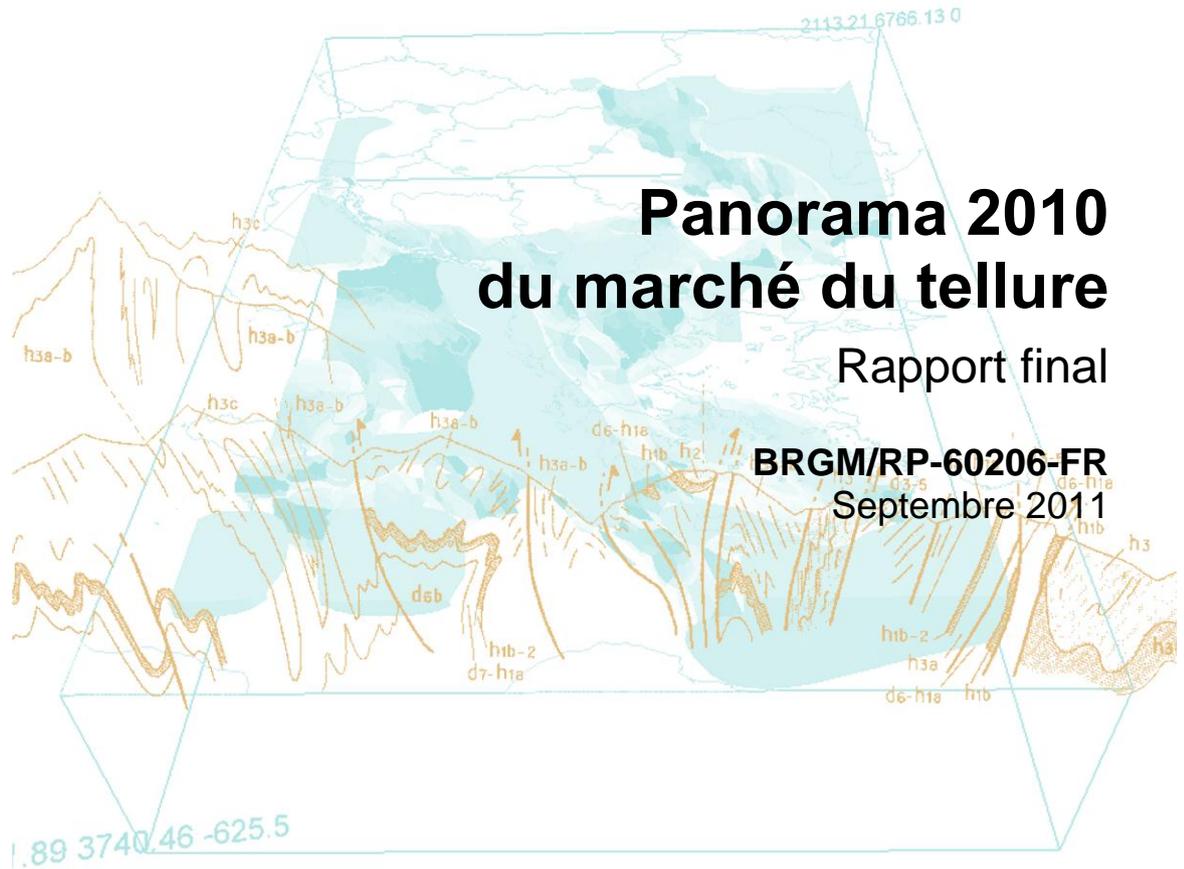


Document public



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Panorama 2010 du marché du tellure

Rapport final

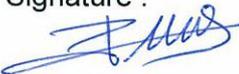
BRGM/RP-60206-FR

Septembre 2011

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2010 RES A07

A.S. Audion, J.F. Labbé

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 : Tellure, Stratégie économique, Stratégie des matières premières, Économie, Matières premières minérales, Production, Ressources, Marché, Industrie, Politiques publiques.

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

Audion A.S., Labbé J.F., avec la collaboration extérieure de la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS) (2010) - Panorama mondial 2010 du marché du tellure. BRGM/RP-60206-FR, 71 p., 21 fig., 11 tabl.

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

Résumé

Le tellure, 52^{ème} élément du tableau de Mendeleïev, est un métalloïde gris argenté qui est cassant et facilement pulvérisable. Avec une abondance moyenne de 1 ppb, il est l'un des éléments les plus rares de l'écorce terrestre.

Propriétés et usages

L'ajout de tellure améliore l'usinabilité d'aciers destinés à la construction mécanique et automobile. Il est également ajouté à des métaux non ferreux. Associé au plomb ou à l'étain, il augmente leur résistance à la vibration, à la fatigue et à la corrosion par les acides. L'ajout de tellure au cuivre et aux alliages Ni-Fe et Co-Fe améliore leur usinabilité ainsi que leur résistance mécanique et leur tenue à la corrosion.

Le tellure agit comme accélérateur de vulcanisation lors de la fabrication du caoutchouc et favorise sa résistance à la température. Des catalyseurs à tellure sont utilisés dans l'oxydation de composés organiques lors de la production de fibres synthétiques ainsi que dans diverses réactions de synthèses.

Le tellure est un semi-conducteur, sa conductivité électrique augmente légèrement lorsqu'il est exposé à la lumière. Il est donc largement utilisé en électronique, notamment en imagerie thermique, dans les détecteurs de radiations CZT (CdZnTe) et les capteurs de rayons X (CdTe). Il est également de plus en plus utilisé dans les technologies photovoltaïques à couches minces CdTe.

De façon marginale, le tellure peut être utilisé comme pigment dans les verres et céramiques ou dans la fabrication de disques optiques réinscriptibles.

La consommation mondiale de tellure est estimée à environ 220 t/an.

Substituabilité

Plusieurs composés peuvent remplacer le tellure dans la plupart de ses usages, mais ils entraînent en général une diminution de l'efficacité du produit ou une perte de ses caractéristiques. Du bismuth ou du calcium peuvent ainsi remplacer le tellure dans la fabrication des aciers. Dans le secteur du photovoltaïque à couches minces, il existe deux technologies concurrentes au CdTe : le CIGS et la silice amorphe.

Ressources

Le tellure se trouve en petites quantités, voire en traces, en substitution du soufre dans divers sulfures métalliques (gisements de cuivre sulfuré). Il peut se trouver sous forme de sulfure ou de minéral supergène de basse température. Occasionnellement, il est trouvé sous sa forme native, et sous forme de tellures de métaux de base et de

métaux précieux. Les tellures aurifères, tels que la calavérite (AuTe_2), sont les minéraux composés de l'or les plus fréquents.

S'il n'existe pas à proprement parler de gisement de tellure, il est présent dans différents types de corps minéralisés, tels que les porphyres cuprifères, les amas sulfurés à Ni-Co, les gisements hydrothermaux à Cu-Mo, les gisements de cuivre encaissés dans les sédiments ainsi que les épithermaux à Au-Ag.

Les ressources potentielles de tellure 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, vus les cours très faibles du tellure entre 1981 et 2003, il n'y a pas été dosé. Du tellure pourrait potentiellement être présent dans plusieurs gisements ou dans les résidus de leur exploitation, comme à Chessy, Rouez ou encore Salsigne.

Le tellure est à plus de 90 % un sous-produit de l'exploitation minière du cuivre. Les réserves mondiales de tellure sont évaluées à 22 000 t en 2009, mais très peu de données sont publiées par les producteurs, ces chiffres sont donc à prendre avec circonspection.

Production

Le tellure se trouve en petites quantités dans la plupart des sulfures, mais il est extrait à plus de 90 % des résidus de l'électroraffinage du cuivre (boues anodiques). Le reste de la production provient de l'écumage dans les raffineries de plomb ainsi que des poussières et gaz générés lors de la fonte des minerais de bismuth, cuivre et plomb. Très occasionnellement, le tellure peut être récupéré en sous-produit de la métallurgie du nickel-cuivre et des platinoïdes associés. Il n'est, à l'heure actuelle, pas récupéré dans l'exploitation des épithermaux à Au-Ag.

Il existe une grande opacité sur le marché du tellure, et les données concernant sa production sont très partielles. Les statistiques de productions sont, en effet, gardées confidentielles par de nombreuses sociétés, comme notamment aux États-Unis et en Europe.

La production mondiale est estimée à 175 t en 2010 par l'USGS, mais ces données sont probablement assez largement sous-estimées car peu de sociétés publient leur production. Une autre source l'estime à 250 t.

En se basant sur la production minière de cuivre dans la filière pyrométallurgique et à l'aide des estimations de la capacité de récupération de tellure dans cette filière, on obtient, en 2009, une capacité de production de tellure de 810 t. Cependant, l'USGS souligne que seule la moitié du tellure récupérable est effectivement récupérée, ce qui abaisse ce chiffre à 405 t.

Dans les prochaines années, le développement de projets visant à exploiter les sulfures de cuivre primaires plus profonds, associé à l'amélioration des techniques de récupération du tellure à partir des boues anodiques lors de l'électroraffinage (qui n'est

actuellement que de 50 %), devraient permettre d'accroître la production de tellure dans cette filière. D'autres sources de tellure devront également être envisagées si la demande mondiale en tellure tendait à s'accroître fortement : les épithermaux à or, les gisements d'uranium ou encore les charbons.

Recyclage

Les usages du tellure sont dispersifs et il n'existe pas de filière de recyclage spécialisée. Le marché et les prix sont très volatils et ne permettent pas, à l'heure actuelle, de justifier la mise en place du recyclage autre que sur des critères environnementaux.

Des usines pilote de recyclage de panneaux photovoltaïques ont été construites récemment aux États-Unis et en Europe principalement. Elles permettront de récupérer le tellure des cellules CdTe. Cependant, cette technologie est nouvelle et la durée de vie de ces cellules est estimée à 20-25 ans. Il n'existe donc pas encore de déchets de cette industrie à valoriser.

Prix

Jusqu'au début des années 1960, le prix du tellure était de moins de 4 \$/kg, il était très peu utilisé dans l'industrie. Il a augmenté un peu entre 1960 et le début des années 1990 avec le développement de diverses applications (industrie chimique, métallurgie, premières applications électroniques). Il a ensuite baissé, probablement en raison du remplacement progressif des photorécepteurs à tellure-sélénium par des photorécepteurs organiques, et d'autre part, à l'exportation massive de matières premières par les pays de l'ancienne Union Soviétique.

Les prix ont ensuite fortement augmenté à partir de 2005, comme ceux de la quasi-totalité des matières premières minérales, en liaison avec la très forte croissance économique chinoise et de sa demande en matières premières. Au 1^{er} mars 2011, le tellure s'échangeait au prix record de 302,50 \$/kg.

En l'absence de statistiques fiables concernant la demande en tellure, il est difficile de prévoir l'évolution de son prix. L'étroitesse du marché du tellure est un important facteur de volatilité des prix.

La demande devrait continuer à croître en électronique, tirée par le développement des panneaux photovoltaïques CdTe. Les utilisations du tellure en imagerie thermique, appareils de refroidissement thermoélectrique et instrumentation médicale sont également appelées à se développer. Étant données les faibles quantités de tellure demandées par ces applications, ces industries sont plus sensibles à la disponibilité physique du métal qu'à son prix.

Les autres industries principales consommatrices de tellure, la métallurgie et la chimie, tendent, quant à elles, à abandonner progressivement son utilisation au profit de substituts moins onéreux.

Cependant, en réponse à la hausse des prix de ces dernières années, la récupération du tellure dans les raffineries de cuivre devrait s'améliorer et le recyclage des cellules photovoltaïques va probablement se généraliser d'ici une dizaine d'années. L'offre en tellure disponible sur le marché pourrait ainsi être plus abondante. Mais les déséquilibres offre-demande à court terme, impossibles à chiffrer compte tenu du manque de données précises et fiables, pourraient continuer à faire varier les prix.

Les utilisateurs français

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

Azélis Electronics (division d'*Azélis Arnaud*) commercialise de nombreux composés de sélénium, germanium, gallium, indium et tellure.

Sofradir développe et fabrique des détecteurs infra-rouges refroidis pour des applications militaires, aérospatiales et commerciales. Ils sont spécialisés dans la technologie CdHgTe (MCT). Leader européen, le groupe est le premier fabricant mondial de détecteurs infra-rouges MCT de deuxième génération.

Des filiales du *Groupe Thales* (www.thalesgroup.com) utilisent ponctuellement des alliages Cu-Te et des soudures au tellure.

Le *CEA*, l'*ONERA* et le *Groupe Saint-Gobain* mènent des études et recherches sur des composés de tellure.

Il n'y a, à notre connaissance, pas de société française qui fabrique des panneaux photovoltaïques CdTe. Des groupes internationaux ont, en revanche, des implantations en France, comme *First Solar* (bureau à Paris, mais projet d'usine en Gironde abandonné après la baisse des aides fiscales au photovoltaïque individuel en France) ou *Wirsol Solar* (nouvelle usine de panneaux solaires CdTe à côté de Lyon ouverte en 2010).

Criticité

Dans la mesure où il n'existe pas d'acteur français en amont de la filière, les industriels font appel à des fournisseurs et ont une vision limitée des étapes plus amont de la filière.

D'un point de vue minier, les réserves et ressources en tellure sont suffisantes, et le principal point critique provient de sa récupération. À l'heure actuelle, seulement la moitié du tellure valorisable dans les boues anodiques serait effectivement récupéré.

Cependant, la hausse récente du prix encourage désormais des recherches pour améliorer les techniques de récupération de tellure des boues anodiques et pour produire du tellure à partir d'autres types de gisements (Au-Te, Pb, Zn), et envisager à moyen terme le recyclage des cellules photovoltaïques CdTe.

Les risques pesant sur les approvisionnements en tellure sont ainsi évalués à « moyens (3 sur 5) ».

La criticité stratégique du tellure est modérée dans la mesure où il n'est utilisé que dans des applications de niche qui en demandent un faible volume annuel. En l'absence de société française clairement engagée dans le photovoltaïque CdTe, l'importance stratégique du tellure pour l'industrie française est évaluée à 2,5 sur 5.

La criticité est schématisée par la figure de la page suivante.

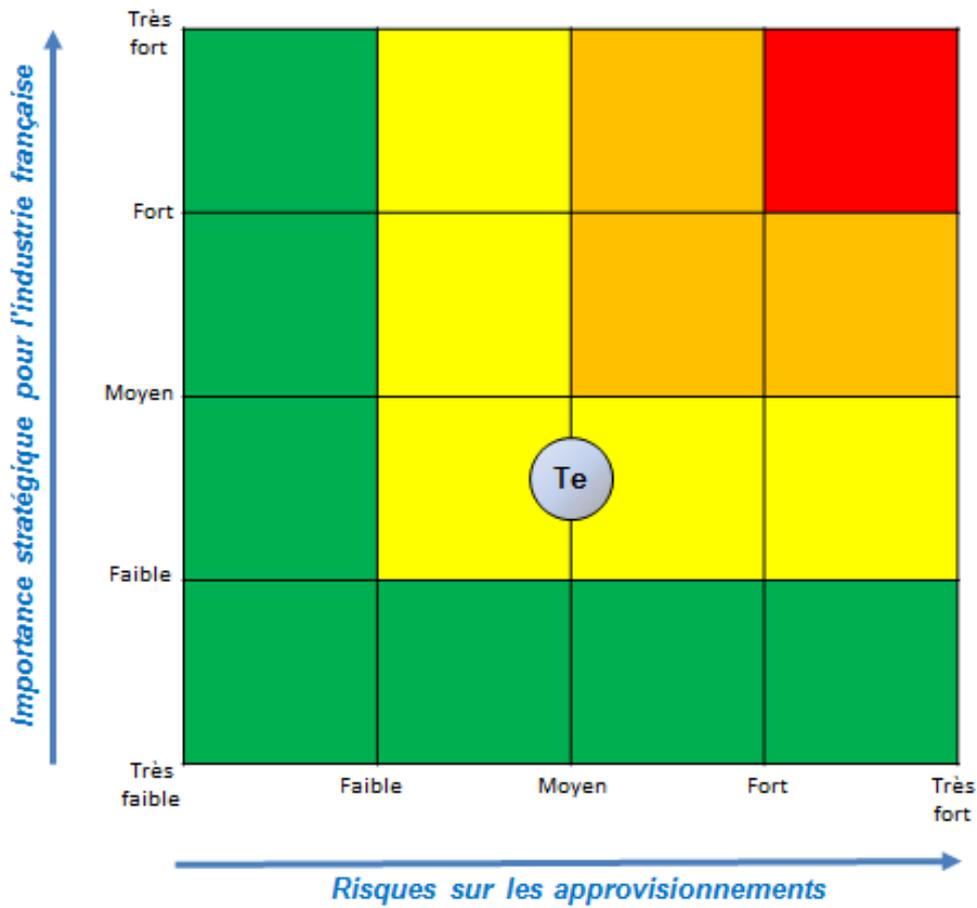
Propositions

Une bonne évaluation de la criticité de la filière pose problème dans la mesure où il n'existe pas de données fiables tant sur les volumes produits que sur les quantités consommées annuellement. Les sociétés productrices publient rarement leurs chiffres de production, y compris en Europe et aux États-Unis. Nous préconiserions donc aux institutions compétentes d'inciter les différents acteurs de la filière à publier leurs chiffres, aussi bien de production que de consommation.

Il est recommandé de développer une veille économique sur l'ensemble de la filière. Celle-ci pourra être réalisée en collaboration avec d'autres organismes, tels que les services géologiques européens ou les douanes.

Enfin, en cas de relance générale de collecte d'informations sur le potentiel minier de la France, une évaluation des teneurs en tellure des minerais à cuivre (Chessy), or (Salsigne, Rouez, La Lucette) ou uranium (Lodève) déjà identifiés et des tailings pourrait être proposée. Des travaux similaires pourraient être proposés aux différents services géologiques européens.

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



Zone à forte criticité. Actions conservatoires à prendre par l'Etat. Suivi de l'évolution des indicateurs de criticité



Zone à forte criticité. Veille active recommandée (observation continue des marchés, alertes, proposition de scénarios de parade)



Zone à criticité moyenne. Veille spécialisée recommandée (rédaction d'un rapport mis à jour annuellement)

Sommaire

1. Introduction	13
1.1. DÉFINITIONS	13
1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE	14
1.3. SOURCES DES DONNÉES.....	14
2. Le Tellure	17
2.1. DONNÉES DE BASE	17
2.2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES.....	17
2.3. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES	18
2.4. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES ET TOXICITÉ.....	19
3. Usages, consommation, prix.....	21
3.1. USAGES DU TELLURE PAR DOMAINES	21
3.1.1. Métallurgie : les aciers et alliages non ferreux.....	21
3.1.2. L'industrie chimique et les catalyseurs	22
3.1.3. Applications en électronique : photorécepteurs, dispositifs thermoélectriques et cellules photovoltaïques	22
3.1.4. Les autres domaines d'application	27
3.2. USAGES DU TELLURE PAR COMPOSÉS.....	27
3.3. ÉVOLUTION RÉCENTE ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION À MOYEN TERME.....	28
3.4. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DES USAGES DANS LES PROCHAINES ANNÉES	30
3.4.1. Métallurgie : aciers et alliages	30
3.4.2. Photovoltaïque et technologie CdTe.....	30
3.4.3. Autres applications dans l'électronique.....	32
3.4.4. L'industrie chimique et les catalyseurs	32
3.4.5. Les autres usages.....	32
3.5. SUBSTITUTIONS.....	33
3.6. RECYCLAGE	33

3.7. LES PRIX ET LES MARCHÉS DU TELLURE : ÉVOLUTION ET SPÉCIFICITÉS	33
3.7.1. Évolution récente et historique des prix	34
3.7.2. Évolution future des prix	35
4. Ressources et production mondiale.....	37
4.1. LES SOURCES DE TELLURE	37
4.1.1. Abondance du tellure dans l'écorce terrestre.....	37
4.1.2. Minéraux et minerais	37
4.1.3. Principaux types de gisements	38
4.1.4. Gisements et potentiel en France.....	39
4.2. RESSOURCES ET RÉSERVES.....	40
4.2.1. Estimations publiées par l'USGS	41
4.2.2. Estimation sur la base des ressources en cuivre sulfuré	42
4.2.3. Estimations de Crowson	44
4.3. PRODUCTION	45
4.3.1. Données récentes et actuelles	45
4.3.2. Facteurs sous-tendant l'évolution de la production au cours des prochaines années	48
5. La filière industrielle.....	51
5.1. DU MINERAI AU MÉTAL : ÉTAPES DE LA TRANSFORMATION.....	51
5.1.1. Grillage alcalin oxydant	51
5.1.2. Grillage sulfatant	52
5.1.3. Purification du tellure	52
5.2. LES PRODUCTEURS DE TELLURE	52
5.2.1. Europe.....	53
5.2.2. CEI	54
5.2.3. Amériques	54
5.2.4. Asie	56
5.2.5. Afrique.....	57
5.2.6. Océanie.....	57
5.2.7. La Selenium-Tellurium Development Association (SDTA)	57
5.3. DU MÉTAL AU PRODUIT FINI : ÉTAPES AVAL DE LA FILIÈRE.....	57
5.3.1. Les acteurs français	57
5.3.2. Autres acteurs européens.....	60
5.3.3. Les principaux acteurs dans le reste du monde.....	61

6. Conclusions : préconisations et leviers pour l'action	63
6.1. SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ	63
6.2. LE PROBLÈME STATISTIQUE	65
6.3. DÉVELOPPEMENT DE LA VEILLE ÉCONOMIQUE	65
6.4. DÉVELOPPEMENT DE LA CONNAISSANCE DU POTENTIEL MINÉRAL FRANÇAIS ET EUROPÉEN.....	65
7. Bibliographie	67

Liste des figures

Figure 1 :	Localisation du tellure (Te) dans le tableau de Mendeleïev.	17
Figure 2 :	Répartition de la consommation de tellure par domaines d'application en 2003 aux États-Unis (USGS, 2005 [4, 14]).	21
Figure 3 :	Coupe d'une cellule photovoltaïque CdTe (© www.solar-sse.com [9], adapté).	24
Figure 4 :	Distribution des technologies utilisées dans le secteur photovoltaïque en 2007 et contribution de chacune d'entre-elles à la puissance photovoltaïque mondiale installée (Angerer et al., 2009 [10] et NREL [11]).	25
Figure 5 :	Vue aérienne du Waldpolenz Solar Park installé par Juwi en Allemagne	26
Figure 6 :	Répartition géographique des capacités de production d'énergie photovoltaïque utilisant la technologie des couches minces (EPIA, 2010 [13]).	26
Figure 7 :	Répartition approximative de la consommation en tellure par usages aux États-Unis entre 1994 et 2009 (USGS, 1994 à 2010 [18]).	29
Figure 8 :	Prévisions d'évolution de la capacité de production photovoltaïque à l'horizon 2014 (© EPIA, 2010 [13]).	30
Figure 9 :	Perspectives d'évolution du marché du photovoltaïque à l'horizon 2050 (© Angerer et al., 2009 [10], adapté).	31
Figure 10 :	Tellure élémentaire et composés du tellure commercialisés par 5 N Plus [7].....	34
Figure 11 :	Évolution du prix spot du tellure de 2001 à octobre 2009 (données annuelles USGS [22]) et du tellure à 99,99% entre novembre 2009 et septembre 2011 (moyenne min-max bihebdomadaire de Metal Pages [21]).	35
Figure 12 :	Évolution du prix moyen annuel du tellure entre 1945 et 2010 (sources : USGS, Metal Pages).....	35
Figure 13 :	Abondance relative des éléments dans la croûte terrestre supérieure, par nombre d'atomes. Le tellure est l'un des éléments les plus rares (USGS, 2002 [2]).	37

Figure 14 :	Échantillon de calavérite (AuTe ₂) sur quartz prélevé dans la mine Cresson, Cripple Creek District aux États-Unis (© Mindat : www.mindat.org) .	38
Figure 15 :	Répartition mondiale des ressources minières en cuivre en 2009 (BRGM, 2010).	43
Figure 16 :	Répartition géographique des réserves en tellure en 2001 (adapté d'après Crowson, 2001 [30]).	45
Figure 17 :	Évolution de la production mondiale de tellure (sous estimée) entre 1930 et 2007 (USGS [24], BGS [28] et BMWFJ [29]).	46
Figure 18 :	Position de la production des boues anodiques à tellure et autres éléments dans le processus de production de cuivre par pyrométallurgie.	49
Figure 19 :	Détecteur infra-rouge Epsilon MW à HgCdTe commercialisé par Sofradir [36].	59
Figure 20 :	Croissance de la capacité de production photovoltaïque CdTe de First Solar entre 2005 et 2011 (estimations) (First Solar [14]).	62
Figure 21 :	Synthèse de la criticité du tellure.	64

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Comparaison des efficacités et des impacts environnementaux des différentes technologies photovoltaïques (Source : Ecoinvent, 2007 et 2008). ...	25
Tableau 2 :	Usages des principaux composés du tellure.	28
Tableau 3 :	Prévisions d'évolution des besoins en tellure et cadmium pour les panneaux photovoltaïques CdTe d'ici 2050 (Source : Angerer <i>et al.</i> , 2009 [10]).	32
Tableau 4 :	Substituts possibles au tellure dans ses différents usages (Sources : Jdid et Blazy, 2008 [5] et MRC, 2010 [6]).	33
Tableau 5 :	Teneurs en tellure dans des sulfures du gisement Ni-Cu de Norilsk (Sindeeva, 1964 [23]).	38
Tableau 6 :	Estimations des réserves primaires mondiales en tellure (USGS, 2009 [18]).	41
Tableau 7 :	Évaluation des réserves mondiales en tellure en 2001 par Crowson [28] et l'USGS.	44
Tableau 8 :	Estimations de la production mondiale de tellure entre 2004 et 2009 en tonnes (USGS [22], BGS [26] et BMWFJ [27]).	46
Tableau 9 :	Estimation d'un ordre de grandeur de tellure récupérable à partir du minerai de cuivre traité par pyrométallurgie en 2009 (sur la base des données cuivre de l'ICSG, 2010).	47
Tableau 10 :	Catalogue de composés du tellure proposés à la vente par Azéris Electronics [33].	58
Tableau 11 :	Composantes de la criticité du tellure.	63

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.

Note : les références bibliographiques sont indiquées par un chiffre entre crochets, par exemple [1]. Elles sont détaillées à la fin de ce rapport.

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 tellure est peu transparente et les données ouvertes peuvent être incomplètes et/ou sujettes à erreurs. Peu de données sont disponibles sur l'éventuelle production de tellure de nombreux pays, dont en particulier les États-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 tellure fait 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, mais il n'a pas été retenu dans les 14 matières premières minérales sélectionnées 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) ;
- le document « Métallurgie du Sélénium et du Tellure » (Jdid et Blazy, juin 2008) publié par « Techniques de l'Ingénieur » ;
- le rapport publié par l'institut allemand Fraunhofer concernant les matières premières et les technologies du futur ;

- l'étude du marché du photovoltaïque à l'horizon 2014 publiée par l'EPIA (European Photovoltaic Industry Association) ;
 - 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 Tellure

2.1. DONNÉES DE BASE

Le tellure est un métalloïde gris argenté qui est cassant et facilement pulvérisable. Il occupe la 52^{ème} place du tableau de Mendeleïev. Sa position dans la 16^{ème} colonne le classe dans la famille des chalcogènes, comme l'oxygène, le soufre, le sélénium et le polonium.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 A
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57-71 Lanthanides	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89-103 Actinides															
	Lanthanides :	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
	Actinides :	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

Figure 1 : Localisation du tellure (Te) dans le tableau de Mendeleïev.

Découvert en 1782 par Franz Joseph Müller von Reichenstein dans les minerais d'or de Transylvanie, son nom lui fut donné en référence à Tellus, la déesse romaine de la Terre. Le sélénium, découvert peu de temps après, fut nommé en référence à la déesse grecque de la lune Séléne afin de souligner les similarités entre Te et Se.

2.2. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Le tellure se présente dans les conditions ordinaires sous forme d'un solide gris argenté.

Avec une abondance de l'ordre de 1 ppb (1 µg/kg), c'est l'un des éléments naturels stables les plus rares de la croûte terrestre, à équivalence avec le ruthénium, le rhodium et l'iridium. Seul le rhénium (0,7 ppb), quelques gaz rares (Kr, Xe) et les

éléments radioactifs très instables et fugaces issus de la décroissance radioactive de l'uranium et du thorium¹ sont moins fréquents.

- Symbole : Te ;
- Numéro atomique : 52 ;
- Masse atomique : 127,6 ;
- Densité: 6,24 ;
- Dureté (échelle de Mohs) : 2,25 (≈ gypse) ;
- Dureté Brinell (MPa) : 180 ;
- Point de fusion (°C) : 449,5 ;
- Point d'ébullition (°C) : 988 ;
- Abondance dans la croûte terrestre : 1 ppb.

Le tellure est un semi-conducteur, sa conductivité électrique augmente légèrement lorsqu'il est exposé à la lumière. On parle alors de photoconductivité. C'est cette propriété remarquable qui justifie son usage dans un certain nombre d'applications, dont les cellules photovoltaïques.

Le tellure est cassant et peut facilement être réduit en poudre. Cependant, il peut être explosif lorsque ses particules sont finement dispersées dans l'air.

2.3. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

Dans les conditions ordinaires, le tellure ne s'oxyde pas à l'air. Il est insoluble dans l'eau et dans l'acide chlorhydrique, mais soluble dans l'acide nitrique et dans l'eau régale.

S'il est parfois rencontré sous sa forme élémentaire, il se combine fréquemment avec de l'hydrogène ou des métaux avec lesquels il forme des composés plus ou moins complexes :

- **Des tellurures** (semblables aux sulfures et aux sulfosels). Sous son degré d'oxydation -2, le tellure s'associe à des métaux de base et des métaux précieux : ZnTe, PbTe, AuTe₂ (calavérite), HgTe, AgTe, NiTe₂, Ag₃AuTe₂ et Bi₂Te₃ par exemple. C'est sous cette forme qu'il se rencontre généralement dans les minerais.
- **Des tellurites** (semblables aux sulfites et aux oxydes). Le tellure y est présent sous son degré d'oxydation +4. Les minéraux de ce groupe sont plus rares, les deux représentants majeurs étant la walfordite (Fe³⁺, Te⁶⁺, Ti⁴⁺, Mg)(Te⁴⁺)₃O₈, découverte dans une mine chilienne et la cesbronite Cu₅(TeO₃)₂(OH)₆·2(H₂O) identifiée au Mexique et aux États-Unis.
- **Des tellurates** (semblables aux sulfates, oxydation +6). Les minéraux de ce groupe sont assez rares. On signalera la frankhawthorneite Cu₂Te⁶⁺O₄(OH)₂.

¹ C'est-à-dire le polonium, l'astate, le radon, le francium, le radium, l'actinium et le protactinium.

Les tellures sont les composés chimiques à or les plus fréquents dans la nature.

D'après le Programme International sur la Sécurité des Substances Chimiques, les dangers chimiques inhérents à l'utilisation du tellure sont les suivants [3] :

- des fumées toxiques se forment sous l'effet de la chaleur ;
- il réagit vigoureusement avec les halogènes en provoquant des risques d'incendie ;
- il réagit avec le zinc avec incandescence ;
- le siliciure de lithium attaque le tellure avec incandescence.

2.4. PROPRIÉTÉS BIOLOGIQUES ET TOXICITÉ

Le tellure et ses dérivés sont moyennement toxiques. S'il peut être nocif pour le foie et le système nerveux central, il n'est pas considéré comme cancérigène. Inhalé, il provoque une somnolence, des maux de tête et des nausées, ainsi qu'une sécheresse de la bouche et un goût métallique.

La valeur d'exposition admissible dans l'air est de 0,1 mg/m³ d'air, mais dès 0,01 mg/m³, des symptômes caractéristiques d'une faible intoxication se développent : haleine et odeur corporelle ressemblant à celle de l'ail. Des troubles digestifs apparaissent également en cas d'ingestion.

3. Usages, consommation, prix

3.1. USAGES DU TELLURE PAR DOMAINES

Peu de données sont disponibles concernant la consommation de tellure à l'échelle mondiale. Selon les informations les plus récentes qui concernent l'année 2003 (USGS, 2005 [4]), le secteur des aciers couvre la moitié de la consommation de tellure aux États-Unis avec 24 t. Les industries chimiques sont le deuxième plus gros consommateur de tellure. Viennent ensuite la métallurgie des alliages non-ferreux (cuivre, plomb) suivie du secteur des photorécepteurs et dispositifs thermoélectriques. De manière plus marginale, le tellure est utilisé dans les capsules d'explosifs ainsi que comme pigment dans les verres et la céramique. Le graphique ci-dessous présente la répartition de la consommation de tellure par usages aux États-Unis (seules données disponibles²).

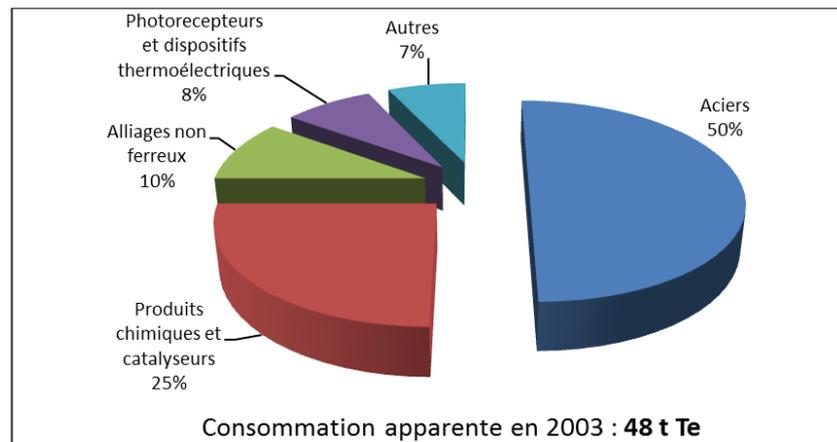


Figure 2 : Répartition de la consommation de tellure par domaines d'application en 2003 aux États-Unis (USGS, 2005 [4, 14]).

3.1.1. Métallurgie : les aciers et alliages non ferreux

L'ajout de tellure (50 à 80 g/t) améliore l'usinabilité d'aciers destinés à la construction mécanique et automobile. Il s'agit d'aciers de décolletage³, d'aciers pour traitement thermique, d'aciers de construction mécanique et de barres étirées où le contenu en tellure atteint 150 à 200 g/t. Pour la construction, la présence de tellure améliore

² En 2005, l'USGS a publié les statistiques de la consommation américaine de tellure par usages entre 1975 et 2003 [4]. Cependant, les données américaines sont considérées comme confidentielles depuis 2004 et l'USGS ne publie plus ces statistiques.

³ Le **décolletage** est un procédé de fabrication où des pièces (vis, boulon, axe, etc.) sont usinées par enlèvement de matière à partir de barres de métal, à l'aide d'un outil coupant.

l'usinage, le formage à chaud et à froid, le soudage et la tenue de l'acier en service (Jdid et Blazy, 2008 [5]).

Le tellure est également ajouté à des métaux non ferreux. Associé au plomb ou à l'étain, il augmente leur résistance à la vibration, à la fatigue et à la corrosion par les acides. L'ajout de tellure au cuivre et aux alliages Ni-Fe et Co-Fe améliore leur usinabilité ainsi que leur résistance mécanique et leur tenue à la corrosion, sans que, pour le cuivre, il ne modifie sa conductivité.

Cependant, de nombreux producteurs d'aciers et de métaux non ferreux ont réduit leur consommation et trouvé des substituts au tellure en raison de la forte augmentation de son prix qui dépassait les 300 \$/kg au 1^{er} mars 2011 (MRC, 2010 [6]).

3.1.2. L'industrie chimique et les catalyseurs

Le tellure agit comme accélérateur de vulcanisation⁴ dans la fabrication du caoutchouc. Il favorise également sa résistance à la température.

Des catalyseurs à tellure sont utilisés dans l'oxydation de composés organiques lors de la production de fibres synthétiques. Ils peuvent aussi être employés pour des réactions d'hydrogénation, d'halogénéation et de chloruration [6].

3.1.3. Applications en électronique : photorécepteurs, dispositifs thermoélectriques et cellules photovoltaïques

Les diverses applications en électronique

Le secteur électronique couvrait 8 % de la consommation de tellure aux États-Unis en 2003. Cet élément y trouve de nombreuses applications en association avec d'autres métaux. La majorité de ces applications utilisent la supraconductivité du tellure.

Des **photorécepteurs** à sélénium-tellure (ou sélénium seul) sont utilisés dans les tambours de photocopieurs xérogaphiques et d'imprimantes laser. Ils sont cependant remplacés par des photorécepteurs organiques dans les appareils plus récents qui utilisent des procédés numériques et non plus analogiques.

Un tellurure de mercure et de cadmium ((Cd,Hg)Te, MCT en anglais) est utilisé en **imagerie thermique** afin de rendre le matériau sensible à la température. Il est ainsi présent dans des détecteurs infra-rouges, des circuits intégrés, des diodes laser, l'instrumentation médicale ainsi que dans les missiles à tête chercheuse.

⁴ La **vulcanisation** (ou curage) est un procédé chimique visant à rendre un matériau moins plastique mais plus élastique. L'incorporation d'un agent vulcanisant, du soufre la plupart du temps, permet de former, après cuisson, des ponts entre les macromolécules du matériau.

Le tellure de bismuth, semi-conducteur, est utilisé dans les **appareils de refroidissement thermoélectriques**. Ils trouvent des applications dans l'électronique, dans le secteur de la Défense ainsi que dans les glacières et les systèmes de refroidissement des sièges de voiture.

Le tellure de zinc est un semi-conducteur de couleur rouge orange. Il est utilisé dans la fabrication de **diodes électroluminescentes** (LED pour *Light-Emitting Diode*) ainsi que dans d'autres applications optoélectroniques (MRC, 2010 [6]). Si ces LED ne sont pas encore très répandues, elles ont fait l'objet de nombreuses études, comme celle de Tanaka *et al.* en 2004 [8].

Le tellure de cadmium et de zinc ((Cd,Zn)Te), appelé plus communément le CZT, est un semi-conducteur qui convertit directement les photons des rayonnements gamma et X en électrons. Contrairement aux détecteurs plus communs à silicium et germanium, les CZT fonctionnent à température ambiante et peuvent convertir plus de 10 millions de photons par seconde et par mm². Sa résolution spectroscopique dépasse largement celle des scintillateurs actuellement disponibles sur le marché. Le **détecteur CZT** apparaît comme idéal pour le matériel médical, la sécurité nationale ainsi que pour la recherche en laboratoire [17].

Les cellules photovoltaïques CdTe

L'utilisation majeure du tellure en électronique est dans les **cellules photovoltaïques à couches minces** où il est combiné au cadmium : ce sont les cellules CdTe. Elles sont constituées de plusieurs couches (SSE et Angerer *et al.*, 2009 [9,10]) :

- *OTC* (Oxyde Transparent Conducteur). Il constitue la couche en contact direct avec la lumière, il doit donc être transparent, stable dans le temps, conducteur et pouvoir résister aux fortes températures. La plupart du temps, il est formé de deux sous-couches, la première à ITO (oxyde d'indium et d'étain) de faible résistivité, et la seconde à dioxyde d'étain (SnO₂) de forte résistivité. L'épaisseur de ces sous-couches est de 20 à 100 nm.
- *Une couche fenêtre* à sulfure de cadmium (CdS) extrêmement fine (100 nm).
- *Une couche absorbante* à tellure de cadmium (CdTe) d'environ 8 µm. Cette couche semi-conductrice absorbe la lumière et la convertit en électricité.
- *Un tampon et une fine couche métallique*, à or ou alliage nickel-aluminium, assurent les contacts électriques avec le reste de l'installation.

Afin de contrôler la conductivité électrique des deux couches semi-conductrices (CdS et CdTe), celles-ci sont dopées (dopage N et P). Mises en contact, la direction ainsi que la quantité de courant qui traverse la structure est alors régulée.

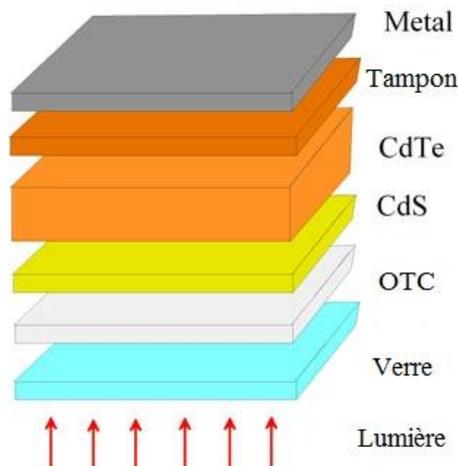


Figure 3 : Coupe d'une cellule photovoltaïque CdTe (© www.solar-sse.com [9], adapté).

Ces cellules photovoltaïques présentent, d'après le National Renewable Energy Laboratory (NREL) plusieurs caractéristiques avantageuses [13] :

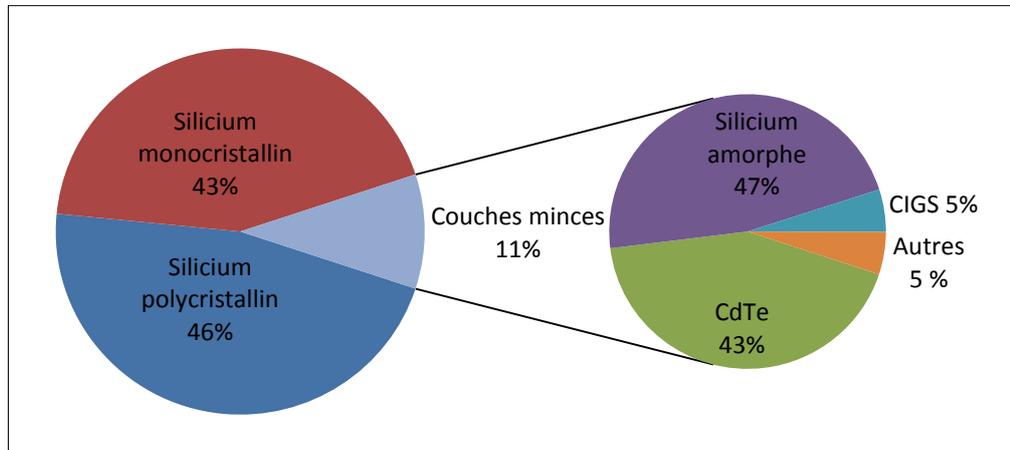
- elles sont parfaitement adaptées au spectre de la lumière solaire ;
- si ces cellules ne sont pas aussi efficaces que les installations classiques à silicium cristallin, elles ont de meilleures performances sous hautes températures et sont plus sensibles aux basses températures en raison d'un coefficient thermique moindre (Angerer *et al.*, 2009 [10]) ;
- elles sont les moins chères à fabriquer ;
- d'un point de vue environnemental, elles constituent un moyen efficace de séquestrer le cadmium qui, lorsqu'il est seul, peut être toxique. Encapsulé dans les cellules photovoltaïques pendant 20 à 30 ans (durée de vie des installations), il pourra à terme être facilement recyclé.

Sur le marché du photovoltaïque, deux types de technologies sont utilisées dans la fabrication de panneaux solaires : le silicium cristallin et les couches minces. En 2007, les installations à couches minces couvraient 10,1 % de la puissance photovoltaïque installée dans le monde (4,3 GWc⁵), parmi lesquelles les cellules CdTe représentaient 43 %. En 2008 et 2009, la part des couches minces, et en particulier des CdTe, a continué à croître, atteignant 22 % de capacité de production mondiale en 2009 (EPIA, 2010 [13]). First Solar Inc., leader mondial de la fabrication de CdTe, estime que sa production mondiale a atteint 1,23 GW en 2009 (USGS, 2010 [14]).

Dans les installations industrielles, le rendement énergétique des cellules CdTe est de **7 à 9 %**, contre 17 % en laboratoire [10]. En 2009, First Solar Inc. a annoncé que l'efficacité de ses cellules avait atteint 11,1 % [14]. Si leurs rendements restent inférieurs à ceux d'autres technologies photovoltaïques, leur fabrication est beaucoup

⁵ Le « watt-crête », abrégé Wc, est l'unité de mesure de la puissance électrique maximale produite par les cellules ou panneaux photovoltaïques sous une énergie lumineuse reçue de 1 000 W/m² et une température de 25 °C. 1 GWc = 10⁹Wc.

moins gourmande en énergie. Elle émet donc moins de CO₂ et est meilleur marché que les techniques concurrentes (Tableau 1).



NB : Les autres types de cellules sont les cellules à concentration et les cellules organiques.

Figure 4 : Distribution des technologies utilisées dans le secteur photovoltaïque en 2007 et contribution de chacune d'entre-elles à la puissance photovoltaïque mondiale installée (Angerer et al., 2009 [10] et NREL [11]).

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

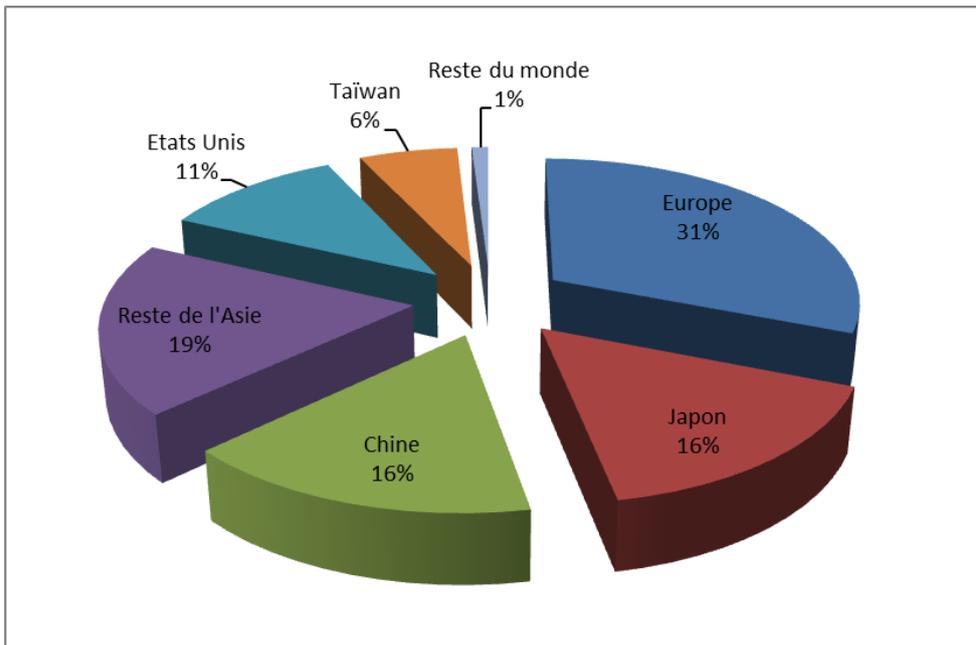
Tableau 1 : Comparaison des efficacités et des impacts environnementaux des différentes technologies photovoltaïques (Source : Ecoinvent, 2007 et 2008).

Les panneaux solaires à CdTe nécessitent une grande surface pour produire de l'électricité. Ils se prêtent donc bien à être installés dans des centrales photovoltaïques au sol. En Allemagne, le Waldpolenz Solar Park a été installé par le groupe Juwi fin 2008. Avec une puissance de 40 W et 550 000 panneaux solaires installés, il est le plus grand parc photovoltaïque à couches minces (CdTe) du monde. C'est également là qu'on y produisait l'électricité photovoltaïque la moins chère (environ 3,25 €/watt).

D'après Angerer et al. (2009), les besoins en tellure pour les cellules CdTe sont de 31 g/kWc produit, et de 100 g/kWc de cadmium [10]. Ainsi, en se basant sur les chiffres de 2007, la puissance photovoltaïque installée utilisant la technologie CdTe était de 186,7 MWc, ce qui nécessitait 5,79 t de tellure.



Figure 5 : Vue aérienne du Waldpolenz Solar Park installé par Juwi en Allemagne (photo courtesy of Juwi Group, www.juwi.com).



NB : Le reste de l'Asie est essentiellement représenté par la Malaisie.

Figure 6 : Répartition géographique des capacités de production d'énergie photovoltaïque utilisant la technologie des couches minces (EPIA, 2010 [13]).

Le secteur des cellules CdTe est en plein essor, puisque de 4 % de la part de marché en 2007, elles sont passées à 8 % en 2008 et 13 % en 2009 (Endicott Interconnect Technologies [17]).

La société **First Solar Inc.** est le leader mondial de la fabrication de panneaux photovoltaïques à couches minces. Avec des installations aux États-Unis, en Malaisie, en Allemagne, bientôt au Vietnam (et qui en avait envisagé en France en 2010), elle a

réalisé 70 % de la production mondiale de cellules photovoltaïques à couche mince en 2009 et est spécialisée dans les CdTe. **Abound Solar Inc.** (États-Unis), **Calyxo GmbH** (Allemagne) et **Prime Star Inc.** (États-Unis) fabriquent également des panneaux CdTe. Toutes ces sociétés font appel à la société québécoise **5N Plus** qui leur fournit du tellure et du cadmium de haute pureté (USGS, 2005 [4]).

Les capacités de production d'énergie photovoltaïque se répartissent différemment à l'échelle mondiale en fonction du type de panneau solaire considéré. L'Union Européenne représente 31 % de la capacité de production mondiale dans les technologies à couches minces. Les principaux acteurs sont l'Allemagne, l'Italie, la République Tchèque, la Belgique et la France (EPIA, 2010 [13]).

3.1.4. Les autres domaines d'application

Le tellure est utilisé comme **pigment** afin de donner des teintes bleues ou marron aux verres et céramiques.

Un sous-oxyde de tellure est utilisé dans la fabrication de plusieurs types de **disques optiques réinscriptibles** : CD, DVD et Blu-ray.

Les tellures de titane, zirconium, molybdène et tungstène restent stables à haute température. Cette propriété leur permet d'être utilisés comme **composés autolubrifiants** dans l'électronique, l'instrumentation ainsi que l'aérospatial. Des tellures organiques sont également ajoutés à des huiles et graisses afin d'empêcher leur oxydation (John Wiley and Sons, 2000 [16]).

Le tellurite de sodium est utilisé en tant que gélifiant dans la composition de certains **explosifs**. Le tellure entre également dans la fabrication des capsules d'explosifs.

Des dérivés et des isotopes radioactifs du tellure trouvent des **applications médicales**. Ils sont utilisés comme traceurs biologiques, agents de contraste aux rayons X et dans le traitement de maladies de la thyroïde.

Des chlorures de tellure, tout comme le dioxyde de tellure en solution hypochloreuse, sont déposés en **revêtement** sur du laiton, de l'aluminium et sur l'argenterie.

Enfin, des composés du tellure (tellures d'antimoine, de bismuth, de cobalt, de cadmium ou de cuivre et terpène ethertellurocyanate) sont présents dans la fabrication de **fongicides** et de pesticides [16].

3.2. USAGES DU TELLURE PAR COMPOSÉS

Le Tableau 2 ci-dessous synthétise les principales utilisations des composés du tellure.

Composés du tellure	Formule	Usages
Tellure élémentaire	Te	Métallurgie (aciers et alliages), vulcanisation du caoutchouc
Dioxyde de tellure	TeO ₂	Matériel acoustico-optique, fibres optiques
Sous-oxyde de tellure	-	Disques optiques réinscriptibles
Tétrachlorure de tellure	TeCl ₄	Synthèses organiques, revêtement du laiton et de l'argenterie
Tellurite de sodium	Na ₂ TeO ₃	Gélifiant (explosifs), dépôt électrolytique de nickel, revêtement de métaux
Tellure de mercure et cadmium	(Hg,Cd)Te	Imagerie thermique, détecteurs infra-rouges, diodes laser, instrumentation médicale, missiles à têtes chercheuses
Tellure de bismuth	Bi ₂ Te ₃	Appareils de refroidissement thermoélectrique (électronique, glacières portatives), fongicides
Tellure de cadmium	CdTe	Cellules photovoltaïques, capteurs de rayons X
Tellure de zinc	ZnTe	LED
Tellures de titane, zirconium, molybdène, tungstène	TiTe ₂ , ZrTe ₂ , MoTe ₂ , WTe ₂	Lubrifiants
Isotopes radioactifs	-	Traceurs biologiques, agents de contrastes aux rayons X, traitement des maladies de la thyroïde
Tellures d'antimoine, de cobalt, de cadmium et de cuivre	Sb ₂ Te ₃ , Co ₂ Te ₃ , CdTe, CuTe	Fongicides et pesticides

Tableau 2 : Usages des principaux composés du tellure.

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

Très peu de données statistiques sont disponibles, aussi bien concernant la production que la consommation de tellure. Les chiffres sont en effet rarement publiés par les sociétés productrices.

La consommation annuelle mondiale est estimée à **environ 220 t⁶**.

À partir d'une compilation des données publiées en ligne par l'USGS, l'évolution de la répartition de la consommation du tellure par usage aux États-Unis est présentée entre 1994 et 2009 [18]. Cependant, depuis 2005, les données sont plus approximatives. La distribution de la consommation est alors uniquement fondée sur une comparaison

⁶ La consommation annuelle mondiale de tellure était estimée par l'USGS à 220 t entre 2000 et 2003. Les versions ultérieures des *Minerals Yearbook* [18] ne publient plus ces chiffres, mais spécifient que la consommation reste assez stable.

avec l'année précédente (« plus » ou « moins »). En l'absence de données concernant les autres pays, la répartition donnée est celle des États-Unis. Toutefois, la tendance globale est similaire à celle observée aux États-Unis.

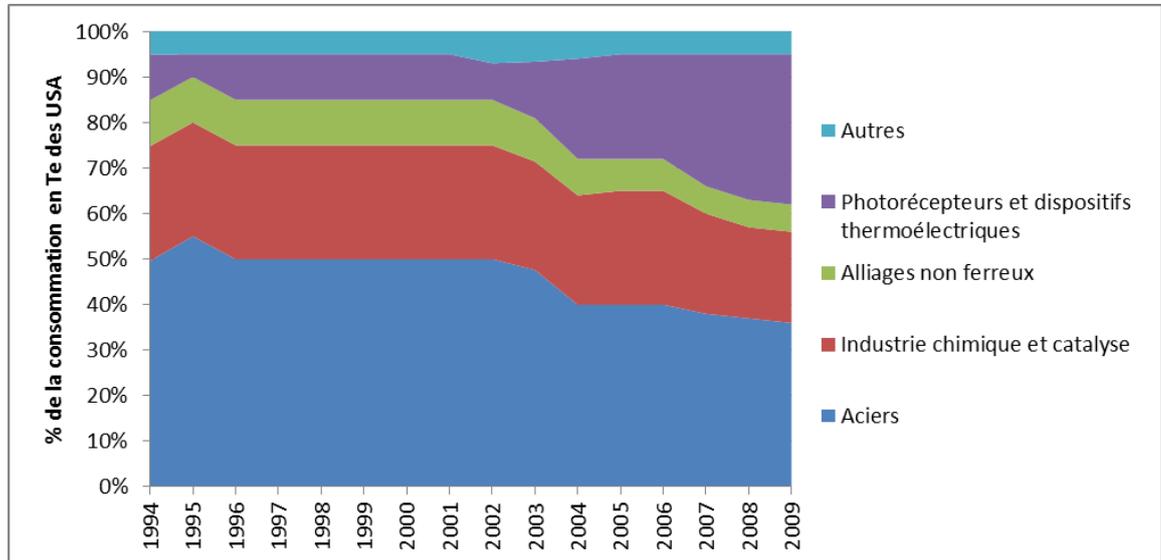


Figure 7 : Répartition approximative de la consommation en tellure par usages aux États-Unis entre 1994 et 2009 (USGS, 1994 à 2010 [18]).

Le tellure est majoritairement utilisé dans l'industrie des aciers et des alliages non ferreux (cuivre et plomb essentiellement). Étant donnée la récente augmentation des prix, de nombreux métallurgistes ont réduit leur consommation en tellure et lui ont trouvé des substituts à moindre coût. La part de la métallurgie dans la consommation en tellure est donc en constante diminution depuis le début des années 2000.

Pour la même raison, la consommation de tellure dans l'industrie chimique et les catalyseurs décroît.

L'utilisation du tellure en électronique est en plein essor depuis le début des années 2000, tirée par les industries des photorécepteurs, des dispositifs thermoélectriques et des cellules photovoltaïques.

Selon l'Association de l'Industrie Photovoltaïque Européenne (EPIA, 2010), la capacité de production photovoltaïque va tripler entre 2009 et 2014 pour atteindre une puissance cumulée mondiale de 66 GW en 2014. La part des couches minces devrait atteindre 25 % de la puissance photovoltaïque (Figure 8). Les technologies CdTe et CIGS devraient rester en Union Européenne, aux États-Unis et au Japon [13].

Dans les prochaines années, la consommation mondiale de tellure devrait augmenter, notamment grâce à l'électronique et au photovoltaïque. Avec le développement des technologies (des panneaux solaires en particulier), les fabricants devraient trouver des moyens permettant de réduire la consommation en tellure par unité, comme améliorer leur rendement et systématiser leur recyclage (USGS, 2005 [4]).

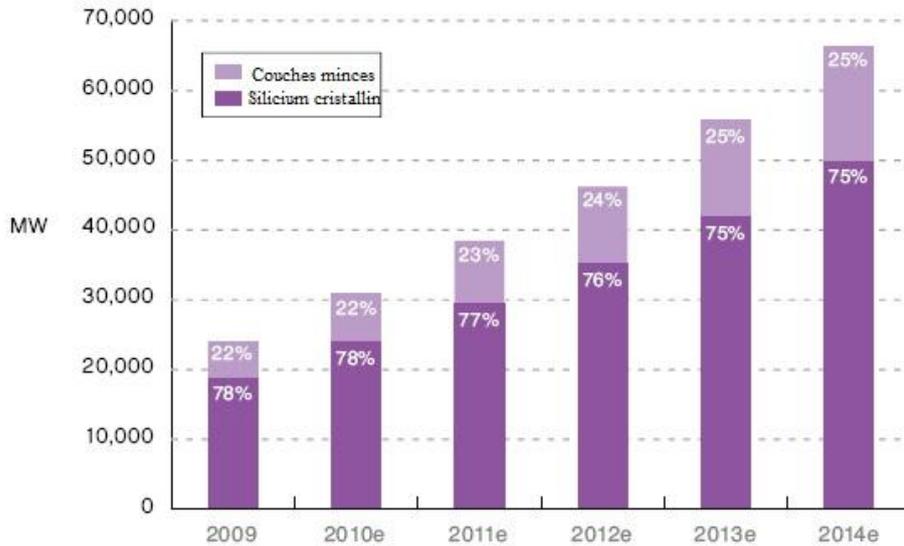


Figure 8 : Prévisions d'évolution de la capacité de production photovoltaïque à l'horizon 2014 (© EPIA, 2010 [13]).

A *contrario*, les secteurs de la métallurgie et de la chimie devraient réduire leur consommation en tellure si son cours continue à augmenter. Ainsi, les fabricants de produits à faible valeur ajoutée devront certainement trouver des substituts [4].

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

3.4.1. Métallurgie : aciers et alliages

Il est difficile de prévoir l'évolution de l'utilisation de tellure dans la métallurgie dans les prochaines années. Si la consommation mondiale d'acier est en constante augmentation, tirée par le développement des BRIC (+10,7 % en 2010 avec 1,241 milliard de tonnes consommées (Krajka, 2010 [19])), l'utilisation du tellure dans ces aciers n'est pas acquise. En effet, étant donnée la récente augmentation des prix, de nombreux métallurgistes ont réduit leur consommation en tellure et lui ont trouvé des substituts à moindre coût (Bi, Ca, S...), aussi bien dans le secteur des aciers qu'en alliage avec des métaux non ferreux (MRC, 2010 [6]).

3.4.2. Photovoltaïque et technologie CdTe

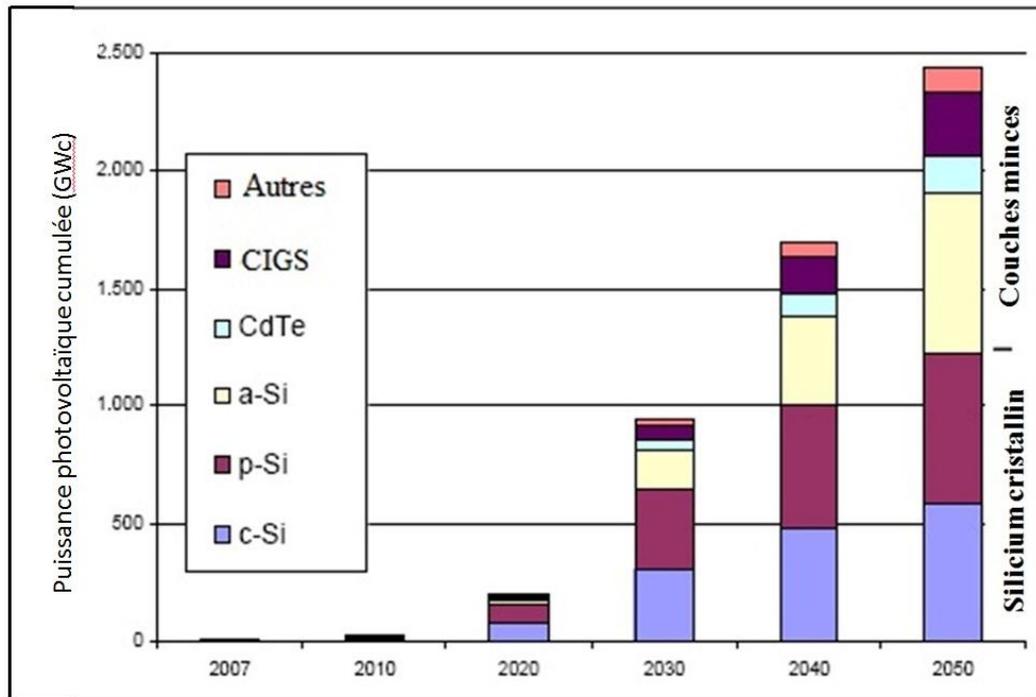
La filière photovoltaïque est très probablement amenée à se développer considérablement dans les prochaines années.

La croissance de la production des panneaux à couche fine, CIGS, CdTe et silicium amorphe est également attendue. Si leur rendement est inférieur à ceux obtenus par des panneaux à silicium cristallin (Tableau 1), ils sont moins lourds, moins coûteux et

plus performants dans des conditions d'ensoleillement médiocres. Leur fabrication est également moins énergivore et émet moins de CO₂.

Si le cadmium et le tellure restent des éléments coûteux, ils sont introduits en petites quantités dans des couches extrêmement fines (8 µm pour la couche CdTe et 100 nm pour la couche CdS). Aussi, le coût de ces matières premières ne devrait pas être un facteur limitant au développement de cette technologie.

Angerer *et al.* évaluent ainsi la croissance du marché du photovoltaïque à l'horizon 2050 (Figure 9).



NB : c-Si : silicium monocristallin ; p-Si : silicium polycristallin ; a-Si : silicium amorphe

Figure 9 : Perspectives d'évolution du marché du photovoltaïque à l'horizon 2050
(© Angerer *et al.*, 2009 [10], adapté).

De 4,3 GWc produits en 2007, la puissance photovoltaïque mondiale cumulée devrait atteindre quasiment 2 500 GWc en 2050. Dans ce scénario, les couches minces couvriraient 50 % du marché des panneaux photovoltaïques, contre 11 % en 2007.

À raison de 31 g de tellure et 100 g de cadmium par kWc produit, les perspectives d'évolution des besoins futurs en ces deux métaux sont les suivants [10] :

Année	Puissance installée (GWc)	Dont CdTe		Besoins en Te (t/an)	Besoins en Cd (t/an)
2007	4,3	0,2 GWc	0,5 %	9	20
2010	21,1	0,4 GWc	2,8 %	2	5
2020	200	6 GWc	5 %	25	57
2030	947	40 GWc	7,1 %	148	336
2040	1693	91 GWc	9 %	225	511
2050	2440	159 GWc	11 %	302	687

Tableau 3 : Prévisions d'évolution des besoins en tellure et cadmium pour les panneaux photovoltaïques CdTe d'ici 2050 (Source : Angerer et al., 2009 [10]).

En 2050, les besoins en tellure de l'industrie photovoltaïque seraient ainsi de 302 t/an.

3.4.3. Autres applications dans l'électronique

L'utilisation des photorécepteurs à sélénium et tellure dans les tambours de photocopieurs xérogaphiques et d'imprimantes laser est de moins en moins répandue. Ils sont remplacés par des photorécepteurs organiques dans les appareils plus récents qui utilisent des procédés numériques et non plus analogiques.

Les autres utilisations du tellure en imagerie thermique, appareils de refroidissement thermoélectrique, instrumentation médicale sont appelées à se développer.

L'utilisation du tellure de zinc dans les diodes électroluminescentes n'est, à l'heure actuelle, pas très répandue. Le marché des LED est en pleine croissance, mais d'autres types de semi-conducteurs (GaAsP, GaAs ou InGaN) sont privilégiés.

3.4.4. L'industrie chimique et les catalyseurs

Le tellure est utilisé dans la vulcanisation du caoutchouc et dans des catalyseurs mis en jeu dans la fabrication de fibres synthétiques. Cependant, en raison de l'augmentation récente de son prix, il est de moins en moins utilisé dans l'industrie chimique.

3.4.5. Les autres usages

L'utilisation du tellure en verrerie et céramique, dans la fabrication de disques réinscriptibles et dans la lubrification devrait rester stable en l'absence de l'apparition d'une nouvelle technologie de rupture.

Il en va de même pour ses applications médicales et son usage dans les fongicides.

3.5. SUBSTITUTIONS

Plusieurs composés peuvent remplacer le tellure dans la plupart de ses usages, mais ils entraînent, en général, une diminution de l'efficacité du produit ou une perte de ses caractéristiques.

Usages du tellure	Substituts possibles
Aciers de construction et pour l'automobile	Bi, Ca, Pb, P, Se, S
Agent de vulcanisation (caoutchouc)	S et/ou Se
Catalyse	Se et autres métaux
Lubrification à haute température et sous vide	Séléniures de métaux réfractaires
Autolubrification (électronique)	Séléniures et sulfures de Nb et Ta
Photocopieurs xérogaphiques et imprimantes laser	Photorécepteurs organiques
Cellules photovoltaïques à couche mince	Silicium amorphe et diséléniure de Cu et In (CIGS), silicium amorphe
Pigment en verrerie	Ce

Tableau 4 : Substituts possibles au tellure dans ses différents usages
(Sources : Jdid et Blazy, 2008 [5] et MRC, 2010 [6]).

3.6. RECYCLAGE

Les usages du tellure sont dispersifs et il n'existe pas de filière de recyclage spécialisée. Le marché et les prix sont très volatils et n'ont pas, à l'heure actuelle, justifié la mise en place du recyclage autre que sur des critères environnementaux.

La récupération du tellure à partir des ferrailles de tambours de photocopieurs serait rentable pour des cours beaucoup plus élevés. Toutefois, si les prix restent à la hausse, le recyclage pourrait devenir attractif et entraîner une collecte systématique et durable des scraps de l'électronique [5].

Des usines pilote de recyclage de panneaux photovoltaïques ont été construites récemment aux États-Unis et en Europe principalement. Elles permettront de récupérer le tellure des cellules CdTe (USGS, 2005 [4]). Cependant, cette technologie est nouvelle et la durée de vie de ces cellules est estimée à 20-25 ans. Il n'existe donc pas encore de déchets de cette industrie à valoriser.

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

Le tellure, métal mineur, n'est pas coté dans des grandes bourses telles que celle de Londres (London Metal Exchange). Il est commercialisé sous forme de poudres, lingots

et barres à minimum 99,99 % de pureté. La société canadienne **5N Plus**, leader sur le marché du tellure de haute pureté, propose plusieurs qualités [7] :

- *Commerciale*, sous forme de lingots 4N (99,99 % Te) et 4N5 (99,995 % Te) ;
- *Haute pureté*, sous forme de lingots et grenailles à 5N (99,999 % Te), et des lingots de 5N à 7N+.

Des composés du tellure sont également vendus, comme le tellure de cadmium, le tellure de zinc et le tellure de cadmium et de zinc (CZT).

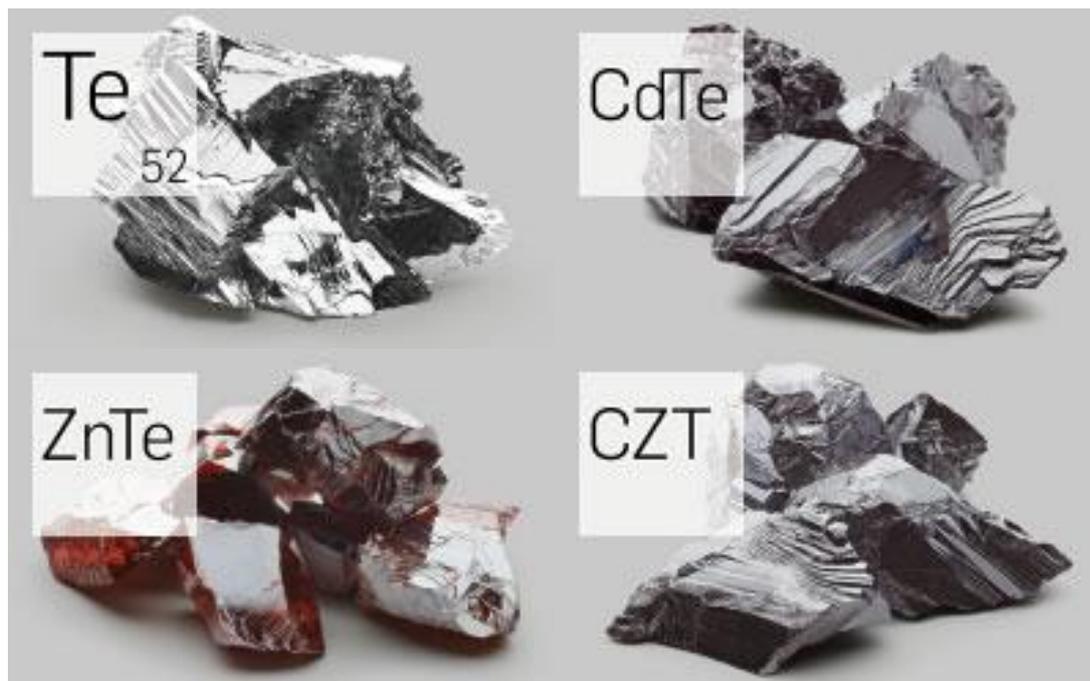


Figure 10 : Tellure élémentaire et composés du tellure commercialisés par 5 N Plus [7]
(Photos © www.5nplus.com).

3.7.1. Évolution récente et historique des prix

Metal-Pages (www.metal-pages.com) publie deux fois par semaine une fourchette de prix (prix minimum, prix maximum) en US\$/kg tels que négociés entre vendeurs et acheteurs à la teneur commerciale de 99,9 %, livré en Union Européenne (Rotterdam) [21]. La Figure 11 présente l'évolution des prix spot moyens, calculés 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 $\pm 5\%$.

Le prix du tellure a été généralement en croissance depuis 2003, avec un pic à 430 US\$/kg en mai 2011, pour revenir à 345 US\$/kg en septembre 2011.

La Figure 12 présente l'évolution du prix depuis 1945 en moyenne annuelle, en dollars courants, ainsi qu'en dollars constants de 2010 après application du facteur correctif du Consumer Price Index américain, disponible en ligne sur www.inflationdata.com [20].

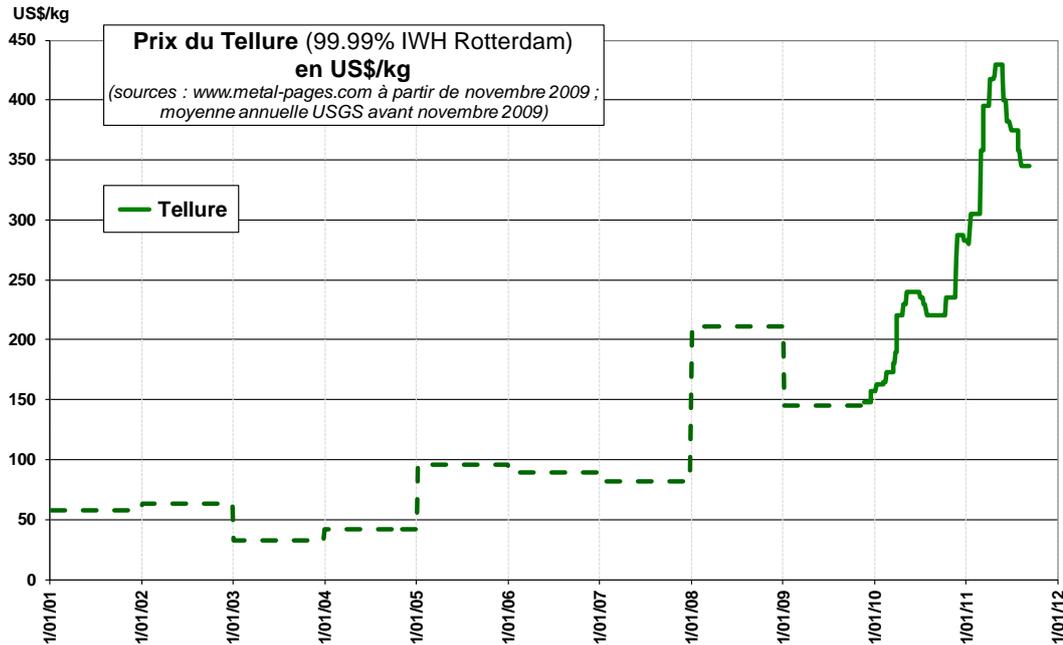


Figure 11 : Évolution du prix spot du tellure de 2001 à octobre 2009 (données annuelles USGS [22]) et du tellure à 99,99% entre novembre 2009 et septembre 2011 (moyenne min-max bihebdomadaire de Metal Pages [21]).

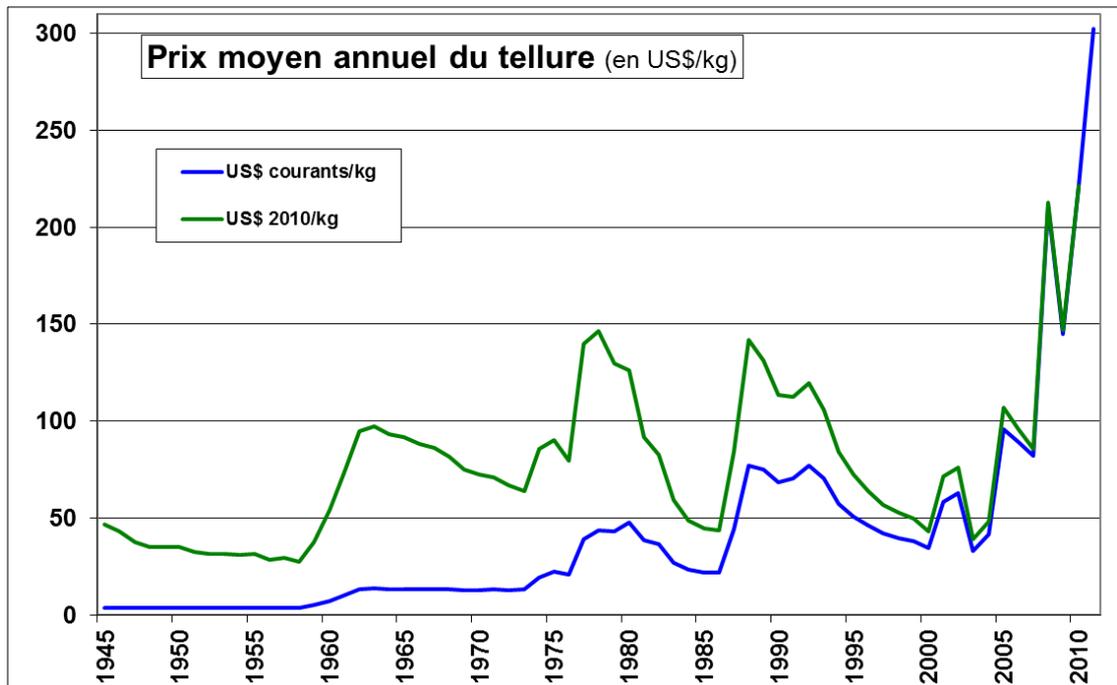


Figure 12 : Évolution du prix moyen annuel du tellure entre 1945 et 2010 (sources : USGS, Metal Pages).

Jusqu'à la fin des années 1950, le prix du tellure était très stable et bas car il était très peu utilisé dans l'industrie. Il s'échangeait alors à moins de 4 \$/kg (environ 30 \$

2010/kg). Au-delà des fluctuations de l'économie en général, le bombement global des prix entre 1960 et le début des années 2000 peut être lié au développement des diverses applications technologiques du tellure, en particulier dans l'industrie chimique, la métallurgie et les premières applications électroniques

La baisse des prix observée dans les années 1990 est interprétée comme liée d'une part, au remplacement progressif, dans les photocopieurs xérogaphiques, des photorécepteurs à tellure-sélénium par des photorécepteurs organiques, et d'autre part, à l'exportation massive de matières premières par les pays de l'ancienne Union Soviétique suite à son démantèlement.

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 forte augmentation de sa demande en matières premières qui en découle. Les prix bas des matières premières dans les années 1997-2002 avaient également induit une certaine faiblesse de l'offre. Le développement des technologies nouvelles, notamment des panneaux photovoltaïques à couches minces, a aussi accru la demande mondiale en tellure. En mai 2011, le tellure s'échangeait au prix record de 345 US\$/kg.

3.7.2. Évolution future des prix

En l'absence de statistiques fiables concernant la demande en tellure, il est difficile de prévoir l'évolution de son prix. Le volume global du marché du tellure, qui se situe à des niveaux très faibles en termes de tonnage (environ 220 t par an), reste un important facteur de volatilité des prix. L'incidence de tout évènement extraordinaire a de fortes répercussions sur son cours.

La demande devrait continuer à croître en électronique, tirée par le développement des panneaux photovoltaïques CdTe. Les autres utilisations du tellure en imagerie thermique, appareils de refroidissement thermoélectrique, instrumentation médicale sont également appelées à se développer. Étant données les faibles quantités de tellure demandées par ces applications, ces industries sont plus sensibles à la disponibilité physique du métal qu'à son prix.

Les autres industries principales consommatrices de tellure, la métallurgie et la chimie, tendent, quant à elles, à abandonner progressivement son utilisation au profit de substituts moins onéreux.

Cependant, en réponse à la hausse des prix de ces dernières années, la récupération du tellure dans les raffineries de cuivre devrait s'améliorer et le recyclage des cellules photovoltaïques va probablement se généraliser d'ici une dizaine d'années. L'offre en tellure disponible sur le marché pourrait ainsi être plus abondante. Mais les déséquilibres offre-demande à court terme, impossibles à chiffrer compte tenu du manque de données précises et fiables, pourraient continuer à faire varier les prix.

4. Ressources et production mondiale

4.1. LES SOURCES DE TELLURE

4.1.1. Abondance du tellure dans l'écorce terrestre

Le tellure est l'un des éléments les plus rares dans la croûte terrestre, avec les platinoïdes et le rhénium. Son abondance dans l'écorce terrestre est de l'ordre de 1 ppb (1 µg/kg).

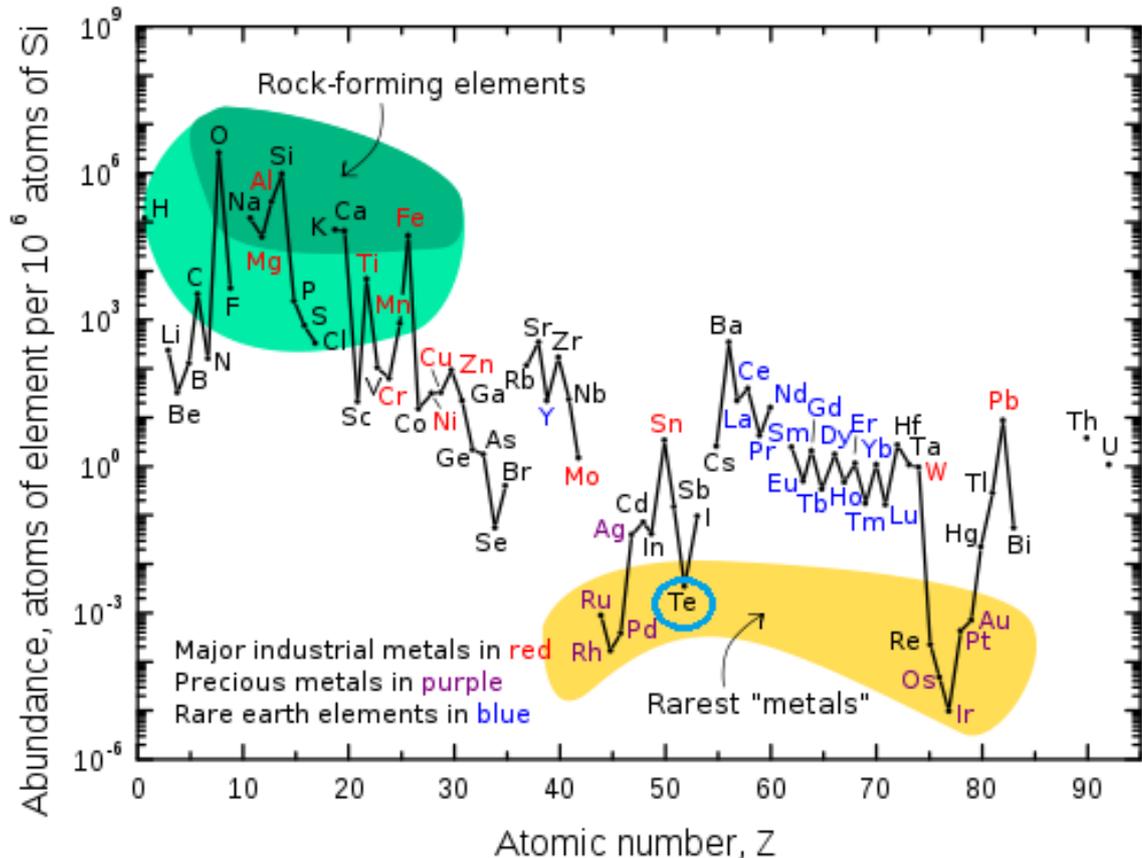


Figure 13 : Abondance relative des éléments dans la croûte terrestre supérieure, par nombre d'atomes. Le tellure est l'un des éléments les plus rares (USGS, 2002 [2]).

4.1.2. Minéraux et minerais

Le tellure n'est que peu lithophile. Il se trouve la plupart du temps dans des sulfures (en substitution partielle du soufre) ou sous forme de minéral supergène de basse température. Occasionnellement, il est trouvé sous forme native).

Les principaux minéraux du tellure individualisés sont :

- des tellures de métaux précieux : Une quarantaine est connue, parmi lesquels la calavérite AuTe_2 , la sylvanite AuAgTe_2 , l'hessite Ag_3Te et la petzite Ag_3AuTe ;
- des tellures de métaux de base, comme l'altaïte PbTe , la melonite NiTe_2 et la tellurobismuthite Bi_2Te_3 ;
- des sulfosels, comme la tétradymite $\text{Bi}_2\text{Te}_2\text{S}$;
- un oxyde: la paratellurite TeO_2 ;
- des tellurites et tellurates de Bi, Cu, Fe, U, Hg, Pb, et plus accessoirement, de Mn, Ca et Zn. Une quinzaine de minéraux sont reconnus.



Figure 14 : Échantillon de calavérite (AuTe_2) sur quartz prélevé dans la mine Cresson, Cripple Creek District aux États-Unis (© Mindat : www.mindat.org) .

Minéral	Formule	Teneur en tellure
Limonite	$\text{FeO(OH).nH}_2\text{O}$	27 ppm
Pentlandite	$(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$	13 ppm
Bornite	Cu_5FeS_4	10 à 15 ppm
Chalcopyrite	CuFeS_2	2 à 72 ppm
Pyrrhotite	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}_x$	4 à 45 ppm
Magnétite	Fe_3O_4	Traces
Pyrite	FeS_2	Traces
Millérite	NiS	Traces

Tableau 5 : Teneurs en tellure dans des sulfures du gisement Ni-Cu de Norilsk (Sindeeva, 1964 [23]).

Les tellures aurifères, tels que la calavérite (Figure 14), sont les minéraux composés de l'or les plus fréquents. C'est d'ailleurs sous cette forme que le tellure a été découvert.

Le tellure est également présent en faible quantité, voire en traces, dans des sulfures divers. C'est notamment le cas dans les gisements de cuivre ou de cuivre-nickel

sulfurés. Le Tableau 5 présente les teneurs en tellure mesurées dans des sulfures du gisement russe de Norilsk à Cu-Ni.

4.1.3. Principaux types de gisements

Le tellure se trouve en petites quantités dans la plupart des sulfures, mais il est extrait à plus de 90 % des résidus de raffinage du cuivre (boues anodiques). Le reste de la production provient de l'écumage dans les raffineries de plomb ainsi que des poussières et gaz générés lors de la fonte des minerais de bismuth, cuivre et plomb. Très occasionnellement, le tellure peut être récupéré en sous-produit de la métallurgie du nickel-cuivre et des platinoïdes associés.

S'il n'existe pas à proprement parler de gisement de tellure, il est présent dans différents types de corps minéralisés :

- *les porphyres cuprifères*, parfois à or et molybdène (Chili, Pérou, États-Unis) ;
- *les amas sulfurés* d'origine magmatique à Ni-Cu (Norilsk et Pechenga en Russie, Sudbury au Canada...)
- *les gisements hydrothermaux* de Cu-Mo (Kadzharan au Kazakhstan) ;
- *les amas pyriteux* (Oural, Altaï) ;
- *les gisements de cuivre encaissés dans les sédiments* (Copperbelt en Zambie-République Démocratique du Congo, le Kupferschiefer en Pologne...)
- *les « chapeaux de fer »* qui recouvrent les dépôts sulfurés (Maykain, Uchaly, Chudak...)
- *les gisements épithermaux* à Au-Ag (Cripple Creek aux États-Unis, Mine de l'Empereur dans les îles Fidji) ;
- *les placers à or* (Placer de Khorogocha...).

À l'heure actuelle, le tellure n'est pas récupéré lors du traitement des minerais à tellures aurifères.

La compagnie chinoise *Sichuan Apollo Star S&T* (www.scasolar.com), filiale à 100 % du groupe américain Apollo Star, se décrit comme une société « totalement intégrée verticalement de la mine au raffinage du tellure ». La compagnie possède la mine de Dashuigou (province de Sichuan) et a obtenu les droits d'exploitation du gisement de Shimian (province de Majiagou). Selon eux, ces deux mines pourraient devenir très rentables et constituent les deux seuls gisements au monde où le tellure est reconnu comme la première substance d'intérêt économique des projets. D'après une étude réalisée par des consultants indépendants (Behre Dolbear Asia, Inc), les ressources totales du gisement de Dashuigou sont de 30,2 kt de minerai à 0,78% Te et 1,09% Bi, soit 236 t de tellure contenu (dont 9,4 kt de minerai contant et 131 t de tellure en ressources indiquées).

4.1.4. Gisements et potentiel en France

Les ressources potentielles de tellure 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, vus les cours très faibles du tellure entre 1981 et 2003, il n'y a pas été dosé ni recherché.

Les gisements français parmi les plus importants susceptibles de contenir, ou d'avoir contenu, du tellure qui aurait pu être récupérable sont les suivants:

- Amas sulfurés à cuivre de Chessy (69) ;
- Amas pyriteux à or de Rouez (72) ;
- Gisements d'or-arsenic de Salsigne (11), et d'or-antimoine de La Lucette (53) ;
- Filons hydrothermaux à métaux de base de Saint-Salvy (81), etc. ;
- Gisements d'uranium : Limousin, bassin de Lodève.

Les gisements listés ci-dessus ont été exploités mais sont désormais tous fermés. Il n'a pas été cité de production de tellure de ces gisements, et leurs teneurs et ressources éventuelles en tellure 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 tellure 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. Cela en fait un gisement de taille extrêmement modeste sur le plan mondial, et son exploitation n'est pas envisagée dans un futur proche.

Toutefois, si l'on calcule la ressource en tellure en utilisant la quantité moyenne de 0,065 kg de tellure récupérable par tonne de cuivre (Jdid et Blazy, 2008 [5]), le gisement de Chessy contiendrait un total d'environ 7 t de tellure récupérable. Cela représente 4 % de la production mondiale de tellure sur une année comme 2007 (174 t selon l'USGS [22], ou 113 t selon le BGS [24]).

4.2. RESSOURCES ET RÉSERVES

Il est difficile d'avoir une évaluation fiable des ressources et réserves en tellure mondiales. Il est récupéré à plus de 90 % en tant que sous-produit du raffinage du cuivre. Les opérateurs miniers qui exploitent ces gisements de cuivre ne publient pas, et souvent, n'évaluent pas, les ressources en produits secondaires comme le tellure, mais également le sélénium et le rhénium.

4.2.1. Estimations publiées par l'USGS

Les réserves mondiales en tellure sont publiées par l'USGS. Il ne s'agit toutefois que d'estimations, obtenues par des sources qui nous sont inconnues.

L'USGS distingue deux terminologies :

- les réserves représentent le contenu en tellure valorisable à partir des minerais exploitables de manière économique en 2009 ;
- les « réserves base » représentent le contenu en tellure des ressources en minerai démontrées (mesurées + indiquées) qui pourraient, à l'avenir, devenir économiquement exploitables. Les ressources supposées sont exclues de cette définition. Elles ne sont plus présentées pour le tellure depuis 2010.

Pays	Réserves (t Te)	Reserve base (t Te)
États-Unis	3 000	6 000
Pérou	2 300	3 700
Canada	700	1 500
Autres ¹	16 000	37 000
TOTAL	22 000	48 200

¹ L'Australie, la Belgique, la Chine, l'Allemagne, le Kazakhstan, les Philippines et la Russie produisent du tellure raffiné, mais les données ne sont pas disponibles.

Tableau 6 : Estimations des réserves primaires mondiales en tellure (USGS, 2009 [18]).

Ces données sont cependant soumises à quelques réserves. Les valeurs publiées prennent seulement en compte le tellure contenu dans des gisements de cuivre économiques. Cependant, moins de la moitié du tellure présent dans les boues anodiques est actuellement récupéré (USGS, 2011 [29]). La préoccupation croissante des compagnies concernant l'approvisionnement en tellure les pousse à investiguer d'autres ressources potentielles, telles que les tellurures à or et les minerais à Ni-Co. Ces nouvelles ressources ne sont pas incluses dans les estimations des réserves mondiales.

D'autre part, il est important de souligner le grand nombre de pays pour lesquels les données ne sont pas publiées. Le Chili, premier producteur mondial de cuivre, n'est pas mentionné alors que selon Jdid et Blazy, le Chili et les États-Unis détendraient à eux deux plus de 30 % des réserves mondiales en tellure [5]. Le manque de transparence qui caractérise l'ensemble du marché du tellure est un important facteur de réserves et nécessite de prendre en compte les données avec une précaution extrême.

Sur la base d'une consommation annuelle fixe en tellure approximée à 220 t, les réserves pourraient satisfaire la demande pendant 100 ans (220 ans en se basant sur les « reserves base »). Cependant, la demande mondiale en tellure va très probablement augmenter du fait du développement de la technologie photovoltaïque

CdTe, mais en l'absence de données fiables, aucune estimation du taux de croissance ne peut être proposée.

4.2.2. Estimation sur la base des ressources en cuivre sulfuré

Pour obtenir un autre ordre de grandeur des ressources potentiellement disponibles en tellure, on peut se baser sur les réserves mondiales en cuivre. L'USGS évalue les « réserve base » en cuivre à 1 Gt (2009), dont 620 Mt de réserves (2010) [28].

Sur ces réserves mondiale en cuivre, 443 Mt correspondent à des minerais devant être traités par flottation et pyrométallurgie et donc susceptibles de permettre la récupération de tellure.

Selon la Selenium and Tellurium Development Association (STDA), le traitement de 500 t de minerai de cuivre fournit typiquement 500 g de Te, soit 1 g de tellure récupéré par tonne de minerai traité [24]. Jdid & Blazy évaluent la récupération du tellure à 65 g par tonne cuivre récupérable [5], ce qui correspond à la récupération selon STDA pour un minerai à 1,5% de cuivre récupérable.

Sur ces hypothèses, les réserves en tellure récupérable seraient de 28 800 t, soit de quoi satisfaire 130 ans de consommation mondiale au rythme de 220 t/an.

Toutefois, la teneur en tellure des gisements cuprifères est loin d'être uniforme et avec les procédés actuels, seule la moitié du tellure disponible dans les boues anodiques du raffinage électrolytique du cuivre est effectivement récupérée. Ce calcul ne prend pas non plus en compte les ressources des gisements à Au-Te ni ceux à Cu-Co. Cette estimation a pour seul objectif de fournir un ordre de grandeur et met en jeu un certain nombre d'hypothèses.

Les gisements de cuivre sont nombreux et bien répartis géographiquement (Figure 15).

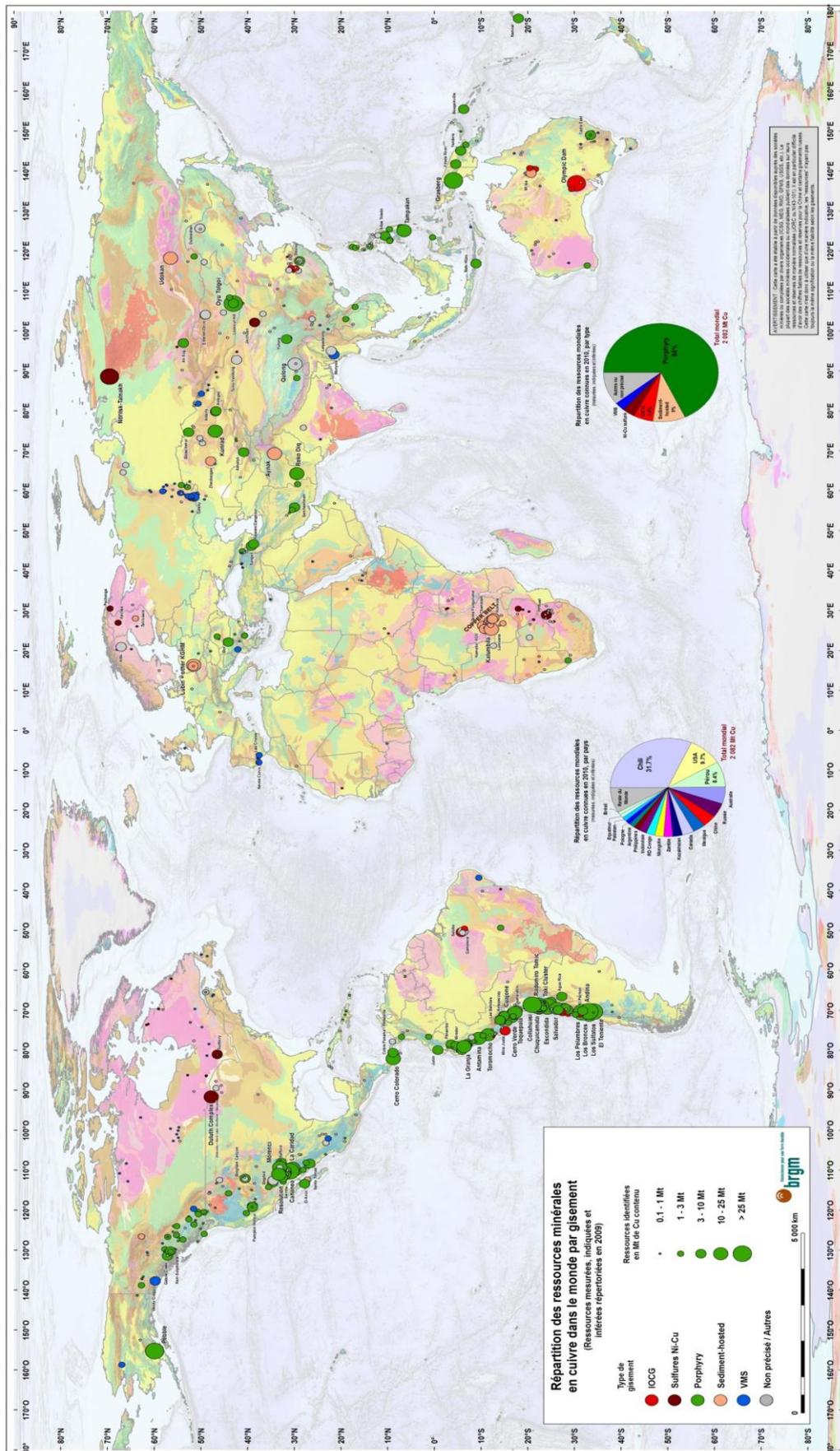


Figure 15 : Répartition mondiale des ressources minières en cuivre en 2009 (BRGM, 2010).

4.2.3. Estimations de Crowson

Jdid et Blazy citent l'ouvrage de Crowson en 2001 [28]. Son estimation des réserves mondiales en tellure est plus complète que celle publiée par l'USGS. À titre de comparaison, son évaluation est présentée dans le tableau 8.

Les données de ces deux publications sont proches, mais celles de Crowson ont l'avantage de préciser les réserves de pays non cités par l'USGS, comme le Chili (27,6 % des réserves mondiales) et la Zambie (10,1 % des réserves mondiales dans la Copperbelt).

L'offre minière en tellure est donc géographiquement bien répartie et fait intervenir, la plupart du temps, des pays politiquement stables (Figure 16).

Pays		Crowson (2001)		USGS (2001)	
		Réserves en Te (t)	% des réserves mondiales	Réserves en Te (t)	% des réserves mondiales
Afrique	Congo (Kinshasa)	1 700	8,5	-	-
	Zambie	2 000	10,1	-	-
	Autres	300	1,5	-	-
Asie	Philippines	700	3,5	-	-
	Autres	1 900	9,5	-	-
Europe	Russie	800	4,0	-	-
	Autres (Pologne, Yougoslavie)	1 600	8,0	-	-
Amérique du Nord	Canada	700	3,5	700	3,5
	Etats-Unis	3 000	15,1	3 000	14,9
Amérique latine	Chili	5 500	27,6	-	-
	Pérou	500	2,5	500	2,5
	Autres	300	1,5	-	-
Océanie	Australie	500	2,5	-	-
	Autres (dont Nouvelle Guinée)	400	2,0	-	-
Autres		-	-	16 000	79,2
TOTAL		19 900	100	20 200	100

Tableau 7 : Évaluation des réserves mondiales en tellure en 2001 par Crowson [28] et l'USGS.

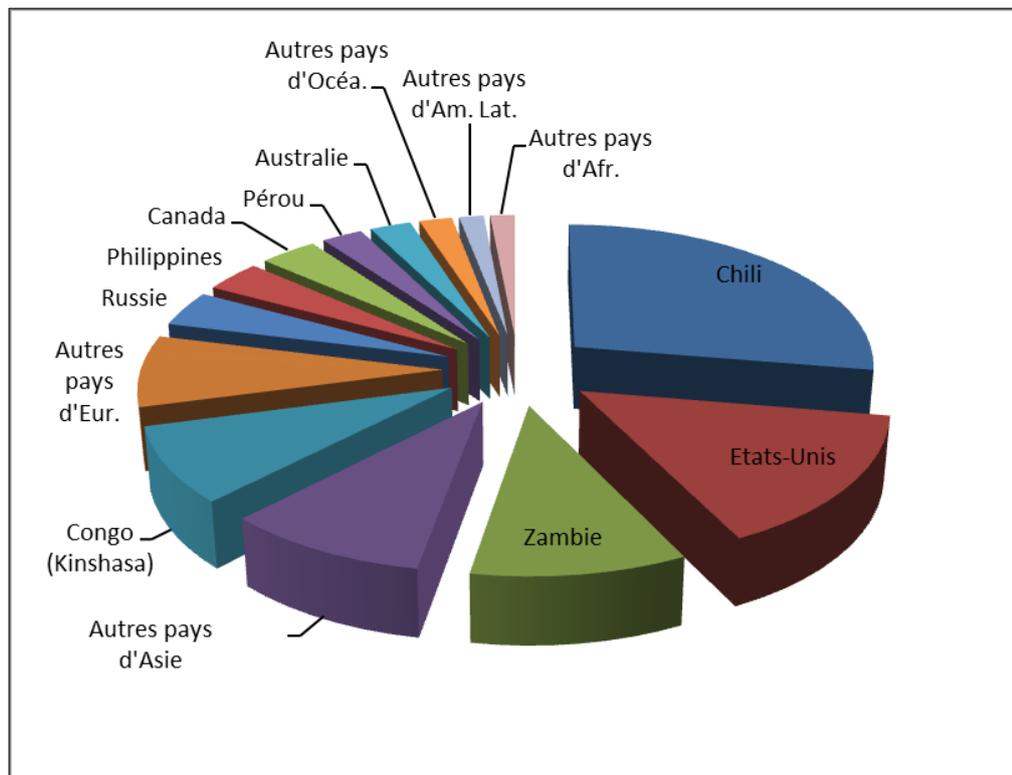


Figure 16 : Répartition géographique des réserves en tellure en 2001
(adapté d'après Crowson, 2001 [30]).

4.3. PRODUCTION

Plus de 90 % de la production mondiale de tellure provient des boues anodiques issues de l'électroraffinage du cuivre. Le minerai de cuivre est préalablement traité par pyrométallurgie. Le reste de la production provient de l'écumage dans les raffineries de plomb ainsi que des poussières et gaz générés lors de la fonte des minerais de bismuth, cuivre et plomb.

4.3.1. Données récentes et actuelles

Les données concernant la production mondiale de tellure sont rarement publiées par les sociétés productrices et ne sont qu'exceptionnellement compilées par les services statistiques nationaux des pays producteurs. Le Canada, la Pologne et l'Autriche publient officiellement des chiffres. L'USGS a publié les productions américaines jusqu'en 1975. Depuis, ces données sont considérées comme étant la propriété des sociétés, et restent donc confidentielles⁷. En 2009, le BGS en faisait une estimation

⁷“Withheld to avoid disclosing company proprietary data”.

moyenne de 50 t/an [24]. Le Ministère autrichien de l'économie, de la famille et de la jeunesse (BMWFJ, pour Bundes Ministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend) publie également des statistiques, notamment sur la production de tellure du Pérou.

À partir de ces différentes sources d'informations, l'évolution approximative de la production mondiale de tellure entre 2004 et 2010 est présentée (Tableau 8).

	2004	2005	2006	2007	2008e	2009e	2010e
Canada ¹	55	11	10	14	19	16	20
Japon	33	34	35	41	40	38	40
Pérou ²	22	32,88	37	35	28	30	30
Russie	34	34	34	34	34	34	35
États-Unis ³	50	50	50	50	50	50	50
Autres pays ⁴	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
TOTAL	194	161,88	166	174	171	168	175

Notes :

e : estimations

¹ Les données du Canada ne prennent pas en compte les produits intermédiaires exportés pour raffinage

² D'après le BMWFJ (Ministère autrichien de l'économie, de la famille et de la jeunesse)

³ Les données américaines sont gardées confidentielles par l'USGS. Ces estimations proviennent du BGS

⁴ L'Australie, la Belgique, le Chili, la Chine, la Colombie, l'Allemagne, le Mexique, les Philippines, la Pologne et le Kazakhstan produisent du tellure raffiné, mais la production n'est pas rendue publique.

Tableau 8 : Estimations de la production mondiale de tellure entre 2004 et 2009 en tonnes (USGS [22], BGS [26] et BMWFJ [27]).

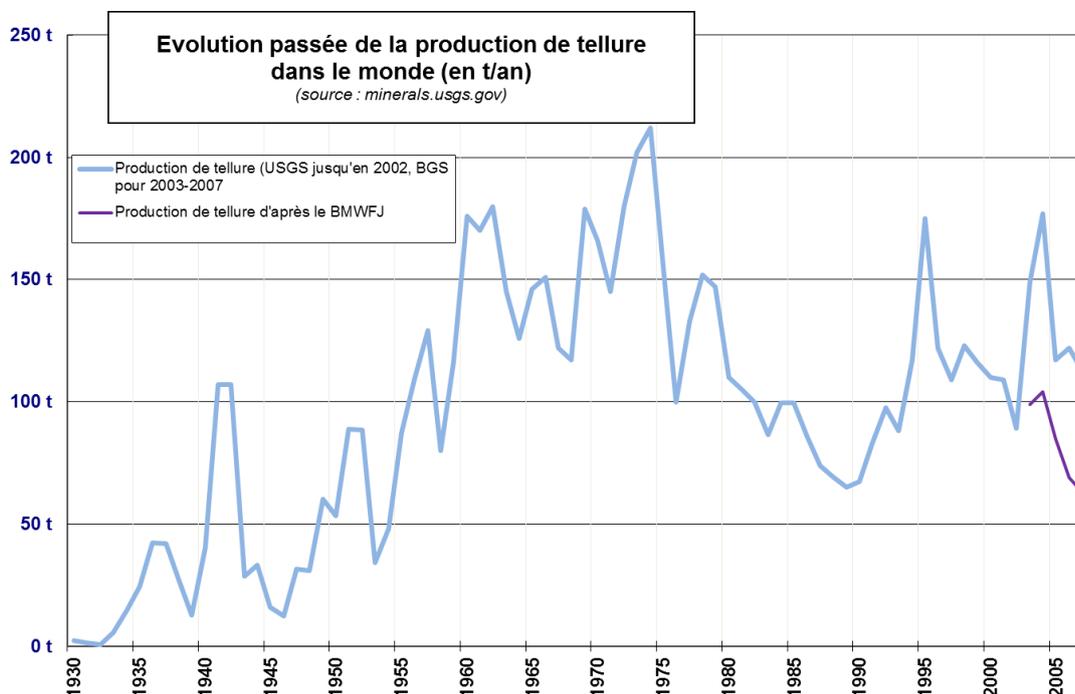


Figure 17 : Évolution de la production mondiale de tellure (sous estimée) entre 1930 et 2007 (USGS [24], BGS [28] et BMWFJ [29]).

De nombreux pays ne rendent pas publics leurs chiffres. La production mondiale est donc probablement assez largement sous-estimée. Cette production pourrait atteindre, selon Jack Lifton (2009, [41]), 450 à 500 t par an, voire même les 800 tonnes par an (NREL).

L'évolution de la production mondiale de tellure entre 1930 et 2007 est représentée en Figure 17.

L'augmentation de la production mondiale de tellure jusque dans les années 1975 reflète l'amélioration des techniques de récupération du tellure à partir des minerais de cuivre mais surtout, la croissance de sa demande dans la métallurgie, l'industrie chimique et l'électronique. La chute de la production observée entre 1980 et 1986 peut être reliée au retour sur le marché des catalyseurs en fin de vie ainsi qu'à la baisse de la consommation dans l'industrie des aciers. Entre 1986 et 2007, la production mondiale est très irrégulière. Il est difficile de définir des tendances, surtout en sachant que les données sont très incomplètes, mais la croissance générale de la production peut s'expliquer par la demande croissante en tellure dans l'électronique.

Pays	Production minière de cuivre en 2009 (en kt)	Production minière de cuivre dans la filière pyrométallurgique (en kt)	Capacité estimée de tellure récupérable (65 g/t de minerai traité, en t)
Chili	5 393	3 234	210
Pérou	1 215	1 058	69
Chine	1 041	980	64
Indonésie	972	972	63
Australie	838	834	54
États-Unis	1 206	746	48
Russie	699	689	45
Canada	480	477	31
Kazakhstan	468	468	30
Pologne	441	441	29
Zambie	620	419	27
Iran	234	234	15
Brésil	217	212	14
R.D Congo	293	200	13
PNG	167	167	11
Mexique	242	164	11
Argentine	143	143	9
Mongolie	126	124	8
Afrique du Sud	110	110	7
Bulgarie	101	101	7
Reste du monde	773	690	45
TOTAL	15 779	12 463	810
50% du tellure récupérable est effectivement récupéré. Capacité de production plus réaliste:			405

Tableau 9 : Estimation d'un ordre de grandeur de tellure récupérable à partir du minerai de cuivre traité par pyrométallurgie en 2009 (sur la base des données cuivre de l'ICSG, 2010).

Depuis 2003, les statistiques publiées par l'USGS sont incomplètes (confidentialité de la production américaine). Sur la période 2003-2007, le BGS et le BMWFJ présentent des chiffres, mais ceux-ci sont très différents. Si le BMWFJ évalue la production mondiale en 2006 à 69 t, elle était de 122 t pour le BGS, soit quasiment le double. Le problème majeur de la fiabilité des sources en une nouvelle fois mis en évidence.

Afin d'obtenir un ordre de grandeur de la capacité mondiale de production de tellure, on peut se baser sur les statistiques de l'industrie du cuivre. A partir de la production minière de cuivre dans la filière pyrométallurgique et à l'aide des estimations de la capacité de récupération de tellure dans cette filière de Jdid [6], on obtient, en 2009, une capacité de production de tellure de 810 t. Cependant, l'USGS (2011) souligne que seule la moitié du tellure récupérable est effectivement récupéré [29], ce qui abaisse ce chiffre à **405 t**.

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

90 % de la production de tellure provient du traitement des résidus de l'électroraffinage du cuivre. L'accroissement de la production de cuivre est estimé à 4 % par an afin de suivre l'augmentation de sa demande mondiale. La position de la récupération du tellure lors de ce processus est présentée en Figure 18.

Cependant, un nombre croissant de projets privilégient la méthode d'extraction par solvant suivie d'une électro-extraction (technique SX-EW⁸) qui permet de traiter les minerais oxydés. Cette technique ne permet cependant pas la récupération de tellure (ni de sélénium), et le développement de cette technologie même sur certains gisements de cuivre à minerai sulfuré pourrait limiter l'approvisionnement futur en tellure à partir de ces gisements (USGS, 2011 [29]).

Si à l'heure actuelle, les gisements de cuivre oxydés, qui ne récupèrent pas le tellure, sont attractifs car leur coût de production est plus faible et nécessite d'extraire le minerai moins profondément, ils seront probablement assez rapidement épuisés. Il ne s'agit en effet que de gisements superficiels et leur facilité technique d'exploitation va probablement entraîner une prolifération de projets. Dans une communication orale, Christian Hocquard (BRGM) estime que ces gisements connaîtront leur pic de production d'ici 2015, puis s'épuiseront peu à peu.

⁸ SX-EW pour Solvent Extraction-Electrowinning. Les solvants utilisés sont des chélatants puissants, appelés LIX. L'électro-extraction ou electrowinning est bien différente de l'électroraffinage. Elle consiste à électro-déposer le cuivre à partir de la solution ionique concentrée alors que l'électroraffinage utilise la dissolution anodique d'anodes en cuivre. Toutefois, dans les deux cas, il y a un dépôt de cuivre à la cathode. Le procédé est typiquement hydrométallurgique alors que l'électroraffinage s'associe dans la réalité industrielle à la pyrométallurgie. Dans le monde, la technologie combinant solvant et électro-extraction (SX-EW) a produit environ 3 314 kt de cuivre en 2009 (ICSG/GFMS, 2009).

Schéma du processus de production du cuivre par pyrométallurgie

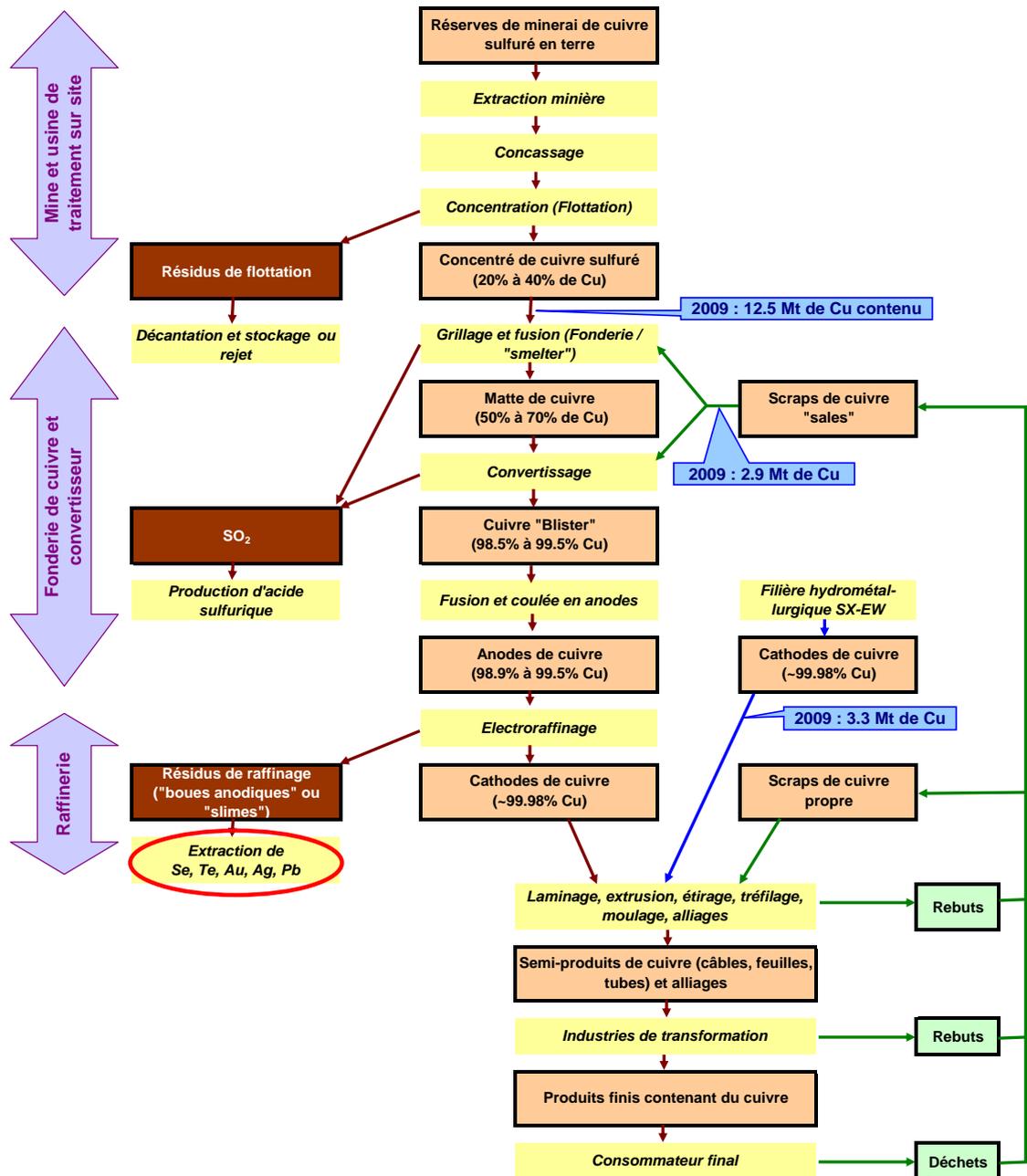


Figure 18 : Position de la production des boues anodiques à tellure et autres éléments dans le processus de production de cuivre par pyrométallurgie.

La tendance globale sur le marché du cuivre est, parallèlement à l'exploitation de ces gisements oxydés transitoires, d'exploiter de plus en plus profondément les gisements de cuivre sulfuré (type chilien) pour en extraire les sulfures primaires (les sulfures secondaires, en surface, plus riches en cuivre, étant quasiment épuisés). L'exploitation

de ces gisements plus profonds devrait alimenter le marché mondial en cuivre à l'horizon 2014 (Christian Hocquard, communication orale, 2011).

L'amélioration des techniques de récupération du tellure à partir des boues anodiques lors de l'électroraffinage du cuivre, qui n'est à l'heure actuelle que de l'ordre de 50%, devrait également permettre d'accroître la production de tellure dans cette filière.

D'autres sources de tellure devront également être envisagées si la demande mondiale en tellure devait s'accroître fortement : les tellurures à or, les gisements Ni-Co ou encore les charbons.

Dans les années à venir, la production mondiale de tellure devrait donc augmenter significativement.

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 Te, Se 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 à la cathode, et les résidus constituent une boue anodique ou « slime ».

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 5 à 10 % Te et 10 à 25 % Se [6].

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 tellure produit dans le monde. Le retraitement de ces boues anodiques a pour objectif non seulement de produire du tellure et du sélénium commercialisables, 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 tellure à partir des boues anodiques. Les principales voies sont décrites succinctement en § 5.1.1 et 5.1.2 ci-après (extraits synthétisés de Jdid et Blazy, 2008) [5].

5.1.1. Grillage alcalin oxydant

Dans ce procédé, on convertit d'abord le tellure à l'état hexavalent par un grillage alcalin oxydant. Les boues sont mélangées 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 des boulettes afin de 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 tellurate de sodium reste dans le résidu tandis que le sélénate passe en solution. La récupération du tellure s'effectue ensuite en lixiviant ce résidu à l'acide sulfurique dilué. Le tellurate insoluble est alors transformé en acide tellurique soluble ($\text{Na}_2\text{TeO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{TeO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$).

La réduction de l'acide tellurique peut ensuite être effectuée de différentes manières. Communément, l'acide chlorhydrique et le dioxyde de soufre SO_2 sont utilisés. On peut également faire appel à des réducteurs moins corrosifs et moins puissants, comme du sulfite de sodium à chaud. Le procédé nécessite alors ensuite une dissolution dans de

la soude suivie d'une électrolyse de la solution ($\text{H}_2\text{TeO}_4 + 2 \text{HCl} \rightarrow \text{H}_2\text{TeO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{Cl}_2$ puis $\text{H}_2\text{TeO}_3 + 2 \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Te} + 2 \text{H}_2\text{SO}_4$).

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. TeO_2 reste dans la phase solide de grillage avec les métaux précieux tandis que le sélénium passe en phase gazeuse.

Une lixiviation à l'acide chlorhydrique peut ensuite permettre de récupérer du tellure. Mais cette technique présente des inconvénients en interférant avec l'or et l'argent également présents dans les boues anodiques, et elle est peu utilisée pour la production du tellure.

5.1.3. Purification du tellure

Industriellement, les procédés précédents peuvent ne pas être suffisamment sélectifs, et il peut rester un peu de sélénium dans le concentré de tellure (et inversement). Une opération de purification est alors nécessaire.

L'acide tellureux (H_2TeO_3) issu des étapes précédentes est tout d'abord dissous dans de la soude NaOH pour obtenir du tellurite de sodium Na_2TeO_3 . Il est ensuite électrolysé.

Pour obtenir le tellure commercialisé à 99,5 %, le dioxyde est dissous dans HCl, et le tellure en poudre est obtenu par réduction avec SO_2 . Il est ensuite lavé, séché puis fondu.

5.2. LES PRODUCTEURS DE TELLURE

Les producteurs de tellure sont les sociétés qui raffinent le cuivre ou retraitent les boues anodiques issues de l'électroraffinage ainsi que celles qui recyclent les déchets polymétalliques. Certaines sociétés peuvent toutefois être intégrées et couvrir l'ensemble des opérations allant de l'extraction minière à l'obtention d'un concentré de tellure commercialisable, comme Xstrata Copper.

Dans une étude réalisée en 2006 par l'USGS sur 56 raffineries de cuivre (électroraffinage) partout dans le monde, 45 ont reporté la présence de tellure dans leurs boues anodiques, avec des teneurs ne dépassant pas 2 %. À titre de comparaison, 54 raffineries rapportent des teneurs en sélénium de 7 % en moyenne, et jusqu'à 25 % [14].

Il n'y a pas de producteur français de tellure. Sur le nombre de producteurs présents dans de nombreux pays, seuls Xstrata et Southern Copper publient leurs productions. Le site Hard Metal Assets liste les principaux producteurs mondiaux de tellure [31].

5.2.1. Europe

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. Il traite ainsi 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 150 t de tellure, mais ne publie pas sa production réelle [31].

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). Il possède également la fonderie et raffinerie de Rönnskar (Suède), la fonderie de Harjavalta et la raffinerie voisine de Pori (Finlande) ainsi que les fonderies de zinc d'Odda (Norvège) et Kokkola (Finlande) et de plomb de Bergaöe (Suède). Il produit des tellures de cuivre à 33 % Cu, 35 % Te et 6 % Ag dans ses raffineries de Rönnskar et de Pori. Le concentré de tellures de cuivre est ensuite vendu afin d'être purifié en tellure métal.

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 Langelsheim, divers métaux rares dont du sélénium 5N et du Te. Ils sont ensuite destinés à l'électronique et l'opto-électronique. Sa source de matières premières et sa production réelle restent à préciser.

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 tellure, 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 tellure. 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 tellure.

Dernière minute : Lundin Manning et In met Manning ont annoncé le 12 janvier 2011 s'être mis d'accord pour une fusion des deux sociétés sous le nom de Sumatera.

KGHM Polska Mie dz (Pologne) (www.kghm.pl) ne déclare pas produire de composés du tellure. En 2007, le tellure n'était pas récupéré des boues anodiques en Pologne. Ce pays importe du tellure.

5.2.2. CEI

Norilsk Nickel (Russie) (www.nornik.ru) exploite les mines de nickel-cuivre-platinoïdes de Taïmyr/Norilsk, les fonderies et raffineries de Norilsk (Polar Division), les mines de nickel-cuivre et la fonderie de Pechenga ainsi que 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 également 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, mais les quantités produites annuellement ne sont pas publiées.

Ural electromed / Ural Mining et Metallurgical Company (Russie) (www.elem.ru) exploitent des mines, fonderies et raffineries de cuivre dans l'Oural. Ils produisent et commercialisent en sous-produits des métaux précieux (Au, Ag, platinoïdes), du sélénium et du tellure. Il produit du tellure technique, mais les chiffres de sa production ne sont pas publiés.

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. La société ne publie pas de production de tellure, mais son minerai de cuivre est électro-raffiné et le Kazakhstan pourrait produire, selon nos estimations, 31 t de tellure par an (Tableau 9).

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. Elle produit et commercialise, en sous-produits, du sélénium, du tellure et des métaux précieux, à partir de ses propres concentrés ainsi que des résidus venant des mines canadiennes de Valenco. Xstrata a publié une production de 40 t de tellure en 2009, issue de sa raffinerie CCR [32].

ValeInco Ltd (Canada) (www.nickel.vale.com), filiale du brésilien Vale, exploite entre autres des mines de nickel, cuivre et platinoïdes au Canada (Sudbury, Thomson, Voisey's Bay). Raffine du cuivre à Copper Cliff (Sudbury). Elle ne produit pas de tellure directement mais fait traiter ses résidus tellurifères 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.). Elle travaille à partir de concentrés, résidus et déchets à recycler dans 2 usines au Canada (Montréal au Québec et Trail en Colombie-Britannique), une aux États-Unis (Deforest dans le Wisconsin) et une en Allemagne (Eisenhüttenstadt). Les quantités produites ne sont pas publiées.

Freeport McMoRan Copper and Gold (USA) (www.fcx.com) exploite les mines de cuivre ± molybdène ± or de Candelaria, Ojosdel Salado et El Abra (Chili), Ferro Verde (Pérou), Grasberg (Indonésie), Bagdad, Morenci, Miami, Safford, Sierrita (USA-Arizona), Tyrone (USA-Nouveau-Mexique) et de cuivre-cobalt de Tenké-Foungouroumé (RD Congo), ainsi que de molybdène à 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). Elle 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 Refining Corporation, acquis par Freeport en mars 2007, produisait en 2008 du tellure de cuivre, qui une fois filtré et séché, était commercialisé (Jdid et Blazy, 2008 [5]). Mais Freeport ne produirait plus désormais de tellure et revendrait la totalité de ses boues anodiques à l'extérieur.

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) qui le contrôle et Sterlite Industries (Inde) 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 tellure à plus de 99,7 % de pureté sous sept formes différentes, comme des poudres ultrafines, des granules et des galets. Selon Hard Assets, Asarco est, et de loin, le plus grand producteur de tellure commercialisable des États-Unis, ainsi que le troisième plus grand producteur de cuivre du pays [32].

Southern Copper Corporation (www.southerncoppercorporation.com), filiale à 80 % de Grupo Mexico, 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). Jdid et Blazy publient la composition suivante des boues anodiques traitées à Ilo : 31,8 % Ag, 23,5 % Se, 2 % Pb, 0,16 % Te, 0,06 % Au [5].

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.

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, produit et commercialise une gamme de produits de cuivre (cathodes, produits semi-finis), des métaux précieux et divers sous-produits dont du tellure 4N issus de sa raffinerie d'Hitachi.

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.

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

Sichuan Apollo Star S&T (Chine) (www.scasolar.com) est filiale à 100 % du groupe américain Apollo Star. Il se décrit comme une société « totalement intégrée verticalement de la mine au raffinage du tellure ». La compagnie possède la mine de Dashiugou (province de Sichuan) et a obtenu les droits d'exploitation du gisement de Shimian (province de Majiagou). Selon eux, ces deux mines pourraient devenir très rentables et constituent les deux seuls gisements au monde où le tellure est reconnu comme la première substance d'intérêt économique des projets.

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). Les quantités produites ne sont pas publiées.

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 traite pas elle-même.

Pacific Rare Specialty Metals & Chemicals (Philippines) (www.prsmetals.com), filiale à 100 % de l'américain II-VI, est une société spécialisée dans la production et la commercialisation de sélénium et de tellure (dioxyde de tellure et tellure métal sous forme de poudres et de lingots). Elle traite 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'Etat qui exploite quatre mines de cuivre et leurs complexes

métallurgiques associés en Inde : Khétri, Indian/Ghatsila, Malanjhand et Tajola. Produit et vend du cuivre cathode et des barres de cuivre et divers sous-produits. 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. Du tellure métal à 99,5 % est produit et commercialisé.

5.2.5. Afrique

Palabora Mining Company (Afrique du Sud) (www.palabora.co.za) est détenue par Rio Tinto (57 %), Anglo-American (17 %) et divers privés. Elle exploite la mine de cuivre et autres métaux de Phalaborwa (Afrique du Sud) et la fonderie et raffinerie associés. Elle a produit 82 kt de cuivre en 2009, et commercialise entre autres aussi des boues anodiques contenant environ 4 % de sélénium, 20 % 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. Elle produit du cuivre, du sélénium et un « intermédiaire du tellure ».

5.2.7. La Selenium-Tellurium Development Association (SDTA)

Certains producteurs se sont regroupés en une association, la Selenium-Tellurium Development Association (STDA, www.stda.org). Basée à Cavite, aux Philippines, elle a pour objectif de promouvoir le sélénium et le tellure et de communiquer à leur sujet [27]. 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

Les étapes aval de la filière du tellure concernent les activités de transformation du métal en produits semi-finis (comme les alliages CdTe) ou finis (tels que les panneaux photovoltaïques à couche mince).

5.3.1. Les acteurs français

Aucun producteur de tellure n'est présent en France. En revanche, plusieurs sociétés consomment du tellure, aussi bien des fournisseurs que des fabricants de produits tellurifères.

Fournisseurs

Azélis Electronics est une branche du groupe français Azélis Arnaud (www.arnaudgroup.com) basé à Paris. Il fournit les industriels français en un grand nombre de matières premières venues du monde entier dans des secteurs aussi variés que l'électronique, l'alimentaire, la pharmacie ou la cosmétique.

Azélis Electronics commercialise ainsi de nombreux composés tels que du sélénium, du germanium, du gallium, de l'indium, et des composés du tellure. La gamme de produits qu'il propose est indiquée dans le Tableau 10.

La compagnie est le revendeur de la société japonaise Furukawa Co. Ltd Electronic Materials Division pour les composés du tellure, du sélénium, de l'arsenic et du soufre.

Le tellure commercialisé trouve deux applications majeures dans la filière électronique française : la fabrication de détecteurs de radiations CZT (cadmium-zinc-tellure) et de capteurs CdTe (CEIS, 2010 [1]).

Composés	Pureté	Forme
Te	6N5	Poudre, galettes
ZnTe	6N	Poudre, morceaux
CdTe	6N	Poudre, morceaux
In ₂ Te ₃ , In ₂ Te	6N	Poudre, morceaux
InTe ₃	5N, 6N	Poudre, morceaux
GeTe, GeTe ₂	5N, 6N	Poudre, morceaux
PbTe	5N, 6N	Poudre, morceaux
Bi ₂ Te ₃	5N, 6N	Poudre, morceaux
Sb ₂ Te ₃	5N, 6N	Poudre, morceaux
AuTe ₂	5N	Poudre, morceaux
CuTe	5N	Poudre, morceaux
SnTe	6N	Poudre, morceaux
GaTe, Ga ₂ Te	5N, 6N	Poudre, morceaux
Ag ₂ Te	5N, 6N	Poudre, morceaux
CrTe	5N	Poudre, morceaux

Tableau 10 : Catalogue de composés du tellure proposés à la vente par Azélis Electronics [33].

Métallurgie

La société minière et métallurgique française **Eramet** (www.eramet.fr) et sa branche Alliages, qui regroupe les activités de ses filiales **Aubert & Duval** (www.aubertduval.com) et Erasteel (www.erasteel.com) produisent divers aciers spéciaux mais ne publient pas sur une éventuelle production d'aciers au tellure.

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[36]).

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 pièce destinées à des industries telles que l'automobile, l'aérospatial, le médical, la connectique et le nucléaire.

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

Électronique

Sofradir (www.sofradir.com) développe et fabrique des détecteurs infra-rouges refroidis pour des applications militaires, aérospatiales et commerciales. Ils sont spécialisés dans la technologie CdHgTe (en anglais MCT pour *Mercury Telluride Cadmium*). Leader européen, le groupe est le premier fabricant mondial de détecteurs infra-rouges MCT de deuxième génération.

Sofradir est, de plus, la première société européenne à avoir développé et fabriqué des détecteurs infra-rouges pour des applications aérospatiales. Ses détecteurs observent à l'heure actuelle la Terre, surveillent l'environnement et fournissent des données météorologiques [36].

Sa filiale Ulis (www.ulis-ir.com) est spécialisée dans les applications destinées à un usage civil. Elle utilise cependant une technologie à silicium amorphe et ne consomme donc pas de tellure.



Figure 19 : Détecteur infra-rouge Epsilon MW à HgCdTe commercialisé par Sofradir [36].
© Sofradir (www.sofradir.com)

Des filiales du groupe **Thales** (www.thalesgroup.com) utilisent ponctuellement des alliages Cu-Te et des soudures au tellure (pas de quantités publiées) [1].

Le **CEA** mène des études sur les semi-conducteurs CZT (CdZnTe), dont les propriétés en font « un matériau de choix pour la réalisation de détecteurs pour les applications d'imagerie de rayons X dites "Hautes Energies" » (Moulin et Pettier, 2008 [35]).

L'**ONERA**, centre de recherches aérospatiales, utilise des composés de tellure (Bi_2Te_3 , Sb_2Te_3) dans les matériaux thermoélectriques.

Photovoltaïque CdTe

Il n'y a, à notre connaissance, pas de société française qui fabrique des panneaux photovoltaïques CdTe. Des filiales de groupes internationaux sont, en revanche, installées en France.

Le leader mondial de la fabrication de panneaux photovoltaïques à couches minces CdTe est l'américain **First Solar**. Le groupe est désormais présent en France (bureaux à Paris). Son projet, 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 suite aux diminutions drastiques des aides de l'État au photovoltaïque individuel en France.

Le groupe allemand **Wirsol Solar AG**, a installé une filiale en France en 2010, à côté de Lyon, pour concevoir et fabriquer des panneaux solaires CdTe.

Le groupe **Saint Gobain** s'est montré intéressé par la filière à couches minces par l'intermédiaire de sa filiale Avancis. Celle-ci se concentre cependant sur la technologie CIGS. Des études sont toutefois menées en partenariat entre les centres de recherche de Saint Gobain français et allemand et le laboratoire national américain sur les énergies renouvelables (National Renewable Energy Laboratory, NREL, www.nrel.gov) afin d'améliorer l'efficacité des cellules CdTe (Ramesh G. Adhère *et al.*, 2010 [38]).

5.3.2. Autres acteurs européens

Ispat Inland Inc. (www.ispat.com), filiale du géant Arcelor Mittal basé au Luxembourg, fabrique et commercialise des barres en aciers spéciaux. Certaines qualités contiennent du tellure dans des teneurs toujours inférieures à 0,5 % (SAE 1016), voire même inférieures à 0,2 % (SAE 1211-1215) [39]. Ses installations sont cependant uniquement installées aux États-Unis.

L'anglais **Mining and Chemical Products Ltd**) (www.mcp-group.co.uk) fabrique et commercialise des alliages, des composés chimiques mais également des métaux mineurs. Dans son catalogue, du tellure métal est vendu à différentes qualités (2N5 à 6N⁹) et sous différents conditionnements (poudres, barres, bâtonnets). Il vend également des granulés mixtes à 70 % Te, 25 % Mn et 5 % Fe. Des composés

⁹ 2N5 : 99,5% Te, 6N : 99,9999 % Te

d'autres métaux mineurs sont également vendus, comme du sélénium, du bismuth ou encore de l'antimoine.

L'Europe est le premier producteur de modules photovoltaïques à couche mince, réalisant 31 % de la production mondiale en 2009 (EPIA, 2010 [13]). Le dynamisme du marché européen est tiré par l'Allemagne, l'Italie, la République Tchèque, la Belgique et la France. Les entreprises allemandes spécialisées dans le photovoltaïque sont nombreuses, parmi celles-ci, on citera les plus importantes.

Solen Energy GmbH (www.solen-energy.de) est l'une des principales compagnies du photovoltaïque en Allemagne. Ses installations produisent 60 MW par an, cumulant des installations à silicium cristallin et des installations à couche mince. Elle est basée à Meppen et possède des bureaux à Osnabrück, Emden et Oldenburg.

Le groupe allemand **Juwi** (www.juwi.com) est spécialisé dans les énergies renouvelables : photovoltaïque, biogaz, éoliennes et géothermie. En 2008, il a construit la plus grande centrale photovoltaïque de son époque : le Waldpolenz Solar Park (cf. Figure 5). Leurs activités s'étendent également à l'international grâce à des succursales en France, au Costa Rica et en Grèce.

L'allemand **Calyxo GmbH** (www.calyxo.com), fabrique des modules photovoltaïques à CdTe. Sa maison-mère, l'allemand Q-Cells (www.q-cells.com), est le premier fabricant de cellules photovoltaïques au monde (principalement au silicium). Calyxo a ouvert une usine à Bitterfeld-Wolfen/Thalheim (Allemagne) en 2008, avec une capacité de production montée à 110 MWc en 2011.

Wirsol Solar AG (www.wirsol.com) est un groupe multinational intégré dans le domaine des énergies solaires couvrant l'intégralité de la chaîne de services: conception technique, financement, construction clefs en main et maintenance d'installations photovoltaïques. Son siège social est en Allemagne (Bade-Würtemberg), et il a des filiales en France, Espagne, Italie, Belgique, Turquie, Grande-Bretagne et États-Unis. Wirsol est leader en Allemagne dans le domaine des installations de petite et moyenne taille. Sur le plan international, il figure comme un pionnier en matière de prestations dans toutes les étapes de l'énergie solaire : conseil, étude, installation, entretien, service et financement [37].

5.3.3. Les principaux acteurs dans le reste du monde

Fournisseurs

La société québécoise **5N Plus** (www.5nplus.com) est le leader mondial du tellure à haute pureté. Il fournit un grand nombre de sociétés spécialisées dans le photovoltaïque CdTe telles qu'Abound Solar Inc. (États-Unis), Calyxo GmbH (Allemagne) et Prime Star Inc. (États-Unis). Elle propose deux qualités : commerciale (sous forme de lingots 4N et 4N5) et de haute pureté (sous forme de lingots et grenailles à 5N, et des lingots de 5N à 7N+). Elle commercialise également des composés du tellure comme des alliages CdTe ou CdZnTe (CZT) [7].

Kisan Kinzoku Chemicals Co (www.kisan.ne.jp), basé au Japon, raffine et commercialise divers métaux rares et leurs composés, dont du sélénium et du tellure.

China Rare Metal Material Co Ltd (www.china-raremetal.com) commercialise de nombreux métaux rares et leurs composés chimiques sous diverses formes. Il propose du tellure sous forme de pellets à 4N ou 6N ainsi que du tellure de très haute pureté (5N à 7N) destiné à la fabrication de semi-conducteurs (CdTe, CdZnTe).

Photovoltaïque CdTe

First Solar (www.firstsolar.com), fondé en 1999 aux États-Unis, est le leader mondial de la fabrication de cellules CdTe, réalisant à lui-seul 70 % de la production mondiale. En 2009, il annonçait une capacité de 1,23 GW avec des rendements atteignant 11,1 % [16]. Il possède des installations aux États-Unis, en Malaisie, en Allemagne, et prochainement au Viêt-Nam. Début 2009, la société avait annoncé avoir réussi à abaisser le coût de production à moins de 1 dollar le watt. En 2012, son usine aux États-Unis devrait permettre de recycler les panneaux CdTe (Monier *et al.*, 2010 [40]).

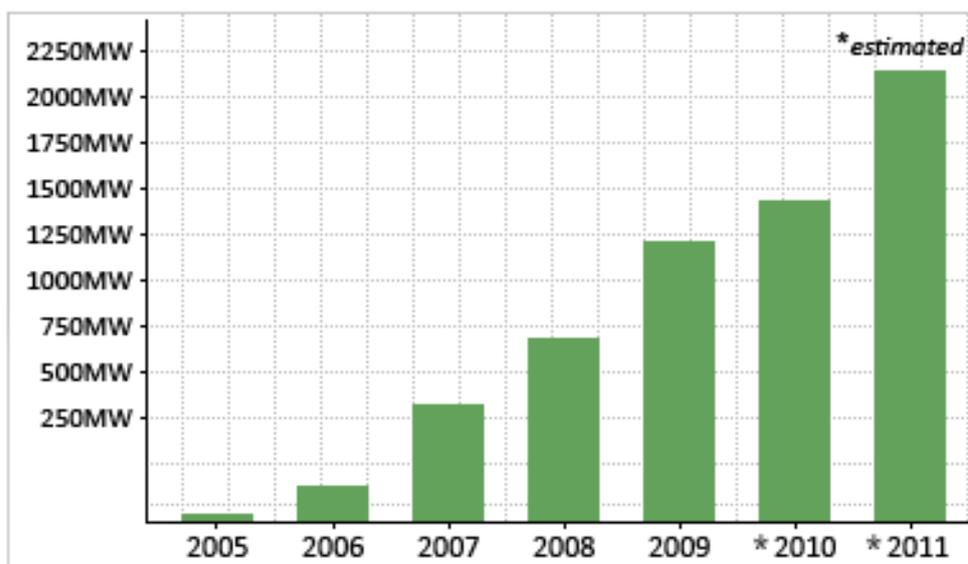


Figure 20 : Croissance de la capacité de production photovoltaïque CdTe de First Solar entre 2005 et 2011 (estimations) (First Solar [14]).

Prime Star Solar (www.primestarsolar.com) est une société américaine spécialisée dans la fabrication de modules photovoltaïques à couche mince, et notamment, les cellules CdTe. Depuis 2008, **General Electric Energy** est devenu l'actionnaire principal de cette société en plein essor.

L'américain **Abound Solar** (www.abound.com), anciennement appelé AVA Solar, produit des panneaux solaires CdTe de nouvelle génération. Ces modules sont parfaitement adaptés à des installations de grande envergure.

6. Conclusions : préconisations et leviers pour l'action

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
2	2	1	3	2	2
<p>Les nombreux gisements abritant potentiellement du tellure sont bien répartis géographiquement.</p> <p>Sa production est cependant dépendante à 90% de celle du cuivre.</p> <p>De nombreuses autres sources potentielles de tellure existent mais ne sont, à l'heure actuelle, pas exploitées.</p>	<p>La production mondiale est répartie sur tous les continents et entre de nombreuses sociétés.</p> <p>La pérennité des filières cuivre est assurée à court et moyen termes.</p> <p>Les mines (cuivre) et les raffineries sont souvent extrêmement éloignées.</p> <p>Seulement 50% du tellure récupérable dans la filière cuivre est effectivement valorisé.</p>	<p>Une politique de restriction et de quotas n'aurait pas beaucoup d'effet car les sources d'importation sont nombreuses.</p> <p>La Chine n'est pas un acteur majeur de la filière.</p>	<p>Rejet de SO₂, Cl₂, H₂SO₄ et de composés arséniés lors du raffinage du tellure.</p> <p>Les électrolytes usés provenant de la purification électrolytique du tellure contiennent du plomb et du sélénium.</p> <p>Le tellure et ses composés sont moyennement toxiques.</p>	<p>La métallurgie du cuivre est absente de France mais assez présente en Europe (Belgique, Allemagne, Suède, Espagne)</p>	<p>Le tellure est partiellement substituable dans la catalyse, la verrerie, la lubrification et la métallurgie.</p> <p>Compétition sur le photovoltaïque à couches minces entre 3 technologies.</p> <p>Le tellure est critique dans des secteurs de niche (récepteurs infrarouges, capteurs de rayons X, détecteurs de radiations CZT, alliages thermoélectriques).</p>

Tableau 11 : Composantes de la criticité du tellure.

Au niveau minier mondial, les ressources en tellure sont suffisamment larges, le point critique provient plutôt de sa valorisation, car la récupération du tellure à partir des résidus de la métallurgie du cuivre n'est pas encore généralisée et les rendements resteront faibles. Les risques pesant sur les approvisionnements en tellure sont ainsi évalués à "moyenne" (3/5).

Compte tenu des faibles quantités de tellure utilisées dans l'électronique et les détecteurs infrarouges, et en l'absence de société française clairement engagée dans

le photovoltaïque CdTe, l'importance stratégique du tellure pour l'industrie française est évaluée à moyenne-faible (2,5/5).

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

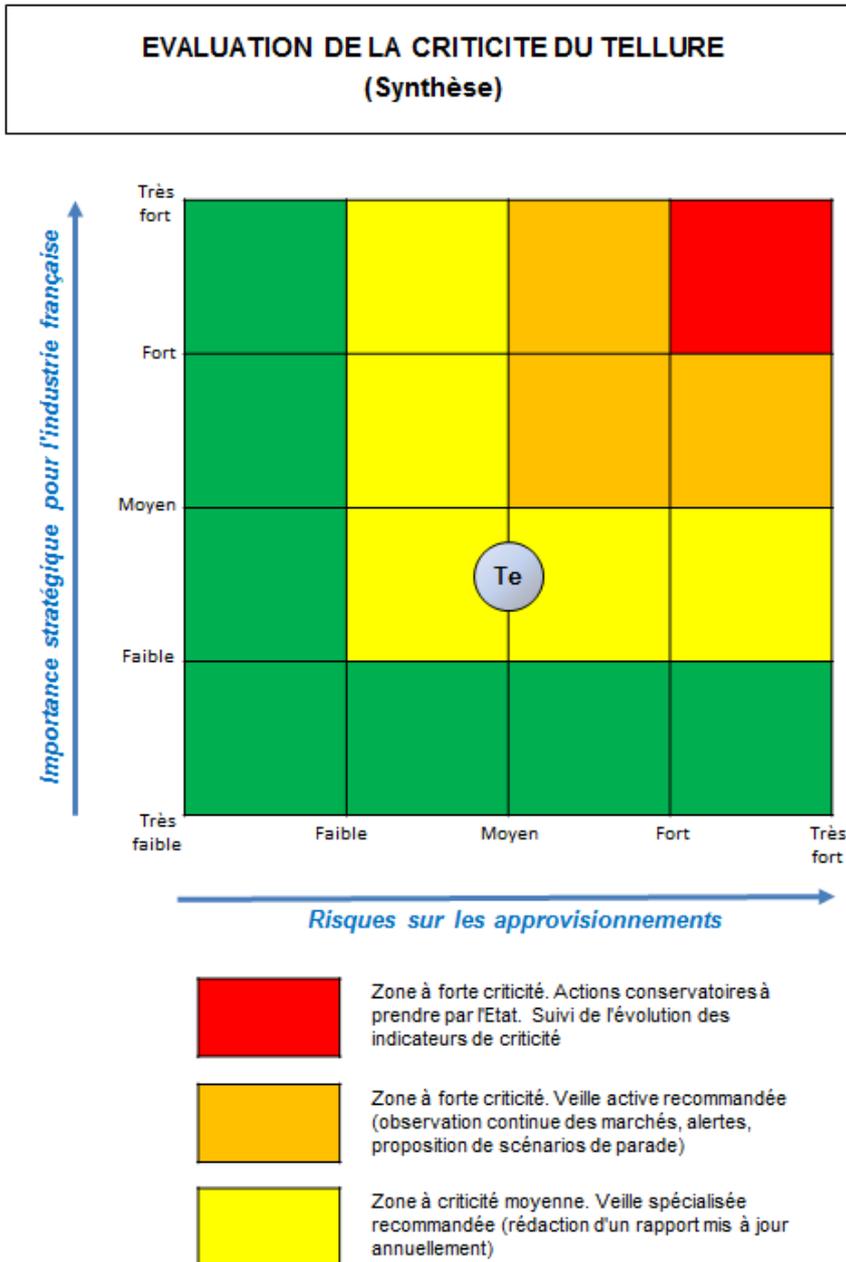


Figure 21 - Synthèse de la criticité du tellure.

6.2. 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.

Les producteurs de tellure de l'Union Européenne, comme Umicore (Belgique), Boliden (Suède) ne publient pas leur production.

De la même manière, les États-Unis considèrent leur production de tellure comme confidentielle et non publiable depuis 2003, en raison de leur règle faisant considérer comme confidentielle les quantités produites des substances qui sont produites par moins de trois sociétés.

Une incitation par les institutions compétentes pour que les différents acteurs de la filière à publier leurs chiffres, aussi bien de production que de consommation, serait appréciable.

6.3. 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.).

6.4. DÉVELOPPEMENT DE LA CONNAISSANCE DU POTENTIEL MINÉRAL FRANÇAIS ET EUROPÉEN

Lors des travaux historiques de l'inventaire du potentiel minéral français (1975-1990), le tellure, comme nombre de métaux mineurs, n'était pas recherché.

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 tellure et sa récupérabilité.

Il pourra aussi convenir d'étudier les teneurs et la récupérabilité du tellure lors des opérations de nettoyage et retraitement d'anciens déchets miniers et métallurgiques (anciennes mines d'or de Salsigne et de la Lucette, d'uranium de Lodève, etc.).

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

7. Bibliographie

- [1] **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.
- [2] **U.S. Geological Survey** (2002), Rare Earth Elements - Critical Resources for High Technology, Fact Sheet 087-02 <http://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/>.
- [3] **International Chemical Safety Cards** - Programme International sur la Sécurité des Substances Chimiques, page sur le tellure /nfrn0986.html
- [4] **U.S. Geological Survey** (2005) Tellurium end-use statistics, *in* Kelly, T.D., and Matos, G.R., comps., Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: U.S. Geological Survey Data Series 140 <http://pubs.usgs.gov/ds/2005/140/>
- [5] **Jdid E-A., Blazy P.** (2008), Métallurgie du sélénium et du tellure, *in* Techniques de l'ingénieur M 2 370, 17 p.
- [6] **Merchant Research and Consulting Ltd (MRC)** (2010), Tellurium – Market Review, 15 p.
- [7] **5N Plus**, développement et production de matériaux de haute pureté www.5nplus.com/index.php/en/selsComposes.html.
- [8] **Tanaka T. et al.** (2004), Electroluminescence and photoluminescence characteristics in ZnTe LED fabricated by Al thermal diffusion, *in* Physica status solidi. C. Conferences and critical reviews, vol. 1, n°4, p. 1026-1029.
- [9] **Solar Systems and Equipment (SSE)**, CdTe solar cells www.solar-sse.com/cts.htm.
- [10] **Angerer G., Erdmann L. et al.** (2009), Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Fraunhofer Institut für System- und Innovations forschung / Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, 83 p.
- [11] **National Renewable Energy Laboratory (NREL)**, Cadmium use in photovoltaics <http://www.nrel.gov/pv/cdte/>.
- [12] **First Solar Inc.**, PV Technology Comparison http://www.firstsolar.com/Downloads/pdf/Technology_Comparison_PV_NA.pdf.
- [13] **European Photovoltaic Industry Association (EPIA)** (2010), Global market outlook for photovoltaics until 2014, 25 p. Disponible en ligne. .

- [14] **Micheal W. George (USGS)** (2010), Selenium and tellurium, Minerals Yearbook 2009, 2010, 10 p. Disponible en ligne : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/selenium/myb1-2009-selen.pdf>
- [15] **ADEME** (2010), Feuille de route « Electricité photovoltaïque », 73 p. www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=F73FFA11BF55FC7C4E969F1A234934831294236134747.pdf
- [16] **John Wiley & Sons Inc.** (2000), Tellurium and tellurium compounds, in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 26 p. www.scribd.com/doc/30122843/Tellurium-and-Tellurium-Compounds.
- [17] **Endicott Interconnect Technologies Inc.**, About CZT www.evmicroelectronics.com/czt.html.
- [18] **Robert D. Brown, Jr., John D. Jorgenson, Micheal W. George (USGS)**, Selenium and tellurium in Minerals yearbook, compilation des éditions de 1994 à 2009. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/selenium/>.
- [19] **Daniel Krajka** (2010), Les BRICs ont besoin d'acier, avril 2010, disponible en ligne : <http://indices.usinenouvelle.com/aciers/les-brics-ont-besoin-d-acier.292>.
- [20] **Inflation Data**, Consumer Price Index: www.inflationdata.com.
- [21] **Metal Pages**, Metal prices: www.metal-pages.com/metalprices/.
- [22] **U.S. Geological Survey** (2010), Tellurium statistics, in Kelly, T.D., and Matos, G.R., comps., Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: U.S. Geological Survey Data Series 140, octobre 2010 <http://pubs.usgs.gov/ds/2005/140/>.
- [23] **N.D. Sineevea**(1964), Mineralogy and types of deposits of selenium and tellurium, 363 p.
- [24] **Brown TJ et al. (BGS)**, World mineral production 2003-2007, 2009, 109 p.
- [25] **STDA** (2003), Présentation de la Selenium-Tellurium Development Association, www.stda.org/about.htm.
- [26] **U.S. Geological Survey** (2009), Copper, in Mineral Commodity Summaries <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/mcs-2009-coppe.pdf>.
- [27] **BMWFJ**, Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend www.bmwfj.gv.at/Ministerium/Seiten/default.aspx.
- [28] **Crowson Ph.** (2001), Minerals Handbook 2000-01, Statistics and analyses of the world's minerals industry. - Mining Journal Books Ltd. Eds., p. 321-329.

- [29] **U.S. Geological Survey** (2011), Tellurium, *in* Mineral Commodity Summaries <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/selenium/mcs-2011-tellu.pdf>.
- [30] **Blazy P., Jdid E-A.** (2002), Hydrométallurgie du cuivre, *in* Techniques de l'ingénieur M2242, 10 p.
- [31] **Vulcan T.** (2009), Tellurium and Garlic, publié sur le site Hard Assets Investor www.hardassetsinvestor.com/component/content/article/1632.html.
- [32] **Xstrata Copper Canada** (2009), Sustainability Report 2008, 44 p. www.xstrata.com/assets/pdf/xcu_sustainability_2008_canada.en.pdf.
- [33] **Azélis Electronics**, Catalogue des produits du tellure et de ses composés www.azeliselectronics.com/product/tellurium.html.
- [34] **Sofradir**, Infrared and cooled technologies, IR detector for military, space and commercial applications – Catalogue des produits www.sofradir.com/products/epsilon_mw.htm.
- [35] **Moulin V., Pettier J-L. (CEA)** (2008), Détection CdZnTe pour l'imagerie X haute énergie, *in* Database & Journal of non-destructive Testing www.ndt.net/article/cofrend2008/papers/051.pdf
- [36] **CTDEC**, Centre Technique de l'industrie du Décolletage www.1500tech.com/
- [37] **Wirsol Solar AG**, Solar Installations. www.wirsol.com/.
- [38] **Ramesh G. Dhere et al.** (National Renewable Energy Laboratory, Saint-Gobain Herzogenrath Research Center, Saint-Gobain Recherche) (2010), CdTe solar cell with industrial Al: ZnO on soda-lime glass, disponible en ligne : www.sciencedirect.com/.
- [39] **Arcelor Mittal**, Ispat Island bars products material safety data sheet www.mittalsteel.com/facilities/americas/Mittal+Steel+USA/documents/MSDS_InlandBars.pdf.
- [40] **Monier V. et al. (ADEME)** (2010), Etude du potentiel de recyclage de certains métaux rares, Partie 2, 153 p., téléchargeable sur le site de l'ADEME www2.ademe.fr/servlet/getDoc?sort=1&cid=96&m=3&id=73279&ref=&nocache=yes&p1=111.
- [41] **Jack Lifton** (2009), The Tellurium supply conjecture, 09/07/2009, www.resourceinvestor.com/News/2009/7/Pages/The-tellurium-supply-conjecture.aspx



Centre scientifique et technique
Service ressources minérales
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34