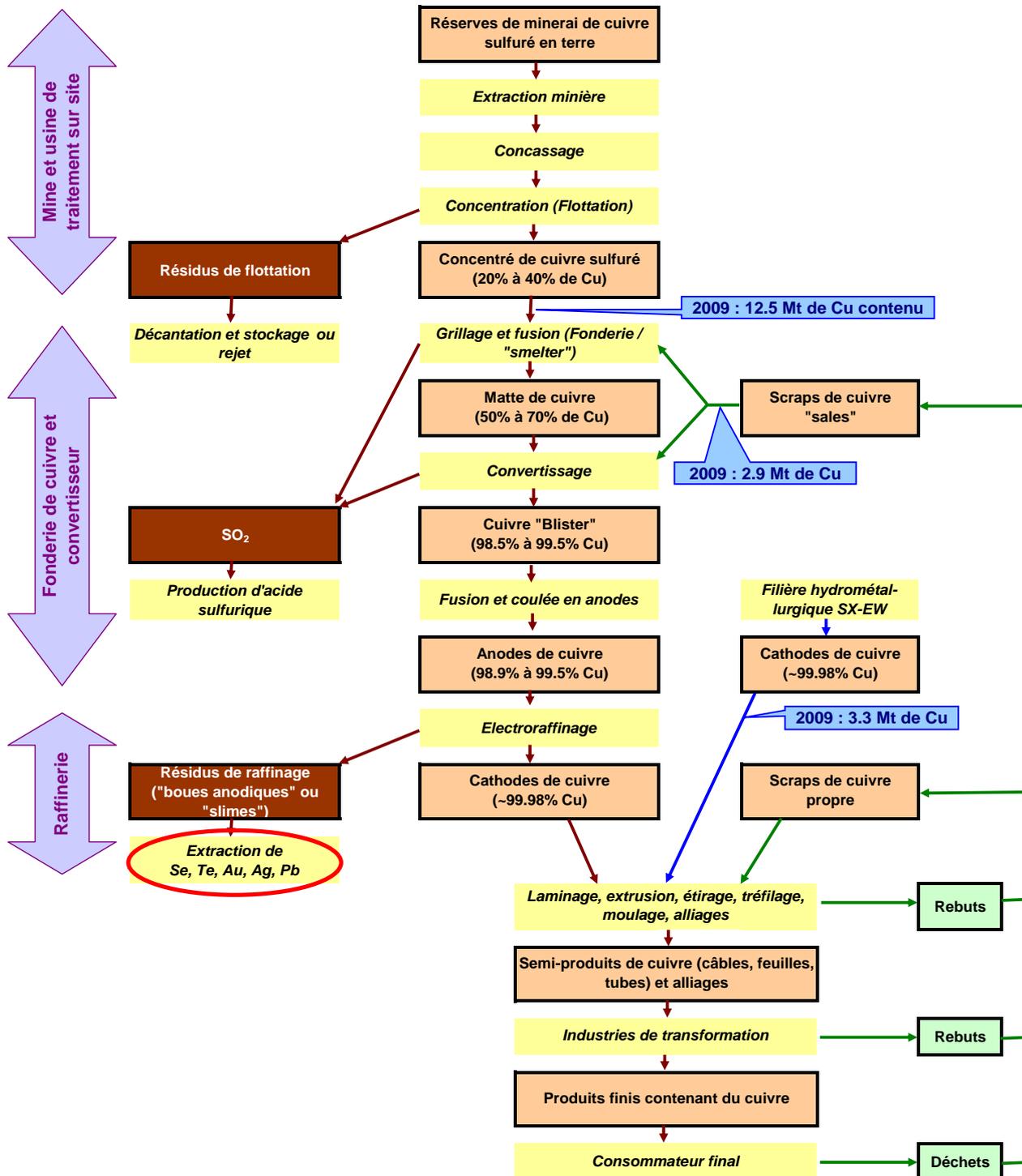


Figure 16 - Position de la production des boues anodiques à sélénium et autres éléments dans le processus de production de cuivre par pyrométallurgie.

5.1.2. Grillage sulfatant

Dans ce procédé, on convertit d'abord le sélénium et le tellure en dioxydes qu'on sépare par différence de volatilité. On grille les boues anodiques en présence d'acide sulfurique à une température de 500 °C à 600 °C. TeO₂ reste dans la phase solide de grillage avec les métaux précieux. Une partie du SO₂ généré en grande quantité est employé pour précipiter le sélénium élémentaire, avec production d'acide sulfurique recyclable, selon la réaction $\text{SeO}_2 + 2 \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Se}^0 + 2 \text{H}_2\text{SO}_4$

Ce procédé a l'avantage de produire du sélénium à 99,5 % - 99,7 % de pureté.

5.1.3. Purification du sélénium

Le sélénium obtenu par les procédés ci-dessus contient toujours des traces de tellure. On peut le purifier par distillation sous vide (« vapoméallurgie »), la température d'ébullition du sélénium (685 °C) étant inférieure à celle du tellure (990 °C) et de la plupart des autres impuretés métalliques encore présentes.

On peut aussi le purifier en fondant le sélénium à 300 °C avec un mélange de nitrate de sodium et de nitrate de potassium. À cette température, le sélénium ne réagit pas avec le nitrate, tandis que le tellure s'oxyde et passe dans le sel fondu avec d'autres impuretés métalliques.

5.1.4. Procédé hydrométallurgique sur mattes nickelifères

Un procédé industriel hydrométallurgique d'extraction du sélénium peut s'insérer dans le traitement des mattes nickelo-cuprifères, résultant de la fusion des concentrés sulfurés de nickel et de cuivre porteurs de métaux précieux (platinoïdes, en particulier). Les mattes de la société Lonmin en Afrique du Sud, constituées de Ni₃S₂ et de Cu_{1,6}S, titrant 0,05 % de Se, sont traitées selon le procédé de lixiviation suivant : Les mattes sont lixiviées à l'acide sulfurique à pression atmosphérique, qui met le nickel en solution : après chauffage de la solution à la vapeur, évaporation et cristallisation, on obtient un sulfate de nickel hexahydraté à 22-25 % de Ni. Environ 50 % du nickel et du cobalt passent ainsi en solution.

On traite ensuite les résidus solides par lixiviation sous une pression d'oxygène de 35 bars à 165 °C. On met alors en solution les sulfures de Ni et Cu qui n'avaient pas été attaqués par la première étape. Les nouveaux résidus solides vont à la raffinerie des métaux précieux.

La solution cupro-nickélifère titre environ 40 mg/l de sélénium et 10 mg/l de tellure. De l'ordre de 80 à 85 % du sélénium et du tellure contenus dans la matte sont extraits par la lixiviation sous pression. Le sélénium est présent sous forme de sélénite et de séléniate, réduits ensuite par SO₂ (cf. § 5.1.2).

5.2. LES PRODUCTEURS DE SÉLÉNIUM

Les sociétés productrices de sélénium sont essentiellement celles qui raffinent du cuivre ou retraitent les boues anodiques issues de l'électroraffinage du cuivre, qui traitent des mattes de cuivre-nickel, ou qui recyclent des déchets polymétalliques.

Il n'y a pas de producteur français de sélénium. Les principaux producteurs mondiaux sont listés ci-dessous. On notera que des données de production chiffrées n'ont pu être établies que pour Xstrata, KGHM et Southern Copper.

Il existe un large éventail de producteurs de boues anodiques sélénifères ou de sélénium, situés dans un large éventail de pays. La situation du sélénium est donc très peu monopolistique.

5.2.1. Europe

Aurubis (Allemagne) (www.aurubis.com) est le plus important producteur de cuivre raffiné en Europe, dans ses raffineries de Hambourg (Allemagne), Olen (Belgique) et Pirdop (Bulgarie). Produit divers sous-produits dont du sélénium brut, qui est ensuite purifié et combiné en divers produits par sa filiale **RetorteGmbH** à Rothenbach (Allemagne). Ni Aurubis ni Retorte ne publient de quantité de sélénium produit. Vulcan (2010) estime à 250 t de Se la capacité annuelle d'Aurubis. Le BGS, qui publie des statistiques mondiales, indique une production annuelle de seulement environ 12 t de Se pour l'Allemagne¹⁷.

Dernière minute : Voir remarque en 4.3.1.

Umicore (Belgique) et en particulier sa branche Umicore Precious Metals Refining (www.preciousmetals.umicore.com) raffine et recycle des métaux précieux, métaux de base et métaux rares à partir d'un large éventail de matériaux, y inclus des déchets recyclés ou des résidus de fonderies et de raffineries métallurgiques, dans sa raffinerie de Hoboken, près d'Anvers, en Belgique. Il produit entre autres du sélénium et du tellure à partir des boues anodiques. Il affiche une capacité de production annuelle de 600 t de sélénium et de 150 t de tellure, mais ne publie pas sa production réelle. Hard Assets Investors évalue sa production annuelle à 100 à 200 t/an de sélénium, et l'USGS et le BGS qui publient des statistiques mondiales donnent une production annuelle d'environ 200 t de Se pour la Belgique.

Boliden (Suède) (www.boliden.com) exploite les mines polymétalliques à cuivre d'Aitik, Garpenberg, Boliden (Suède), Los Frailes (Espagne) et la mine de plomb-zinc de Tara (Irlande), la fonderie et raffinerie de Rönnskar (Suède), la fonderie de Harjavalta et la raffinerie voisine de Pori (Finlande), et les fonderies de zinc d'Odda

¹⁷Aurubis ayant produit 932 000 t de cuivre raffiné (cathodes) de septembre 2009 à septembre 2010, l'application du ratio 1 kg de sélénium pour 4 t de cuivre raffiné donnerait une production de 233 t de sélénium, très proche du chiffre de Vulcan (Hard AssetsInvestors). Cependant, une partie du cuivre raffiné produit par Aurubis provient du recyclage de déchets de cuivre, la production de sélénium pourrait donc être inférieure.

(Norvège) et Kokkola (Finlande) et de plomb de Bergaöe (Suède). Produit entre autres du sélénium brut à 95 % à Rönnskar et du sélénium à 99,5 % à Pori, mais ne publie pas sa production. Hard Assets Investors évalue sa production annuelle à environ 100 t/an de sélénium. Le BGS, qui publie des statistiques mondiales, donne une production en 2008 de 130 t pour la Suède et 65 t pour la Finlande, correspondant probablement uniquement à la production de Boliden.

KGHM Polska Miedz (Pologne) (www.kghm.pl) exploite les mines polymétalliques à cuivre (+ Mo, Ag, Ni, Co, Pt, Pd et Se en sous-produits) de Lubin, Rudna et Polkowice-Sieroszowice (Pologne), et les Fonderies et raffineries de cuivre de Glogow et Legnica (Pologne). Fabrique des semi-produits de cuivre à Cedynia (Pologne). L'unité de Glogow traite les boues anodiques issues des deux raffineries de Glogow et Legnica et récupère les métaux précieux (Au, Ag, Pt, Pd) et le sélénium. L'annuaire statistique polonais (Burkowicz *et al.*, 2007) publie une production de 85 t de Se en 2007 et de 82 t en 2008, productions reprises par le BGS.

Atlantic Copper (Espagne) (www.atlantic-copper.es), filiale à 100 % de l'américain Freeport McMoRan Copper and Gold, fond et raffine à Huelva (Espagne) du cuivre à partir des concentrés provenant des mines de Freeport de Grasberg (Indonésie) et de Candelaria (Chili). La raffinerie de Huelva produit et vend des boues anodiques qui contiennent des métaux précieux (Au, Ag) et vraisemblablement Se et Te, mais ne les traite pas sur place.

PM Pure Metals GmbH (Allemagne) (www.pmpuremetals.de), filiale à 100 % de Recyclax SA (France) (ex-Metaleurop), produit et raffine dans son usine de Langelshiem, et commercialise divers métaux rares en particulier pour l'électronique et l'opto-électronique, dont du sélénium 5N et du Te. Sa source de matières premières et sa production réelle resteraient à renseigner.

RTP Bor (Serbie) (www.rtb.rs) exploite la mine de cuivre de Bor (Serbie) et la fonderie et raffinerie associée. Elle publiait encore produire 5,2 t de sélénium en 2004 et 8,3 t en 2005, mais ne publie plus de production depuis lors. L'USGS estimait encore une production de 8 t en 2008.

Lundin Mining (Canada) (www.lundinmining.com) exploite la mine de cuivre-zinc de Neves Corvo (Portugal), la mine de cuivre-nickel sulfuré d'Aguablanca (Espagne), et des mines de zinc en Suède et en Irlande. Ses mines de Neves Corvo et d'Aguablanca ne produisent que des concentrés, qui sont vendus tels quels à des fondeurs. Lundin ne publie pas de contenu en sélénium, mais il est vraisemblable que ses concentrés en contiennent et qu'il soit récupéré au niveau des fondeurs-raffineurs.

Inmet Mining (Canada) (www.inmetmining.com) exploite la mine de cuivre-zinc de Pyhäsalmi (Finlande) qui produit des concentrés vendus à des fondeurs et ne précise pas le contenu en sélénium. Inmet exploite aussi la mine de cuivre de Las Cruces (Espagne) mais traite le minerai par SX-EW et n'en récupère donc pas le sélénium.

*[Dernière minute](#) : Lundin Mining et Inmet Mining ont annoncé le 12 janvier 2011 s'être mis d'accord pour une fusion des deux sociétés sous le nom de **Symterra**.*

5.2.2. CEI

Norilsk Nickel (Russie) (www.nornik.ru) exploite les mines de nickel-cuivre-platinoïdes de Taïmyr/Norilsk et les fonderies et raffineries de Norilsk (Polar Division) et les mines de nickel-cuivre et la fonderie de Pechenga et la raffinerie de Monchegorsk (Kola division). Norilsk exploite aussi des mines de nickel en Australie et au Botswana et une raffinerie de nickel en Finlande. Norilsk est le premier producteur mondial de nickel et de palladium, un important producteur de cuivre, et produit aussi du cobalt, des métaux précieux et autres platinoïdes (Au, Ag, Pt, Pd, Rh, Ru, Ir), du sélénium et du tellure. Le sélénium et le tellure sont produits à Norilsk. Les quantités produites annuellement ne sont pas publiées.

Ural electromed / Ural Mining and Metallurgical Company (Russie) (www.elem.ru et www.umfg.com) exploite des mines, fonderies et raffineries de cuivre dans l'Oural, et produit et commercialise en sous-produits des métaux précieux (Au, Ag, platinoïdes), du sélénium et du tellure. Il ne publie pas sa production, mais il affichait une capacité de production en sélénium ciblée à 50 t en 2002. Vulcan (2010) estime sa production annuelle à environ 100 t Se.

Kyshtymsky Electrolytic Copper JSC (Russie) (www.kmez.ru) exploite la fonderie et raffinerie de cuivre de Kyshtym, qui traiterait, d'après Metal-Pages (2008) les concentrés de la mine de cuivre de Karabash (Tchelyabinsk) exploitée par Russian Copper Company (www.rmkgroup.ru). Elle produit et commercialise des cathodes et des fils de cuivre, et en sous-produits des métaux précieux (Au, Ag), du sélénium et du tellure. Metal-Pages (2008) estime sa production annuelle à 4 à 5 t Se.

Kazakhmys (Kazakhstan) (www.kazakhmys.com) est une société cotée à Londres mais opérant essentiellement au Kazakhstan. Elle y exploite entre autres 15 mines et 2 fonderies-raffineries de cuivre (Djezkazgan et Balkhash). Elle fabrique et commercialise des cathodes et des barres de cuivre, ainsi que du zinc, de l'or et de l'argent en sous-produits. Kazakhmys ne publie pas de production de sélénium, mais en produit vraisemblablement. Vulcan (2010) estime que Kazakhmys produit environ 100 t/an, et le BGS publiait une production en sélénium du Kazakhstan de 155 t en 2007 et 70 t en 2008.

Almalyk Mining and Metallurgical Combine (Ouzbékistan) (www.agmk.uz) exploite la mine de cuivre d'Almalyk (Ouzbékistan) et le complexe métallurgique associé et produit vraisemblablement du sélénium ou au moins des boues anodiques sélénifères. Le BGS estime que l'Ouzbékistan produit environ 20 t de Se par an.

5.2.3. Amériques

Xstrata (Suisse) (www.xstrata.com) est un grand groupe minier et métallurgique largement diversifié qui exploite de nombreuses mines de substances variées à travers le monde, dont plusieurs mines de cuivre-nickel à Sudbury et Raglan au Canada, la mine de cuivre de Tintaya au Pérou et détient 44 % de la mine de cuivre de Collahuasi au Chili. Il possède la raffinerie de cuivre de CCR (Canada Copper Refinery) – anciennement à Montréal-Est au Canada, qui produit aussi du sélénium, du tellure et

des métaux précieux en sous-produits, à partir de ses propres concentrés ainsi que des résidus venant des mines canadiennes de Vale Inco. Xstrata a publié une production de 254 t de Se (soit ~10 % de la production annuelle) et 24 t de Te en 2009.

Vale Inco Ltd (Canada) (www.nickel.vale.com), filiale de Vale (Brésil) (www.vale.com), exploite entre autres des mines de nickel, cuivre et platinoïdes au Canada (Sudbury, Thomson, Voisey's Bay). Raffine du cuivre à Copper Cliff (Sudbury). Ne produit pas de sélénium directement mais fait traiter ses résidus sélénifères par la raffinerie CCR (Xstrata) à Montréal.

5NPlus (Canada) (www.5Nplus.com) produit, raffine et commercialise du sélénium, du tellure et de l'antimoine de haute pureté (5N+) ainsi que divers tellures utilisés en photovoltaïque (CdTe, ZnTe etc.), à partir de concentrés, résidus et déchets à recycler, dans 2 usines au Canada (Montréal, Québec, et Trail, Colombie-Britannique), une aux Etats-Unis (Deforest, Wisconsin) et une en Allemagne (Eisenhüttenstadt). Ne publie pas les quantités produites.

Mitsui & Co. (Canada) Ltd (Canada) (www.mitsui.ca), filiale de Mitsui & Co (Japon) (www.mitsui.co.jp). Mitsui est un conglomérat japonais de commerce, d'investissements et de services très diversifié. La Division « Aciers et Métaux » de sa filiale canadienne commercialise divers produits semi-finis en acier et divers métaux dont du sélénium.

Yukon Zinc Corp. (Canada) (www.yukonzinc.com) est une société minière junior en train d'achever la construction de la mine de zinc-argent (+Cu, Pb, Au, Se) de Wolverine, au Yukon. Début de la production prévu en 2011. Le minerai est assez riche en sélénium, avec des réserves exploitables de 2 800 t de Se. *C'est l'un des seuls gisements du monde pour lequel les ressources et réserves en sélénium ont été évaluées et publiées.*

Teck Resources Ltd (Canada) (www.teck.com) exploite des mines de zinc (Red Dog et Pend Oreille, USA) et la raffinerie de zinc de Trail (Canada), des mines de charbon (Alberta et SE de la British Columbia au Canada), les mines de cuivre de Highland Valley (Canada) et Quebrada Blanca (Chili) et détient des parts dans plusieurs autres mines de cuivre (Antamina, Chili ; Galore Creek, Canada...) et des mines d'or. Ne produit pas directement du sélénium mais étudie le traitement du sélénium contenu dans ses charbons.

Freeport McMoRan Copper and Gold (USA) (www.fcx.com) exploite les mines de cuivre ± molybdène ± or de Candelaria, Ojosdel Salado et El Abra (Chili), Cerro Verde (Pérou), Grasberg (Indonésie), Bagdad, Morenci, Miami, Safford, Sierrita (USA-Arizona), Tyrone (USA-Nouveau-Mexique) et de cuivre-cobalt de Tenké-Foungouroumé (RD Congo), de molybdène de Henderson (USA-Colorado). Freeport exploite la fonderie de Miami (Arizona), qui traite les concentrés de Morenci, Sierrita et Bagdad, et la raffinerie de cuivre d'El Paso (Texas). Freeport détient 100 % d'Atlantic Copper, qui exploite la fonderie et raffinerie de Huelva (Espagne), qui traite une partie des concentrés provenant des mines de Grasberg (Indonésie) et de Candelaria (Chili). Freeport détient aussi 25 % de PT.Smelting, qui gère la fonderie-

raffinerie de Gresik (Java-Est, Indonésie) qui traite des concentrés de Grasberg. Les minerais de Safford, Tyrone, Miami et Tenké-Foungouroumé sont traités par SE-EW. Phelps Dodge, acquis par Freeport en mars 2007, produisait encore en 1998 environ 200 t de sélénium à partir de ses mines des USA. Jdid et Blazy (2008) publient le schéma de production de sélénium de la raffinerie d'El Paso. Mais Freeport ne produirait plus désormais de sélénium et revendrait la totalité de ses boues anodiques à l'extérieur.

Kennecott (USA) (www.kennecott.com), filiale à 100 % de Rio Tinto (www.riotinto.com) depuis 1989, exploite la mine de cuivre de Bingham Canyon (USA-Utah) et la fonderie et raffinerie de Garfield (Utah). Kennecott déclare extraire de ses boues anodiques de l'or et de l'argent, mais ne publie pas de production de sélénium et de tellure. Jdid et Blazy (2008) publient cependant le schéma détaillé de sa filière de production de sélénium mis en place en 1995. Hard Assets Investors (Vulcan, 2010) estime que Kennecott produit probablement 170 t de sélénium annuellement.

Asarco (USA) (www.asarco.com) exploite les mines de cuivre de Mission, Ray et Silver Bell (USA-Arizona), la fonderie de cuivre de Hayden (Arizona) et la raffinerie d'Amarillo (Texas). Elle opère sous le régime de la faillite depuis 2005 et sa situation n'est toujours pas totalement clarifiée juridiquement, entre Grupo Mexico (Mexique) (www.gmexico.com) qui le contrôle et Sterlite Industries (Inde) (www.sterlite-industries.com) qui cherchait à en racheter une partie des actifs. La raffinerie d'Amarillo produit des cathodes de cuivre, de l'or, de l'argent, du sélénium et du tellure. Asarco déclare produire à Amarillo et commercialiser du sélénium 2N5 (à 99,5 %) et 3N (à 99,9 %) ainsi que du ferro-sélénium à 50 à 60 % Se, et du séléniure de bismuth (Bi_2Se_3), mais ne précise pas sa production. Hard Assets Investors estime qu'Asarco produit entre 20 et 40 t de sélénium par an, alors qu'il en produisait 150 t en 1995.

Southern Copper Corporation (www.southerncoppercorporation.com et www.southernperu.com), filiale à 80% de Grupo Mexico (Mexique) (www.gmexico.com), exploite des mines de cuivre (+ Mo, Au, Ag, Se) au Pérou (Cuajone, Toquepala, etc.), au Mexique (Cananea, La Caridad, etc.), les fonderies et raffineries d'Ilo (Pérou) et de la Caridad (Mexique). Produit et commercialise du sélénium 2N5. A produit en 2008 44,2 t de sélénium à Ilo (Pérou) et 47,3 t à La Caridad (Mexique). Jdid et Blazy (2008) publient la composition suivante des boues anodiques traitées à Ilo : 31,8 % Ag, 23,5 % Se, 2 % Pb, 0,16 % Te, 0,06 % Au.

Codelco (Chili) (www.codelco.cl) est la société minière et métallurgique d'État chilienne qui exploite cinq groupes de mines de cuivre (Codelco Norte / Chuquicamata, El Teniente, Andina, Salvador et Gaby divisions) et la fonderie-raffinerie de Ventanas, au Chili. Codelco est avec Freeport l'un des deux plus gros producteurs de cuivre au monde. La raffinerie de Ventanas publie avoir produit 384 kt de cuivre raffiné en 2009 et, à partir du retraitement de ses boues anodiques, 4,5 t d'or et 195 t d'argent. Elle ne publie pas de production de sélénium ni de tellure, mais il est vraisemblable qu'elle en produise ou qu'elle fasse poursuivre le retraitement de ses boues par une société spécialisée. Vulcan (2010) écrit : « Codelco produit une quantité modérée de sélénium ».

Cormiquim (Chili) (www.cormiquim.cl) est une société spécialisée dans la production et la commercialisation du sélénium et de divers composés chimiques du sélénium à partir des résidus de raffinage de mines de cuivre chiliennes, avec une usine chimique à Santiago (Quartier de Maipu). Cormiquim ne publie pas le nom de ses fournisseurs (probablement Codelco, entre autres), ni les quantités de sélénium produites.

5.2.4. Asie

Pan Pacific Copper Co Ltd (Japon) (www.ppcu.co.jp), détenu à 66 % par JX Nippon Mining & Metals (Japon) et à 34 % par Mitsui Mining and Smelting (Japon), achète des concentrés de cuivre et produit et commercialise une gamme de produits de cuivre (cathodes, produits semi-finis), des métaux précieux et divers sous-produits dont du sélénium 3N et 4N5 et du tellure 4N, en particulier dans ses raffineries de Saganoseki et Takejara (Japon). PPC ne publie pas sa production de sélénium, mais Hard Assets Investors évalue sa capacité à 250 t de Se par an.

JX Nippon Mining & Metals Co Ltd (Japon) (www.nmm.jx-group.co.jp) produit des cathodes et tôles de cuivre et divers métaux et produits dont InP, CdTe et ZnTe. Le sélénium est produit par sa filiale à 66 % Pan Pacific Copper Co Ltd (voir ci-dessus).

Nikko Shoji Co Ltd (Japon) (www.nikkoshoji.com) recycle des scraps et produit du cuivre et divers métaux, raffine et transforme des métaux rares et de spécialité, et en particulier du sélénium et du tellure dans son usine de Takatsuki (Osaka). Ne publie pas les quantités produites.

Shinko Chemical Co Ltd (Japon) (www.shinko-chem.co.jp) produit par recyclage divers métaux et composés dont du sélénium et certains de ses composés (SeS₂, sélénites, sélénates, séléniures métalliques, ferro-sélénium).

Mitsubishi Materials Corp (Japon) (www.mmc.co.jp) fabrique et commercialise un très grand nombre de matériaux pour la construction, pour l'automobile et pour l'électronique, ainsi que des métaux précieux. Elle détient entre autres 60,5 % de PT Smelting (fonderie-raffinerie de cuivre en Indonésie). Elle ne propose pas de sélénium dans son catalogue en ligne, mais Hard Assets Investors estime qu'elle en produit environ 100 t/an.

Sumitomo Metal Mining (Japon) (www.smm.co.jp) a des participations minoritaires avec Sumitomo Corp. dans plusieurs mines de cuivre (Candelaria au Chili, Morenci aux États-Unis, Northparkes en Australie, Batu Hijau en Indonésie) et dans des mines d'or, et exploite la mine d'or d'Hishikari au Japon. Elle produit de l'or, du cuivre-cathode (Fonderie-raffinerie de Toyo au Japon et participation dans la raffinerie de Jinlong en Chine), du nickel aux Philippines, du cuivre et du zinc à la fonderie de Shisaka et la raffinerie de Harima (Japon). Elle produit aussi de nombreux matériaux en particulier pour l'électronique, mais ne publie pas de production de sélénium. Hard Assets Investors estime qu'elle en produit environ 200 t/an.

Jinchuan Group (Chine) (www.jnmc.com) est le plus gros producteur chinois de nickel et l'un des plus gros de cuivre. Il exploite la mine de cuivre-nickel sulfuré de Jinchuan,

dans le Gansu, et la fonderie et la raffinerie associées, qui traitent aussi des concentrés provenant d'autres mines chinoises et de l'étranger. Il produit et commercialise du cuivre, du nickel, du cobalt, des métaux précieux (Au, Ag, platinoïdes) et du sélénium, pour lequel il affiche une capacité de 120 t/an, sans toutefois publier sa production réelle.

Jiangxi Copper (Chine) (www.jxcc.com) exploite 8 mines et 3 fonderies de cuivre en Chine, et produit et commercialise divers sous-produits tels que l'or, l'argent, le rhénium, le sélénium et le tellure en particulier dans sa fonderie-raffinerie de Guixi (Jiangxi). Ne publie pas les quantités produites. Hard Assets Investors estime qu'elle en produit environ 100 t/an.

Chang ShaZhong Gui Nonferrous Metals Co (Chine) (www.cszhonggui.com) commercialise du Se et du SeO₂.

PT Smelting (Indonésie) (www.smelting.co.id), détenue par Freeport (25 %) et les japonais Mitsubishi Materials Corp. (60,5 %), Mitsubishi Corp. (9,5 %) et Nippon Mining and Metals Co Ltd (5 %), exploite la fonderie-raffinerie de cuivre de Gresik, à Java-Est, et produit 1 800 t/an de boues anodiques à métaux précieux et vraisemblablement sélénium et tellure, qu'elle ne retire pas elle-même.

Pacific Rare Specialty Metals & Chemicals (Philippines) (www.prsmetals.com), filiale à 100 % de II-VI (USA) (www.ii-vi.com) est une société spécialisée dans la production et la commercialisation de sélénium et de tellure et de quelques composés (SeO₂, sélénites et sélénates). Elle retire des boues anodiques dans son usine de Cavite (Philippines). Les quantités produites ne sont pas publiées.

Hindustan Copper Ltd (Inde) (www.hindustancopper.com) est une société minière et métallurgique indienne d'état qui exploite quatre mines de cuivre et leurs complexes métallurgiques associés en Inde : Khétri, Indian/Ghatsila, Malanjkhand et Tajola. Produit et vend du cuivre cathode et des barres de cuivre et divers sous-produits. A produit du sélénium (Jdidi et Blazy, 2008, ont publié le schéma de production de sélénium d'Hindustan Copper à Mubhandar), mais il ne déclare plus commercialiser que des boues anodiques sélénifères. Les boues anodiques du « Indian Copper Complex » de Ghatsila titrent 20 à 28 % Se, 4 à 10 % Ag, 1 à 2 % Te, et 0,5 à 0,9 % Au. Les quantités produites ne sont pas publiées précisément (l'Indian Bureau of Mines publie des chiffres de production pour l'Inde mais ils sont incomplets).

Sterlite Industries (Inde) (www.sterlite-industries.com), filiale à 59,9 % de Vedanta Resources (www.vedantaresources.com), est une société minière et métallurgique indienne privée impliquée dans l'aluminium (mines de bauxite, raffineries d'alumine, fonderies d'aluminium), le zinc (contrôle Hindustan Zinc) et le cuivre (fonderie et raffinerie de Tuticorin). Fond et raffine du cuivre et produit des boues anodiques sélénifères. Produirait un peu de sélénium, d'après Hard AssetsInvestors.

5.2.5. Afrique

Palabora Mining Company (Afrique du Sud) (www.palabora.co.za) détenue par Rio Tinto (57 %), Anglo-American (17 %) et divers privés, exploite la mine de cuivre et autres métaux de Phalaborwa (Afrique du Sud) et la fonderie et raffinerie associés. A produit 82 kt de cuivre en 2009, et commercialise entre autres aussi des boues anodiques contenant environ 4 % de sélénium, mais aussi 20 % d'argent, 0,45 % d'or, 5 % de nickel et 2 % de tellure, et divers autres éléments.

5.2.6. Océanie

Hydromet Corp. Ltd (Australie) (www.hydromet.com.au) retraite dans son usine de Tomago (Newcastle, New-South-Wales) des résidus de fonderies et raffineries métallurgiques de cuivre et nickel. Produit et commercialise du cuivre, du sélénium et du tellure, avec capacité affichée de 150 t/an Se, prévue passer à 300 t/an.

5.2.7. La Selenium - Tellurium Development Association (SDTA)

Certains producteurs se sont regroupés en une association, la Selenium - Tellurium Development Association (SDTA, www.stda.org), sise à Cavite, aux Philippines (là où se trouve Pacific Rare Specialty Metals & Chemicals, cf. § 5.2.4), pour promouvoir le sélénium et le tellure et communiquer à leur sujet. Mais, contrairement aux « study groups » du cuivre et du nickel (« International Nickel Study Group », INSG, et « International Copper Study Group », ICSG) par exemple, cette organisation ne compile pas ni ne publie des statistiques de production. Il semble qu'elle n'ait rien publié depuis 2002 et n'est probablement pas très active.

5.3. DU MÉTAL AU PRODUIT FINI : ÉTAPES AVAL DE LA FILIÈRE

5.3.1. Les acteurs français

Il n'existe pas en France de producteurs de sélénium. Les principaux acteurs industriels français utilisateurs de sélénium sont les suivants.

Fournisseurs

Azelis Electronics (23, Rue des Ardennes, 75019 Paris, www.azeliselectronics.com), anciennement Promecome Electronics, est une division d'Azelis Arnaud (ex « Groupe Arnaud », www.arnaudgroup.com). C'est un important fournisseur de matériaux semi-conducteurs, autres matériaux ultrapurs et accessoires pour l'industrie des composants électroniques. Azelis Electronics commercialise du silicium, du germanium, des composés de gallium, d'indium, d'arsenic, de sélénium, de tellure, etc.

Son catalogue de produits séléniés est le suivant :

Selenium and compounds			
Compound	Purity	Form	Remarks
Se	5N, 6N	chunk, disk	
ZnSe	6N	chunk, powder	for carbonic acid glass laser
CdSe	6N	chunk, powder	solar battery
GeSe, GeSe ₂	6N	chunk, powder	
Bi ₂ Se ₃	5N, 6N	chunk, powder	
SbSe, Sb ₂ Se ₃	5N, 6N	chunk, powder	
PbSe	5N, 6N	chunk, powder	
AgSe, Ag ₂ Se	5N, 6N	chunk, powder	
In ₂ Se ₃	5N, 6N	chunk, powder	
SnSe, SnSe ₂	5N,	chunk, powder	
GaSe	6N	chunk, powder	
TlSe	5N	chunk, powder	
TeSe	5N, 6N	chunk, powder	
Cu ₂ Se	5N	chunk, powder	
Manufactured by Furukawa .			

Tableau 16 - Catalogue de produits séléniés commercialisés par Azelis Electronics.

Pour ces produits, Azelis Electronics est l'agent revendeur de la société japonaise Furukawa Co. Ltd (www.furukawakk.co.jp/e_index.htm) qui détient des participations dans la fonderie-raffinerie de cuivre d'Onahama au Japon.

Azelis Electronics propose aussi du sélénium 7N fabriqué par la société japonaise Osaka Asahi Metal Manufacturing Co. (www.asahimetal.co.jp/index%20english.html).

MCP-France (ZI de Fiancey, 26250 Livron-sur-Drôme) est une des filiales commerciales de la société britannique Mining and Chemical Products Ltd (MCP), Wellinborough, Royaume-Uni (www.mcp-group.com). Elle propose à son catalogue du sélénium 3N (à 99,9 %), du dioxyde de sélénium (SeO₂), du sélénite de sodium (Na₂SeO₃), ainsi que d'autres métaux mineurs (Bi, In, Ga, Te, Ge, Ta, Re) et certains de leurs composés.

Alfa Aesar France (2, allée d'Oslo, 67300 Schiltigheim) est une filiale de la société allemande de produits chimiques Alfa Aesar GmbH, Karlsruhe, Allemagne (www.alfa.com), qui commercialise entre autres du sélénium et certains de ses composés. Alfa Aesar GmbH est elle-même filiale du groupe britannique Johnson Matthey (www.matthey.com).

Verrerie

Saint-Gobain (92400 Courbevoie, www.saint-gobain.fr), est le n° 2 mondial du vitrage (n° 1 européen) et du verre de conditionnement.

Saint-Gobain est très vraisemblablement consommateur de sélénium pour son industrie verrière (verres décolorés, verres colorés, verres à faible transmission thermique), mais il n'a pas été trouvé d'informations ouvertes sur sa consommation de sélénium ni sur l'éventuelle teneur en sélénium de ses verres.

Par ailleurs, le groupe Saint-Gobain est impliqué dans la filière CIGS des panneaux photovoltaïques au travers de sa filiale allemande Avancis (voir paragraphe ci-dessous).

D'autres verriers français sont peut-être aussi consommateurs de sélénium.

Photovoltaïque CIGS

Avancis (AvancisGmbH & Co.KG, Solarstrasse 3, 04860 Torgau, Saxe, Allemagne, www.avancis.de/fr), filiale allemande de Saint-Gobain¹⁸, avait inauguré en octobre 2008 sa première usine de panneaux photovoltaïques CIGS à Torgau (Allemagne, Saxe), avec une capacité de 20 MWc/an. En octobre 2010, Avancis construit une deuxième usine à Torgau pour une capacité de 100 MWc/an (1^{ère} pierre posée en août 2010), et a annoncé le 11 octobre la construction d'une troisième usine de panneaux photovoltaïques CIGS en Corée du Sud en partenariat avec Hyundai Heavy Industries (Co-entreprise Hyundai-Avancis à 50 %-50 %), qui prévoit la production de 850 000 modules de base (pour toitures et champs solaires), soit une capacité de 100 MW/an, à partir du 2^{ème} trimestre 2012.

Nexcis (190, rue Célestin Coq, 13790 Rousset) est une jeune société française créée en 2008 qui prévoit de produire des panneaux CIGS mais n'a pas encore démarré de production industrielle. Elle a inauguré le 3 mars 2010 son unité de conception de modules photovoltaïques de nouvelle génération.

L'assembleur de panneaux photovoltaïques français Fonroche-Pevafersa (usine à Roquefort, près d'Agen, dans le Lot-et-Garonne), filiale du français Fonroche-Energie et de l'Espagnol Pevafersa, n'assemble que des panneaux au silicium.

Le projet de l'américain **First Solar** (www.firstsolar.com), début 2010, d'implanter une usine de panneaux photovoltaïques à Blanquefort, près de Bordeaux, en Gironde, avec 400 emplois à la clé, a été suspendu en décembre 2010 en raison des diminutions drastiques des aides de l'Etat au photovoltaïque en France.

¹⁸ Le groupe français Saint-Gobain s'est lancé dans la filière CIGS des panneaux photovoltaïques, en ayant fondé en 2006 la co-entreprise Avancis en Allemagne avec Shell (Shell Solar). Saint-Gobain a ensuite pris le contrôle à 100 % d'Avancis

Article de « L'Usine Nouvelle » du 3 mars 2010

www.usinenouvelle.com/article/nexcis-inaugure-son-unite-de-conception-de-modules-photovoltaïques-nouvelle-generation.N127310

Nexcis inaugure son unité de conception de modules photovoltaïques nouvelle génération

Créée fin 2008 comme « spin-off » de l'Institut de R&D sur l'énergie photovoltaïque, Nexcis a inauguré officiellement le 3 mars ses installations implantées dans l'ancienne unité de fabrication 6 pouces du site de STMicroelectronics à Rousset (Bouches-du-Rhône).

Cette start-up qui, en un an, a recruté près de 40 collaborateurs, vise à mettre au point des modules photovoltaïques en couches minces à partir d'une nouvelle technologie, dite « CIGSe,S », fondée sur un procédé d'électro dépôt de cuivre, d'indium et de gallium recuit sous atmosphère de sélénium et de soufre, « plus rapide et moins coûteux que le procédé sous vide » selon le directeur général de Nexcis, Olivier Kerrec. La société ambitionne de développer, à l'horizon 2011-2012, un pilote industriel démontrant la faisabilité de modules industrialisables à bas coût (de l'ordre de 0,8 euro de coût de revient par watt/crête), souples et légers pour faciliter leur positionnement sur des toitures de bâtiments, et affichant un taux de rendement supérieur à 10%.

Environ 1,5 million d'euros a été investi dans l'aménagement et l'équipement des 1 500 m² de locaux et salles blanches. Pour mener à bien son projet, Nexcis bénéficie d'un budget de près de 20 millions d'euros sur deux ans, abondé par Oseo, l'État, les collectivités territoriales et l'Europe.

Présidée par Pâris Mouratoglou, l'entreprise compte notamment, dans son actionnariat, EDF Energies Nouvelles et IBM. Selon Olivier Kerrec, près de 80 personnes issues de huit PME seraient mobilisées sur le projet, l'objectif, à terme, étant de bâtir une véritable filière française dans le domaine.

Électronique, photorécepteurs

Les sociétés impliquées dans l'électronique et ses composants et dans les photorécepteurs, telles que **Alcatel Lucent** (www.alcatel-lucent.com) le groupe **Thales** (www.thalesgroup.com) utilisent probablement du sélénium dans certains de leurs composants électroniques ou optiques, mais il n'est pas forcément individualisé ni comptabilisé comme tel, et les quantités utilisées ne sont pas publiées.

Métallurgie

La société minière et métallurgique française **Eramet** (75015 Paris, www.eramet.fr) utiliserait de petites quantités de sélénium, non publiées, pour sa branche Alliages, qui regroupe les activités de ses filiales **Aubert & Duval** (www.aubertduval.com) et **Erasteel** (www.erasteel.com) produisant divers aciers spéciaux.

La France serait par ailleurs le leader mondial du décolletage avec un total de 905 PME qui emploient 19 100 salariés et réalisent un chiffre d'affaires supérieur à 2 milliards d'euros, dont 23 % en exportation directe. Le décolletage est présent dans de nombreuses régions de France, mais 65 % de ces entreprises (557) sont installées en Haute-Savoie (source : www.1500tech.com), et en particulier dans la vallée de l'Arve (Pôle de Compétitivité Décolletage et Mécatronique Arve Industrie Haute-Savoie-Mont-Blanc, www.arve-industries.fr).

Ces entreprises françaises de décolletage transforment plus de 250 000 tonnes de métaux (aciers, inox, laiton, alliages cuivreux, alliages spéciaux, métaux précieux...) par an en un grand nombre de pièces. Elles sont fabriquées en petites, moyennes ou grandes séries et usinées dans des petits, moyens ou grands diamètres selon la spécialisation des entreprises¹⁹.

Il est possible que parmi les aciers et autres alliages de décolletage usinés en France, certains soient des aciers au sélénium, mais l'information reste à rechercher et la vulnérabilité des sociétés impliquées vis-à-vis de la disponibilité en sélénium n'est pas perçue.

Les constructeur automobile **PSA Peugeot Citroën** (www.psa-peugeot-citroen.com) et **Renault** (www.renault.fr) consomment vraisemblablement de petites quantités de sélénium, mais non individualisé comme tel, dans certains alliages ("aciers à usinabilité améliorée"), mais aussi probablement dans les vitrages et dans certains de leurs composants électroniques.

Soins et bien-être : cosmétique, diététique, compléments alimentaires

La société française **L'Oréal** (92110 Clichy, www.loreal.fr) produit entre autres des shampooings antipelliculaires au disulfure de sélénium (marque « Elsève » en particulier) et utilise peut-être du sélénium dans d'autres produits de soins et de cosmétique. Les quantités utilisées restent à renseigner.

La société **Nutrition et Santé SAS** (31250 Revel, www.nutrition-et-sante.fr) produit et commercialise des céréales enrichies en sélénium (« Sélégerme » de la marque « Gerblé », www.gerble.fr).

¹⁹ Les principaux débouchés de l'industrie du décolletage sont les secteurs de l'automobile, l'aéronautique, l'aérospatial, le médical, l'électronique, l'électroménager, la connectique, le machinisme agricole, le bâtiment, les travaux publics, l'armement, l'industrie électrique et nucléaire.



Figure 17 - Exemples de produits cosmétiques et diététiques au sélénium
(© www.loreal.fr et © www.nutrition-et-sante.fr).

De nombreux laboratoires pharmaceutiques proposent des compléments alimentaires avec des oligoéléments dont du sélénium, sous forme de comprimés, gélules, ampoules, ainsi que des crèmes de soins au sélénium (cf. Fig. 5).

- le laboratoire Labcatal (92120 Montrouge, www.labcatal.com) produit et commercialise en pharmacie des ampoules « oligosol » à 100 µg de sélénium ;
- Merck Médication Familiale (21070 Dijon, www.merck-medication-familiale.fr), filiale du groupe Allemand MerckKGaA (Darmstadt, Allemagne, www.merck.de) produit et commercialise du Sélénium-ACE et des crèmes de soins au sélénium sous la marque « Laboratoire Richelet » ;
- Fleurance Nature (32505 Fleurance, www.fleurance-nature.fr) commercialise divers compléments alimentaires dont « ACE-Sélénium-Zinc » ;
- le laboratoire Vita Api (83500 La Seyne-sur-Mer, www.proselem.com) produit et commercialise divers compléments alimentaires et soins sous la dénomination « Prosélem » ;
- le laboratoire Ponroy (85612 Montaigu, www.ponroy.com) produit et commercialise divers compléments alimentaires et soins et en particulier les comprimés « Sélénium-Forté » ;
- ... liste non exhaustive ...

La consommation globale en sélénium de cette branche resterait à évaluer mais elle est probablement minime, vu les quantités infinitésimales entrant dans la composition des produits finis. Il n'y a pas de réelle criticité, puisque, comme on l'a vu en 3.7.2, une multiplication du prix du sélénium par 100 ou même par 1 000 aurait un impact

insignifiant sur le prix du produit fini. Cette branche trouvera donc toujours le sélénium dont elle aura besoin puisqu'elle pourra y mettre le prix.

Alimentation du bétail et engrais

La France est un pays où l'élevage est important, et la France produit annuellement 21,22 millions de tonnes d'aliments du bétail (hors aliments pour animaux de compagnie) (source : **Syndicat National de l'Industrie de l'Alimentation Animale**, www.nutritionanimale.com). Cette industrie représente en France **214 entreprises**, 12 000 emplois, et 7 milliards d'Euros de chiffre d'affaire. Elle est la première d'Europe.

À titre d'exemple, les compléments alimentaires bovins proposés par l'entreprise **Serviroc** (03410 Domérat, www.serviroc.fr) contiennent 10 à 20 mg de sélénium par seau de 25 kg, soit 400 à 800 µg/kg.

Les fabricants français d'aliments complets se fournissent auprès de fabricants d'adjuvants pré-mélangés d'oligo-éléments et vitamines, comme par exemple **Alliance Nutrition Animale** (80 600 Doullens, www.alliance-na.com).

Il n'a pas été trouvé de statistiques totalisant la consommation française de sélénium dans cette branche, mais l'ordre de grandeur est peut-être d'une dizaine de tonnes. L'industrie française de l'alimentation du bétail est probablement un consommateur majeur de sélénium, bien devant l'électronique et le photovoltaïque.

Une recherche d'informations plus exhaustive mériterait d'être menée auprès des agro-industries, bien que l'exercice soit compliqué par la dispersion des entreprises du secteur, pour mieux appréhender cette consommation, identifier ses filières d'approvisionnement et en déterminer la perception de la criticité. Une telle enquête pourrait s'étendre à l'alimentation des animaux de compagnie et à la consommation de la médecine vétérinaire.

L'enjeu est d'importance puisque la consommation mondiale de sélénium pour l'agriculture est évaluée à 15 % du total, soit 400 t annuelles, soit davantage aujourd'hui que ce qui est anticipé comme besoin pour le photovoltaïque en 2050 (336 t d'après Angerer *et al.*, 2009).

En ce qui concerne les engrais, il semblerait que la France utilise peu de sélénium dans ses engrais, son sous-sol n'étant pas réputé naturellement déficient.

5.3.2. Autres acteurs européens

Parmi les autres acteurs européens concernés par le sélénium, hors France et hors producteurs listés en 5.2.1, on pourra citer les entreprises suivantes.

Eburon Organics NV (Rijkvorsel, Belgique) (www.eburon-organics.com), développe, produit et commercialise plus de 200 produits chimiques organiques dont plusieurs

dizaines de molécules contenant du sélénium (sélénourée, sélénocystéine, sélénométhionine, etc.).

AEG ElektrofotografieGmbH (Warstein, Allemagne) (www.aeg-photoconductor.de), filiale de Hologic (USA), est un fabricant et fournisseur de tambours de photocopieurs et imprimantes laser, et de photorécepteurs au sélénium, en particulier dans l'imagerie médicale (radiographie X, mammographies, etc.).

Mining and Chemical Products Ltd (Wellinorrough, Angleterre) (www.mcp-group.co.uk) fabrique et commercialise des composés chimiques du bismuth, du sélénium (Se élémentaire, composés avec As, Sb, Cu), du tellure, de l'indium et du gallium.

Wassen International Ltd (Leatherhead, Angleterre) (www.wassen.com) produit et commercialise de nombreux compléments alimentaires dont des levures au sélénium (« Selenium-ACE » et « Selenium-Xtra », voir Fig.4).

Würth Solar (Schwäbisch Hall, Allemagne) (www.wuerth-solar.de) est un fabricant de modules photovoltaïques CIS (Cuivre-Indium-Sélénium), dont il se présente comme le leader mondial. Capacité de production de 30 MWc par an, correspondant à 350 000 modules CIS par an.

5.3.3. Les principaux acteurs dans le reste du monde

Parmi les autres acteurs mondiaux concernés par le sélénium, hors Europe et hors producteurs listés en 5.2, on citera encore les entreprises suivantes.

II-VI Inc. (Saxonburg, Pennsylvania, USA) (www.ii-vi.com) est un fabricant de matériels optiques et opto-électroniques (dont composants au ZnSe), dont des matériels d'optique infrarouge et proche-infrarouge à usage militaire, par sa filiale californienne Exotic Electro-Optic Inc. (www.exotic-eo.com). II-VI a acquis en 2007 le producteur de sélénium philippin Pacific Rare Specialty Metals and Chemicals Inc. (cf. § 5.2.4).

Embria Health Sciences (Cedar Rapids, Iowa, USA) (www.embriahealth.com) fabrique des composés organiques pour les compléments alimentaires, dont le produit eXselen® à la sélénométhionine.

Hologic Inc. (Bedford, Massachusetts, USA) (www.hologic.com) développe, produit et commercialise des systèmes d'imagerie médicale, utilisant en particulier des photorécepteurs au sélénium manufacturés par sa filiale allemande AEG ElektrofotografieGmbH (cf. § 5.3.2.).

D.F. Goldsmith Chemical & Metal Corporation (Evanston, Illinois, USA) (www.dfgoldsmith.com) produit et commercialise divers métaux précieux et commercialise des métaux rares et leurs sels, dont du sélénium.

Selenium Limited (Austin, Texas, USA) (www.selenbio.com) est une société biopharmaceutique mettant au point et commercialisant des revêtements de surface

antibactériens à usage médical (p.ex. lentilles de contact) et divers composés pharmaceutiques à base de sélénium.

Williams Advanced Materials Inc. (Buffalo, New-York, USA) (www.williams-adv.com) produit et commercialise divers métaux et alliages de haute pureté et des matériaux utilisés pour des dépôts en couches minces pour l'électronique, l'optique et le photovoltaïque, et en particulier les composés pour les panneaux photovoltaïques CIGS (CuSe, Cu₂Se, CuInSe₂, In₂Se₃, Ga₂Se₃, Cu(In,Ga)Se₂, Se en 3N à 6N).

Osaka Asahi MetalMfg Co Ltd (Osaka, Japon) (www.asahimetal.co.jp) commercialise divers métaux de haute pureté, dont du sélénium.

KisanKinzoku Chemicals Co (Osaka, Japon) (www.kisan.ne.jp) raffine et commercialise divers métaux rares et leurs composés, dont du sélénium et du tellure.

Shanghai Ruihong Chemical Co. Ltd (Shanghai, Chine) (www.rhchem.com) produit et commercialise divers produits chimiques dont du sélénium et quelques-uns de ses composés.

Vital Speciality Materials Ltd (Guangzhou, Chine) (www.vitalchem.com) produit et commercialise divers métaux rares et leurs composés chimiques, dont du sélénium élémentaire 3N à 6N, de l'oxyde, des alliages, des séléniures, des sélérites et des sélémates. Usine à QinXin (QingYuan, Guangdong). A des bureaux de vente aux USA, au Brésil et en Italie.

China Rare Metal Material Co Ltd (Jiangxi, Chine) (www.china-raremetal.com) commercialise de nombreux métaux rares et leurs composés chimiques sous diverses formes, dont du sélénium 5N et 7N.

Synthon (Pty) Ltd (Durbanville, Afrique du Sud) (www.synthon.co.za) fabrique et commercialise divers produits chimiques dont des composés du sélénium (chlorures, tétrabromure, oxyde, oxychlorure, sulfures de sélénium, sélérite et sélémate d'or).

6. Conclusions

6.1. SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

RISQUES PESANT SUR LES APPROVISIONNEMENTS					IMPACTS ÉCONOMIQUES EN CAS DE TENSIONS SUR LES APPROVIS.
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
3	1	1	2	1	3
Les gisements contenant du sélénium sont très nombreux et géographiquement bien répartis. Cependant la production est dépendante de celle du cuivre et ne peut pas être augmentée indépendamment. Un déséquilibre entre l'offre et la demande est donc possible	La production mondiale est répartie sur tous les continents et entre de nombreuses sociétés. La pérennité des filières cuivre est assurée à court et moyen termes	Une politique de restriction et de quotas n'aurait pas beaucoup d'effet car les sources d'importation sont nombreuses. Scénario improbable	Pas de problème particuliers, autres que ceux relatifs aux raffineries de cuivre. Récupération au contraire souhaitable pour éviter de rejeter du sélénium dans l'environnement	La métallurgie du cuivre est absente de France mais assez présente en Europe (Belgique, Allemagne, Suède, Espagne, Pologne...)	Le sélénium est partiellement substituable pour la métallurgie, l'électronique et le photovoltaïque. Criticité pour les verriers restant à évaluer. Criticité pour l'agriculture restant à évaluer. La consommation pour la santé humaine est minime et peu dépendante du prix.

Tableau 17 - Composantes de la criticité du sélénium.

La criticité moyenne sur les approvisionnements est évaluée à « faible » (2 sur 5), vu le nombre élevé et la répartition variée des producteurs de sélénium et les quantités minimales utilisées par les industriels français.

Au niveau impact, le sélénium est bien entendu critique pour une société comme Nexcis dont l'objet principal est le photovoltaïque CIGS. Pour la plupart des autres utilisateurs, il est considéré comme peu critique compte tenu des faibles quantités utilisées. La criticité industrielle du sélénium est évaluée à « moyenne » (3/5). Elle pourra toutefois être appelée à s'accroître au fur et à mesure du développement de la filière photovoltaïque CIGS.

La synthèse des criticités est résumée par la figure 18 ci-après.

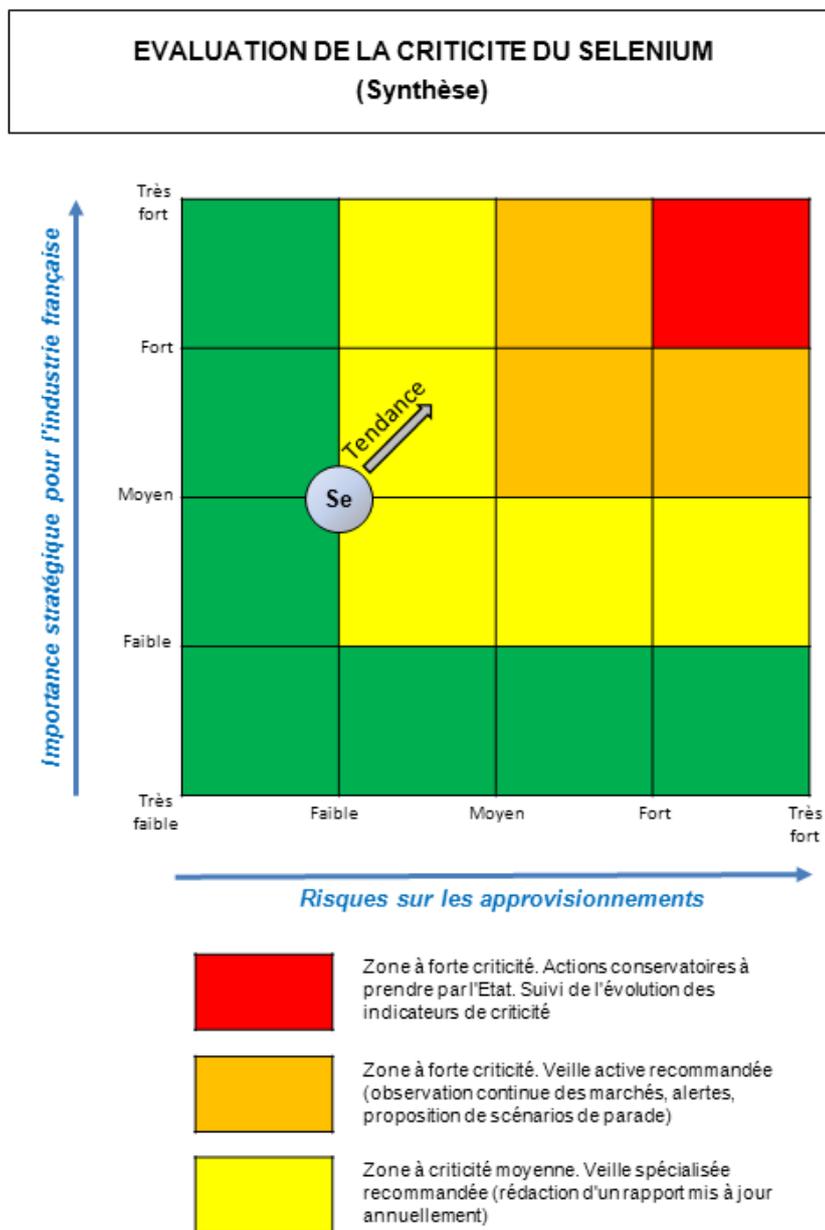


Figure 18 - Synthèse de la criticité du sélénium.

6.2. COMMENTAIRES SUR LA PERCEPTION DE LA CRITICITÉ

Les utilisateurs français consultés estiment en général qu'il y a peu de risques réels sur les approvisionnements en sélénium, et n'ont pas de difficulté pour se procurer les faibles quantités qui leur sont nécessaires.

Ils n'ont cependant pas toujours une connaissance complète des filières d'approvisionnement depuis la source minière, n'ayant souvent de relation qu'avec l'amont immédiat, c'est-à-dire leurs fournisseurs.

De plus, des branches utilisatrices importantes comme la verrerie et l'agriculture n'ont pas encore été consultées quant à leur perception de la criticité.

6.3. LE PROBLÈME STATISTIQUE

L'un des problèmes majeurs pour évaluer la criticité du sélénium est l'absence de statistiques fiables aussi bien au niveau de la production que de la consommation.

Pour mieux appréhender la criticité sur la disponibilité et l'équilibre offre-demande et donc l'évolution des prix, il serait souhaitable d'avoir une meilleure connaissance statistique chiffrée de la production.

Mais les importants producteurs de sélénium de l'Union Européenne, comme Umicore (Belgique), Aurubis (Allemagne) et Boliden (Suède), ne publient pas leur production.

Le cas d'Aurubis illustre bien la difficulté que cause l'opacité à la bonne appréhension du marché du sélénium : le BGS estime la production allemande à 12 t Se par an (Brown, 2010), Hard Assets Investors à 250 t/an (Vulcan, 2010), l'USGS à « non communiqué » (George, 2010), puis à 700 t pour l'année 2009 (George, janvier 2011), soit le quart de la production mondiale.

On pourra aussi chercher à améliorer la perception de la consommation en France (secteur du verre et de l'alimentation du bétail, par exemple, etc.).

6.4. DÉVELOPPEMENT DE LA VEILLE ÉCONOMIQUE

Au vu de ce qui précède, il est recommandé de maintenir une veille générale sur cet élément, en s'attachant aussi à veiller sur la possible évolution de ses usages.

Il pourra être recommandé d'exercer cette veille en réseau avec les autres organismes et institutions concernées (douanes pour les imports et exports, autres services géologiques européens et autres intéressés par la thématique, etc.).

6.5. DÉVELOPPER LA CONNAISSANCE DU POTENTIEL MINÉRAL FRANÇAIS ET EUROPÉEN

En ce qui concerne les ressources, sur le territoire français, comme au niveau mondial, il n'est guère envisageable dans un avenir proche de rechercher et de développer des gisements spécifiques de sélénium.

Mais en cas de succès des recommandations plus générales de relance d'acquisition de connaissances sur les ressources minérales du territoire national, on pourra

recommander, s'il est procédé par exemple à une réévaluation des amas sulfurés français (Chessy, Rouez...), d'en évaluer les teneurs en sélénium et sa récupérabilité.

Au niveau de l'Union Européenne, on pourrait aussi essayer de mieux évaluer les teneurs et ressources en sélénium des divers gisements de cuivre sulfuré (Scandinavie, Péninsule ibérique, Pologne, etc.).

Il pourra aussi convenir d'étudier les teneurs et la récupérabilité du sélénium lors des opérations de nettoyage et retraitement d'anciens déchets miniers et métallurgiques.

On pourra aussi recommander des projets de recherche destinés :

- à améliorer le recyclage et à étudier la recyclabilité à partir de certains des usages pour l'instant dispersifs (verre) ;
- à étudier la récupérabilité du sélénium à partir d'autres sources (soufre, charbon, résidus de raffinage du pétrole, minerais d'uranium, etc.), au cas où sa récupération comme sous-produit du cuivre, et donc plafonnée par la production de cuivre, ne suffirait plus à satisfaire la demande.

Bibliographie

- Angerer G., Erdmann L. et al.** (2009) - Rohstoffefür Zukunftstechnologien. Fraunhofer Institut für System- und Innovations forschung / Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung. 83 p.
- Bisson M. et al.** (2009) - Sélénium et ses composés – Ineris, Fiches de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. 121 p.
- Brown T.J. et al.** (2010) - World Mineral Production 2004-2010. *British Geological Survey*.111 p.
- Burkowicz A., Galos K., Guzik K., Kamyk J., Lewicka E., Smakowski T. et Szlugaj J.** (2010) - Minerals yearbook of Poland 2008. Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences.
- Butterman W.C & Brown R.D.** (2004) - Mineral Commodity Profiles – Selenium. USGS open-file report 03-018. 20 p., 3 tab., 4 fig.
- Christmann P. et al.** (2010) - Panorama mondial 2010 des terres rares. Rapport BRGM/RP-58161-FR, 90 pages, 14 fig., 22 tab.
- Fthenakis V., Wang W. & Chul Kim H.** (2007) - Life cycle inventory analysis of the production of metals used in photovoltaics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009), *Elsevier*, pp. 493–517
- George M.W.** (2010) - Mineral Commodity Summary – Selenium. *USGS*.p.142-143.
- George M.W.** (2011) - Mineral Commodity Summary – Selenium. *USGS*.
- George M.W.** (2008) - Selenium and Tellurium. *USGS Mineral Yearbook 2008*.
- Global Industry Analysts Inc.** (2008) – Selenium, a global strategic business report, April 2008. Report MCP2136. *Global Industry Analysts Inc.* 234 p., 98 tab.
- Jdid E-A. & Blazy P.** (2008) - Métallurgie du sélénium et du tellure. Techniques de l'Ingénieur, Doc. M 2370. 17 p., 6 tab., 6 fig.
- Lide D.R.** (2009) - CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC PressInc, 90^e éd., Relié, 2 804 p.
- Merchant Research and Consulting Ltd** (2009) - Selenium Market Review. 24 p. 19 tab.
- Metal Pages** (2008) - Selenium Global market Overview. *Metal Pages Research*.15 p.

Pierrot R. et al (1972-1979) – Inventaires Minéralogiques de la France, 05-Hautes-Alpes (1974) ; 12-Aveyron (1977) ; 22-Côtes-du-Nord (1975) ; 56-Morbihan (1979), Editions BRGM.

Sindeeva N.D. (1964) - Mineralogy and types of deposits of selenium and tellurium. Interscience Publishers, New-York.

STDA (2003) - Présentation du Selenium-Tellurium Development Association.

Vulcan T. (2010) - Selenium, Contrary Stuff – Hard Assets Investor. www.hardassetsinvestor.com, 6 p, 6 fig.

Wehnert T., Handke V. (2010) - Thin film implementation scenarios. Advanced Thin film technologies for cost-effective photovoltaics (Athlet – Project No.019670 co-funded within the 6th Framework Program of the European Commission. 85 p.

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