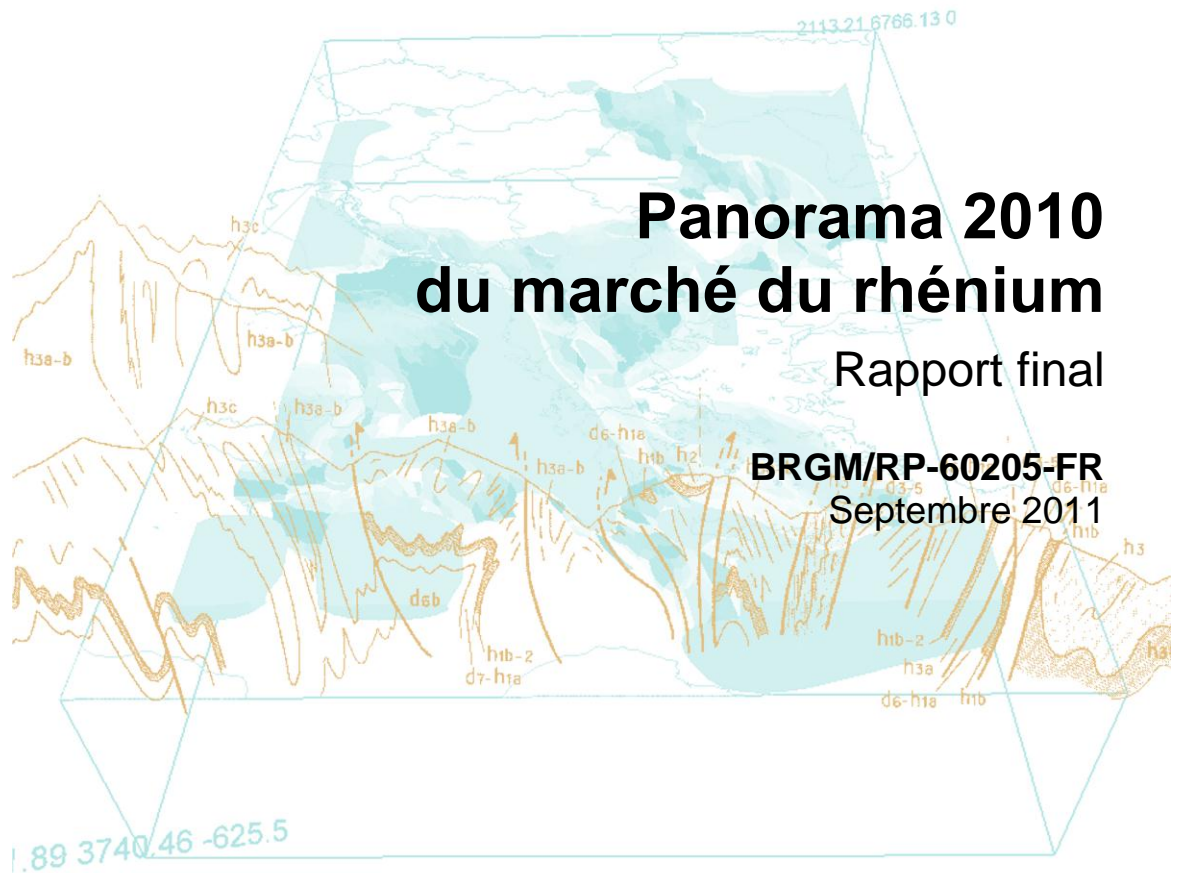


Document public



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Panorama 2010 du marché du rhénium

Rapport final

BRGM/ RP-60205-FR

Septembre 2011

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

A-S. Audion, B. Martel-Jantin

avec la collaboration de
J.F. Labbé

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

Vérificateur :
Nom : J.F. Labbé
Date :
Signature :

Approbateur :
Nom : Ch. Braux
Date :
Signature :

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

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

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

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

Audion A.S., Martel-Jantin B. (2011) - Panorama mondial 2010 du marché du rhénium. Rapport final. BRGM/RP-60205-FR, 76 p., 23 fig., 15 tabl.

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

Résumé

LE RHÉNIUM

Le rhénium est un métal de transition, 75^e élément du tableau de Mendeleïev. Dernier élément naturel stable découvert, son nom lui fut donné en référence au fleuve Rhin. C'est l'un des éléments stables les plus rares de l'écorce terrestre où son abondance est estimée entre 0,7 et 7 ppb selon les auteurs. Son principal minerai est la molybdénite (MoS₂). Sa production annuelle totale (primaire et secondaire) est de l'ordre de 50 tonnes et il s'achète en 2010 à 4 000 \$/kg en moyenne.

Propriétés et usages

Le rhénium est un métal blanc argent. Il est très réfractaire, résistant à la corrosion et ductile. De ce fait, il est largement utilisé dans les superalliages associé à du nickel, du cobalt, du molybdène ou du tungstène. Ces alliages de haute-technologie trouvent l'essentiel de leurs applications dans l'aéronautique (turbines de moteurs, ailettes d'avions) mais se trouvent aussi dans les génératrices d'électricité à gaz terrestres.

Il est également utilisé avec du platine dans des catalyseurs de l'industrie pétrochimique pour le raffinage du pétrole, la fabrication de composés BTX (Benzène, Toluène, Xylène) et la technologie GTL (Gas To Liquid).

De manière plus marginale, il entre dans la composition des filaments de lampes à incandescence, de thermocouples ou encore d'anodes de tubes à rayons X.

L'évolution de sa consommation est fortement liée à la croissance du secteur aéronautique qui constitue 60% de la consommation mondiale de rhénium. Cependant, les leaders mondiaux se positionnent différemment sur la question du rhénium et certains utilisateurs majeurs l'abandonnent progressivement (Snecma/Safran).

Substituabilité

Des recherches sont menées pour développer des superalliages dépourvus de rhénium. Des assemblages Ni-Cr-Co-Mo-W-Al-Ti-Ta sont par exemple développés, mais restent moins performants. L'iridium et l'étain ont également été testés en remplacement du rhénium dans les catalyseurs.

Ressources

Les principales ressources primaires de rhénium proviennent des unités métallurgiques qui traitent par grillage des concentrés de sulfures de molybdène. Ces molybdénites proviennent pour l'essentiel des minéralisations sulfurées des porphyres cuprifères.

En contexte sédimentaire, les grès cuprifères de Dzhezkazgan (Kazakhstan) sont une source importante de rhénium primaire. Les grès uranifères du Colorado et certains

gisements Zn-Pb de type MVT (Mississippi Valley Type) ont généré des productions de Re, comme à Kipushi en République Démocratique du Congo.

Des gisements sédimentaires liés à des schistes noirs, comme le Kupferschiefer en Pologne et en Allemagne, produisent également du rhénium. Les schistes noirs phosphatés à Ni-Mo présentent également des indices à Re, comme à Zunyi en Chine.

Les réserves économiquement exploitables en 2010 sont évaluées à 2 500 t de rhénium par l'USGS, ce qui représente l'équivalent de 50 ans de consommation mondiale actuelle. 85% du stock de rhénium correspondant sont réparties dans trois pays américains, par ordre d'importance États-Unis, Chili, et Canada. Cette production est subordonnée au développement de la filière du cuivre à partir des porphyres cuprifères de ces trois pays. Si l'on y ajoute les réserves mesurées et indiquées qui pourraient, à l'avenir, devenir économiquement exploitables, ce chiffre atteint 10 000 t.

Production

Le Chili est de loin le premier producteur primaire de rhénium avec une contribution proche de 50 % de l'approvisionnement mondial (24 t en 2009). Les États-Unis (10 t) viennent en seconde position, suivis de la Pologne avec 4 t en 2009 et du Kazakhstan (3 t).

Après un maximum de 55,5 t atteint en 2008, la production mondiale de rhénium a retrouvé en 2009 son niveau de 2006, soit un peu plus de 50,6 t/an. Cette production couvre deux types de ressources : la ressource primaire issue du traitement en plusieurs étapes des minerais et la ressource secondaire qui est issue du recyclage en fin de vie des produits contenant du rhénium. La ressource secondaire prend une part croissante dans la production globale (9,4 t en 2009).

Le développement de nouveaux projets miniers, comme Merlin (Ivanhoe) en Australie ou au Chili (Xstrata) devrait augmenter les capacités de production de rhénium primaire. Ceci, coordonné à l'augmentation du recyclage, devrait couvrir les besoins croissants des industriels.

Aucune exploitation minière, raffinerie de cuivre ou usine de grillage de concentrés de molybdène n'est présente en France. Par l'intermédiaire de sa filière Eurotungstène Poudres, Eramet produit des poudres ultrafines de rhénium.

En Pologne, KGHM Ecoren produit du rhénium à partir son minerai de cuivre sulfuré. La société Sadaci, filiale du géant chilien Molymet et basée en Belgique, récupère du rhénium à partir de concentrés de molybdène importés des États-Unis majoritairement.

Recyclage

Les ferrailles de superalliages sont recyclées afin de récupérer le rhénium et le platine. Eramet a ouvert une installation pilote fin 2009 afin de récupérer les métaux mineurs (Re, Co...) à partir d'alliages en fin de vie.

Les catalyseurs sont également largement recyclés. Il n'existe pas de filière parallèle pour leur recyclage, les catalyseurs usés étant systématiquement retournés aux fabricants. Longtemps leader dans le domaine, l'Allemagne est aujourd'hui le deuxième producteur mondial de rhénium secondaire.

En 2009, plus de 9 t de rhénium secondaire ont été produites dans le monde.

Prix

Le rhénium n'est pas coté dans des bourses telles que le London Stock Exchange (LSE). Il est commercialisé le plus souvent sous forme de perrhénate d'ammonium (APR à 69,4 % Re minimum) et de rhénium métal (pellets, poudres).

Les prix spot du rhénium sous ses trois formes principales décollèrent de manière spectaculaire en 2006 lorsque la demande du secteur aéronautique, qui était alors en pleine croissance, dépassa les capacités de commercialisation de l'industrie du rhénium. Le prix spot du rhénium métal atteignit alors 11 500 US\$/kg en octobre 2008. Cette bulle du rhénium éclata à la suite des effets de la crise financière de 2008 et du ralentissement industriel qui frappa l'industrie aéronautique. À la fin 2009, la chute vertigineuse des prix sur le marché spot s'arrêta sur un palier autour de 4 000 US\$/kg pendant l'année 2010.

Le volume global du marché du rhénium, qui se situe à des niveaux très faibles en termes de tonnage (53,5 t consommées en 2009), reste un important facteur de volatilité des prix sur le marché spot pour les trois types de produits commerciaux. L'incidence de tout évènement extraordinaire a donc des impacts importants pour les prix sur ce marché.

Comme il est probable que la demande continuera à croître, tirée par le secteur aéronautique, le prix du rhénium devrait plutôt poursuivre une tendance haussière. Toutefois, les choix en cours et futurs des principaux consommateurs de la filière (motoristes) vont certainement impacter ce prix.

Les principaux acteurs français

- Le groupe *Eramet*, par l'intermédiaire de sa filiale Eurotungstène poudres, produit des poudres très fines contenant au minimum 99,98 % Re dans son installation de Grenoble. Sa capacité annuelle de production serait inférieure à 100 kg. Par son installation pilote de recyclage, il devrait également produire du rhénium secondaire.
- *Axens*, filiale de l'IFP Energies Nouvelles, fabrique des catalyseurs contenant du rhénium pour l'industrie pétrochimique.
- L'*ONERA*, centre de recherche aérospatial, a développé des superalliages destinés aux turbines à haute pression des moteurs.
- La *Snecma*, filiale du groupe *Safran*, n'utilise plus pour l'instant de rhénium dans ses superalliages pour moteurs pour l'aéronautique ; *Turbomeca*, une autre filiale du groupe *Safran*, envisage en revanche son utilisation.

- *Alcatel Lucent* utilise de très faibles de rhénium pour la fabrication de thermocouples.
- *Thales Electron Devices* utilise du rhénium pur et en alliage avec du tungstène.
- *Alstom Power France* utilise des superalliages contenant du rhénium.

Criticité

La rareté du rhénium pourrait en fait un métal relativement critique quant à sa disponibilité. Toutefois, le niveau des ressources face aux quantités consommées, la variété des producteurs, le développement de nouveaux projets miniers et la croissance de la filière recyclage conduisent à une détente au niveau de l'offre.

Les industriels français font appel à des traders ou des fournisseurs pour leurs besoins en rhénium. Certains s'adressent à plusieurs fournisseurs différents pour sécuriser leurs approvisionnements.

Les besoins annuels portant sur des quantités faibles et des marchés de niche, l'importance stratégique du rhénium pour l'industrie française est évaluée à "moyenne" (3 sur 5).

Ces criticités sont résumée par la figure de la page suivante.

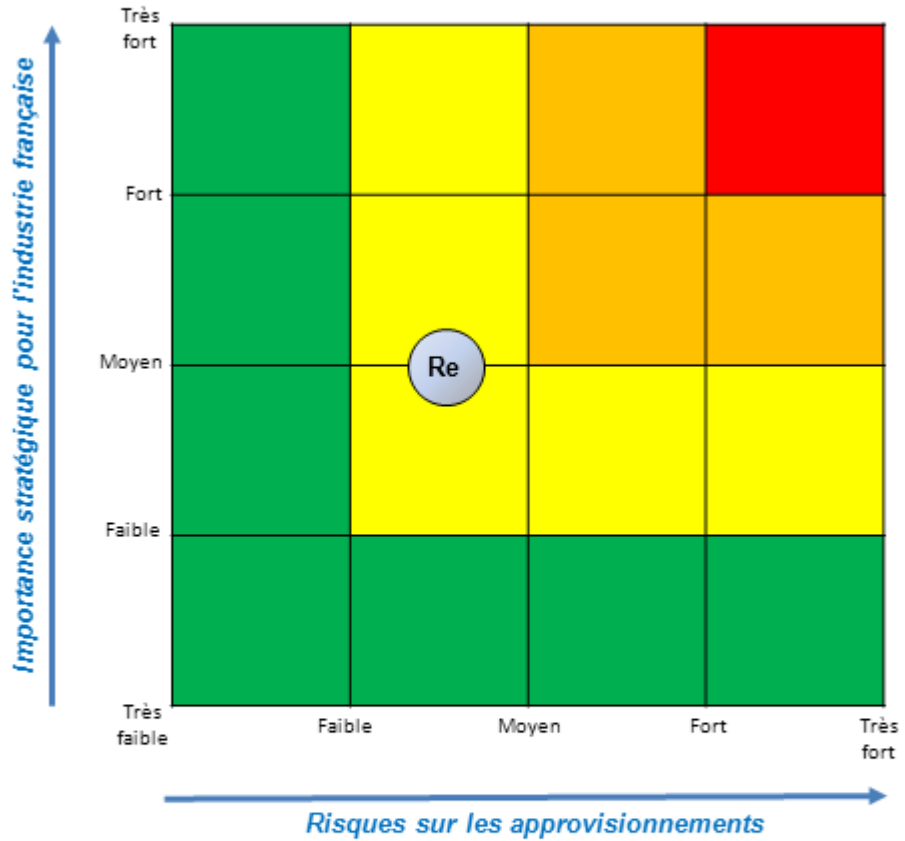
Il convient toutefois de souligner que, si Snecma/Safran a recherché et utilise désormais des solutions alternatives à l'utilisation du rhénium dans les alliages de ses moteurs, c'est précisément parce qu'ils avaient à un moment jugé le rhénium beaucoup trop critique, en particulier lors de la flambée du prix à 11 500 US\$ le kg en 2008.

Propositions

Malgré la criticité moyenne du rhénium au niveau global, il subsiste une inquiétude quant à l'approvisionnement de l'industrie française, face à laquelle plusieurs actions sont proposées :

- Sécurisation des approvisionnements, par l'établissement de contrats à terme entre les utilisateurs et les producteurs ainsi que par le passage d'accords bilatéraux avec des pays producteurs ou potentiels tels que le Kazakhstan ;
- Renforcement d'une veille technologique, notamment sur le secteur des superalliages destinés à l'aéronautique qui est en pleine mutation ;
- Développement du recyclage, en développant la filière de collecte des déchets de l'aéronautique ;
- Développement de la connaissance du potentiel minéral français et européen.

**EVALUATION DE LA CRITICITE DU RHENIUM
(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

Résumé	3
1. Introduction	13
1.1. TERMINOLOGIE UTILISÉE	13
1.2. DÉFINITIONS	13
1.3. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE	14
2. Le rhénium	17
2.1. PRINCIPALES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	17
3. Les usages	19
3.1. USAGES ET CONSOMMATION	19
3.1.1. Alliages hautes performances/superalliages	20
3.1.2. Applications dans les catalyseurs	23
3.1.3. Autres usages du rhénium	25
3.1.4. Usages des composés du rhénium	28
3.2. Perspectives d'évolution des usages à L'horizon 2015	29
3.2.1. Les superalliages	29
3.2.2. Les catalyseurs	30
3.3. SUBSTITUTION ET RECYCLAGE	31
3.3.1. Traitement des catalyseurs et des ferrailles d'alliages	31
3.3.2. Traitement de poussières ou de scories	32
3.3.3. Substitution	33
3.4. LES PRIX ET LES MARCHÉS DU RHÉNIUM : ÉVOLUTION ET SPÉCIFICITÉS	33
3.4.1. Évolution récente des prix du rhénium	34
3.4.2. Perspectives d'évolution du prix du rhénium à l'horizon 2015	36
4. La filière industrielle	39
4.1. LES RESSOURCES ET RÉSERVES EN RHÉNIUM	39
4.1.1. Abondance du rhénium dans l'écorce terrestre	39
4.1.2. La ressource	40
4.1.3. Gisements et potentiel en France	44
4.1.4. Commentaire sur les ressources et réserves en rhénium	46

4.2. PRODUCTION	48
4.2.1. Productions historiques et actuelles	48
4.2.2. Facteurs sous-tendant l'évolution de la production au cours des prochaines années.....	54
5. La filière industrielle et les principaux acteurs	59
5.1. DU MINERAI AU MÉTAL : ÉTAPES DE LA TRANSFORMATION	59
5.1.1. Le traitement des minerais de rhénium	60
5.1.2. Purification et extraction du rhénium	62
5.1.3. Pollution et environnement.....	63
5.1.4. Les acteurs de la filière	63
5.2. DU MÉTAL AU PRODUIT FINI : ÉTAPES AVAL DE LA FILIÈRE	65
5.2.1. Les acteurs français	66
5.2.2. Autres acteurs européens	67
5.2.3. Les principaux acteurs dans le reste du monde.....	69
6. Conclusions.....	71
6.1. SYNTHÈSE DES CRITICITÉS.....	71
6.2. STRATÉGIES D'ACTION.....	73
6.2.1. Sécurisation des approvisionnements.....	73
6.2.2. Développement d'une veille technologique	73
6.2.3. Développement du recyclage.....	74
6.2.4. Développer la connaissance du potentiel minéral français et européen.....	74
Bibliographie.....	75

Liste des figures

Figure 1 :	Position du rhénium (Re) dans le tableau périodique des éléments.....	17
Figure 2 :	Répartition de la consommation mondiale en rhénium en 2009 par produits finaux (d'après Roskill, 2010 [2]).	19
Figure 3 :	Évolution de la consommation mondiale en rhénium entre 2000 et 2009 par produits finaux (Roskill, 2010 [2]).	20
Figure 4 :	Distribution de la capacité mondiale de réformage catalytique en 2009 (Roskill, 2010, d'après Oil and Gas Journal).	24

Figure 5 :	Comparaison des prix entre le rhénium et le ruthénium sur les dix dernières années.	25
Figure 6 :	Chambre à propulsion à iridium-rhénium brevetée par Ultramet [6].....	28
Figure 7 :	Estimation du nombre de moteurs délivrés par Rolls Royce sur les périodes 2009-2018 et 2019-2028 (Rolls Royce plc., 2009 [16]).	29
Figure 8 :	Produits et modes de conditionnement du rhénium (© Ultra Minor Metals Ltd, www.rheniumet.com [7]).	34
Figure 9 :	Comparaison des prix spots des 3 produits de base du rhénium (les 2 qualités d'APR et les pellets de rhénium métal) depuis juillet 2004 sur le marché européen.	35
Figure 10 :	Évolution de la production et de la consommation globale parallèlement au prix spot du rhénium métal (pellets) entre 2000 et 2010 (adapté d'après Roskill, 2010 [2]).	36
Figure 11 :	Échantillon de rhéniite du volcan Judriavy (Iles Kouriles, Russie).	41
Figure 12 :	Distribution mondiale des prospectes, gîtes et gisements abritant du rhénium classés par typologie (Deschamps, 2003 [28]).	43
Figure 13 :	Inventaire des principaux indices à molybdénite identifiés en France métropolitaine et en Guyane (BRGM, 2010).	45
Figure 14 :	Répartition de la production mondiale totale (primaire + secondaire) de rhénium en 2009 (50,06 t) (adapté d'après Roskill, 2010 [2]).....	48
Figure 15 :	Évolution des productions primaires et secondaires de rhénium entre 2000 et 2009.	50
Figure 16 :	Évolution historique et projection de la part de rhénium recyclé dans la production globale (BRGM, 2011).	51
Figure 17 :	Localisation mondiale des projets miniers à statut reconnu comme sources actuelles de rhénium (BRGM, 2011).	52
Figure 18 :	Principaux acteurs intervenant dans le cycle de vie du rhénium (Monier et al. (ADEME), 2010 [19]).....	59
Figure 19 :	Flow sheet de traitement des concentrés de molybdénite pour la production d'APR (procédé Pechiney).....	61
Figure 20 :	Flow sheet de la transformation de l'APR en rhénium métal.....	62
Figure 21 :	Estimations des capacités de production de rhénium par compagnie en 2009 (Roskill, 2010 [2]).	64
Figure 22 :	Source et tonnage des imports de concentrés de molybdène de Molymet entre 2006 et 2009 (Roskill, 2010 [2]).....	65
Figure 23 :	Synthèse de la criticité du rhénium.	72

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Compositions typiques de plusieurs références de superalliages monocristallins au nickel (en % pondéral) (d'après Roskill, 2010 [2]).	21
Tableau 2 :	Applications de fils et filaments à rhénium ou à alliages W-Re ou Mo-Re dans l'industrie (adapté d'après Roskill, 2010 [2]).	27
Tableau 3 :	Principales applications des composés du rhénium (adapté d'après Roskill, 2010).	28
Tableau 4 :	Prévision de l'évolution de la consommation du rhénium dans les superalliages et les catalyseurs à l'horizon 2015 selon trois scénarios (source : Roskill, 2010 [2]).	31
Tableau 5 :	Composition en rhénium de quelques minéraux et minerais non cuprifères (Sutulov, 1976 [10]).	40
Tableau 6 :	Typologie géologique des principaux gisements de rhénium (Deschamps, 2003).	42
Tableau 7 :	Estimation des ressources et réserves minières en rhénium (USGS, 2010).	47
Tableau 8 :	Productions primaire et secondaire (kg) de rhénium sur la période 2000-2009 (Roskill, 2010 [2]).	49
Tableau 9 :	Inventaire des réserves de minerai à rhénium dans le monde (BRGM, 2011).	54
Tableau 10 :	Compilation mondiale des principales capacités métallurgiques de production en rhénium en 2009 (source : Roskill, 2010 [2]).	55
Tableau 11 :	Liste probable des prochains projets miniers producteurs de rhénium d'ici 5 ans (source : Roskill, 2010 [2]).	56
Tableau 12 :	Capacités supplémentaires de production primaire de rhénium à venir d'ici 2014.	56
Tableau 13 :	Répartition des capacités de production de rhénium secondaire en 2009 (Roskill, 2010 [2]).	57
Tableau 14 :	Principaux producteurs de rhénium primaires et nature de leur matière première (Roskill, 2010 [2]).	64
Tableau 15 :	Composantes de la criticité du rhénium.	71

1. Introduction

1.1. TERMINOLOGIE UTILISÉE

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.

1.2. 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 français utilisant la/les matières premières minérales étudiées. Les facteurs sont déterminés et notés selon la grille suivante :

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

- **Gisement** : concentration naturelle de minéraux économiquement exploitable.
- **Indice ou prospect** : il s'agit d'une minéralisation dont l'existence est connue grâce à des observations de terrain, éventuellement étayées par quelques sondages et petits travaux miniers (tranchées, galeries de reconnaissance...) et/ou par des observations indirectes (géochimie, géophysique) mais dont l'intérêt économique n'est pas encore démontré

- **Minéral/minéraux** : désigne une substance inorganique, d'origine naturelle, caractérisée par sa formule chimique et par l'arrangement de ses atomes selon une structure géométrique particulière.
- **Minerai** : désigne une roche contenant une concentration d'un ou plusieurs minéraux en quantité suffisante pour être valorisé économiquement.
- **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 valorisable 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.
- **Primaire** : ce qualificatif, appliqué à un métal, ou à une production de métal, indique du métal produit à partir d'un minerai, en dehors de tout recyclage.
- **Réserves** : il s'agit de la partie de la ressource dont l'exploitabilité technologique et économique a été démontrée lors d'une étude de faisabilité.
- **Ressource** : il s'agit d'une minéralisation dont l'enveloppe et le volume ont fait l'objet d'une première estimation, encore imprécise, à l'aide de sondages, de petits travaux miniers, de prospection en surface et/ou d'observations indirectes géochimie, géophysique.
- **Secondaire** : ce qualificatif, appliqué à un métal, ou à une production de métal, indique du métal produit à partir du recyclage de déchets, qui peuvent être « primaires » ou « neufs » lorsqu'il s'agit de déchets survenus dans la production de métal primaire, tels que des copeaux, des poussières, des coulures, des bavures. Ils sont dits secondaires lorsqu'ils sont recyclés à partir des métaux ou alliages mis en œuvre dans leurs diverses applications.

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

1.3. 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 d'une filière économiquement et technologiquement très sensible, la rareté de la documentation ainsi que le temps limité disponible pour réaliser cette étude en conditionnent le contenu.

Malgré l'utilisation des meilleures sources ouvertes disponibles et le soin apporté à la rédaction de cette étude par ses experts, le BRGM n'est pas en mesure de garantir l'exactitude des informations et des données citées dans cette étude. L'industrie du rhénium est peu transparente et les données ouvertes peuvent être incomplètes et/ou sujettes à erreurs.

À noter que le rhénium 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. Il ne fait cependant pas partie des 14 matières premières minérales retenues comme les plus stratégiques dans cette étude.

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

- le rapport sur les matières premières stratégiques de la Commission Européenne ;
- les bases de données et rapports publics de l'United States Geological Survey ;
- les bases de données commerciales produites par le Raw Materials Group et le Metals Economics Group ;
- l'étude spécialisée sur le rhénium produite par Roskill en 2010 ;

ainsi que nombre d'informations ouvertes rassemblées ou consultées dans le cadre de cette étude.

2. Le rhénium

Le rhénium est un métal de transition qui fut isolé pour la première fois en 1925 par les chimistes allemands Walter Noddack, Ida Tacke et Otto Berg. Dernier élément naturel stable découvert, son nom lui fut donné en référence au fleuve Rhin. Bien qu'assez largement distribué, il reste un des éléments les plus rares de l'écorce terrestre où sa teneur moyenne ne dépasse pas 7 ppb (entre 0,7 et 7 ppb selon les auteurs), n'apparaissant ainsi qu'au 77^{ème} rang par ordre de fréquence. Son principal minerai est le disulfure de molybdène ou molybdénite (MoS_2), minéral dans lequel sa concentration peut être multipliée par un facteur 10^5 pour atteindre 250 à 700 ppm. Cette affinité pour le molybdène, autre métal de transition, peut s'expliquer par leur rayon atomique voisin ainsi que leur affinité commune pour le soufre.

Dans le tableau de Mendeleïev (Figure 1), il occupe le numéro atomique 75.

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

Figure 1 : Position du rhénium (Re) dans le tableau périodique des éléments.

2.1. PRINCIPALES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Le rhénium est un métal blanc argenté qui ternit à l'air humide. Il se caractérise par son fort caractère réfractaire, sa résistance à la corrosion ainsi que sa ductilité. Il est plus dense que l'or et que le tungstène, n'étant dépassé en densité que par le platine, l'iridium et l'osmium, tous métaux du groupe du platine.

Il n'est attaqué ni par l'acide chlorhydrique, ni par l'acide sulfurique mais se dissout dans l'acide nitrique. Cette dernière caractéristique est largement utilisée dans les méthodes de traitements chimiques qui permettent sa récupération industrielle.

- numéro atomique : 75 ;
- densité 20,8 ;
- dureté (échelle de Mohs) : 7 (comme le quartz) ;
- dureté Brinell : 1 320 Mpa ;
- point de fusion : 3 185 °C ;
- point d'ébullition : 5 596 °C ;
- abondance dans la croûte terrestre : 0,7 à 7 ppb.

Le rhénium est un métal particulier du fait tout d'abord de sa rareté, de sa découverte tardive mais également compte tenu de la nature de ses approvisionnements primaires. En effet, il est principalement produit en tant que sous-produit du traitement du molybdène (voir rapport BRGM/RP-60204-FR), lui-même sous-produit dans 47 % des cas de l'exploitation minière du cuivre.

Ce n'est qu'à partir des années 1950 que les premiers superalliages tungstène-rhénium et molybdène-rhénium furent développés. À partir des années 1960, il fut utilisé en association avec le platine pour le reformage catalytique du naphta afin de produire du diesel.

Il ne fut jamais réellement jugé stratégique puisque même au cours de la période de la guerre froide, la D.L.A.¹ américaine n'a jamais constitué de stocks de rhénium.

¹ Defense Logistics Agency Strategic Materials qui, depuis 2010, a remplacé le Defense National Stockpile Center (DNSC). Jusqu'en 1992, les stocks concernaient 80 substances. Après les ventes massives suite à la fin de la guerre froide, seules 28 « commodités » sont encore stockées.

3. Les usages

3.1. USAGES ET CONSOMMATION

La consommation globale de rhénium en 2009 était estimée à **53,5 t**. Près de 80 % de cette consommation a été dédiée à la fabrication de superalliages de hautes performances. En seconde position, les différents secteurs de la catalyse industrielle (pétrochimie, chimie) n'ont représenté que 14 % de la consommation mondiale de rhénium. Enfin, un ensemble d'applications de niches réparties dans les secteurs de l'aérospatial, des alliages en poudres, de la pétrochimie et du matériel médical ont représenté 8 % de la demande (Figure 2).

Depuis le début des années 2000, l'augmentation de la consommation mondiale du rhénium est tirée par la croissance du secteur aéronautique. Celle-ci a cependant subi deux coups de freins spectaculaires, l'un à la fin 2001 suite aux attentats du 11 septembre 2001, et l'autre à partir de la fin 2007 sous l'effet de la dernière crise financière et économique mondiale (Fig.3).

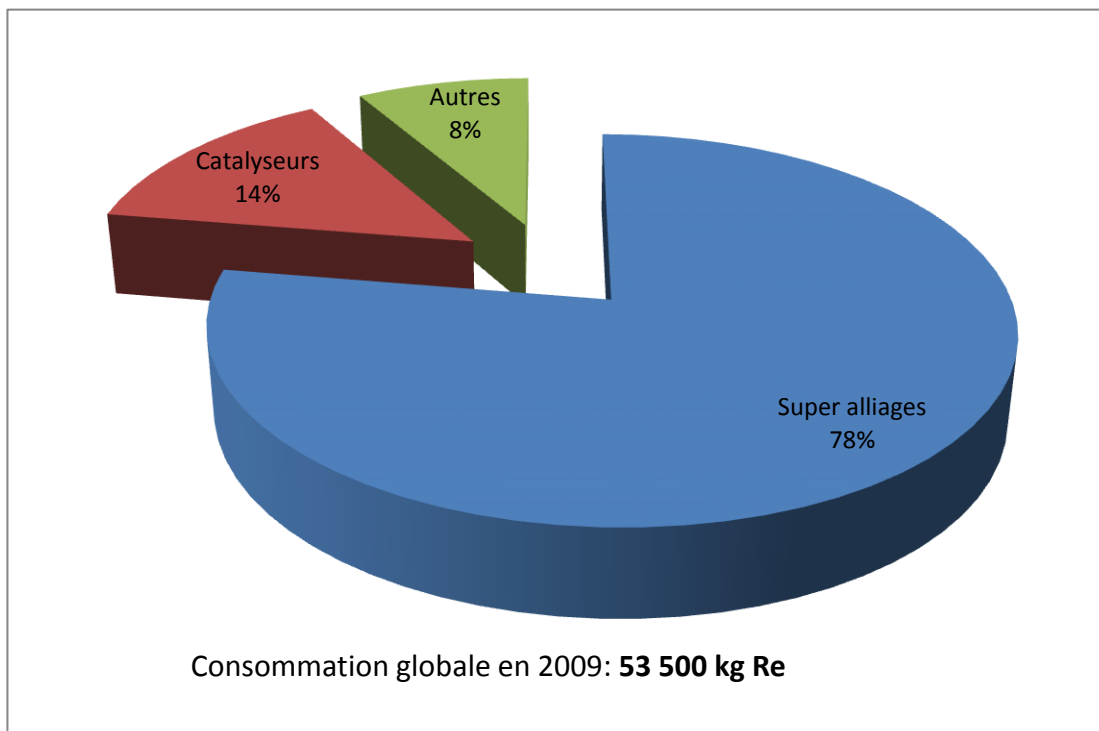


Figure 2 : Répartition de la consommation mondiale en rhénium en 2009 par produits finaux (d'après Roskill, 2010 [2]).

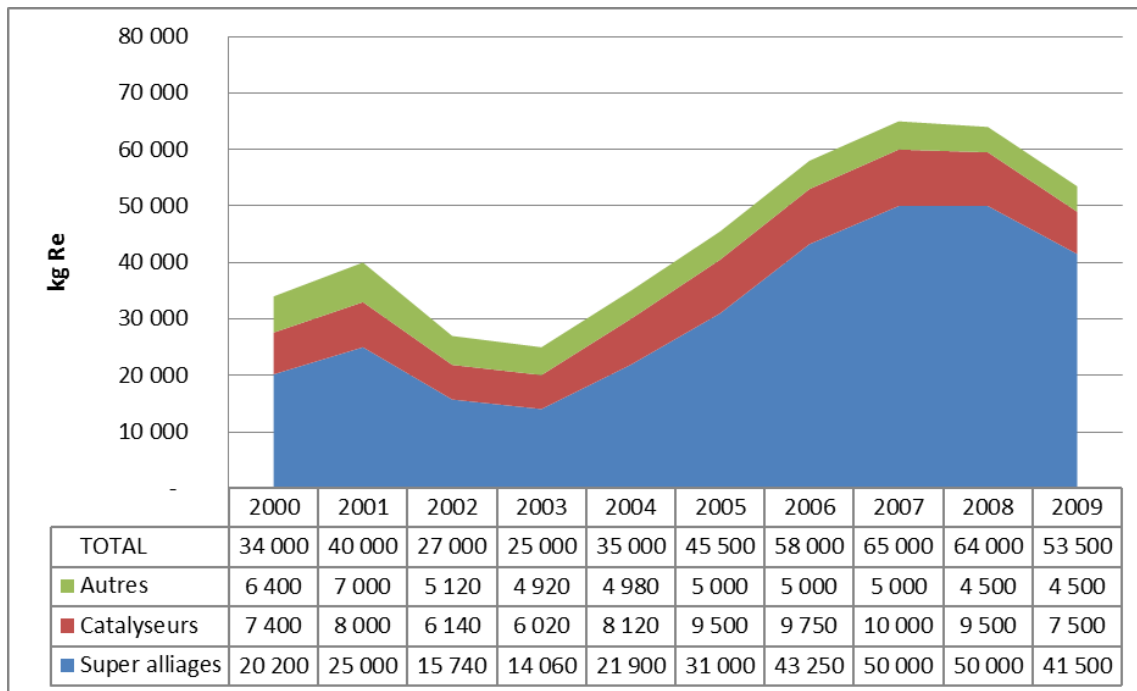


Figure 3 : Évolution de la consommation mondiale en rhénium entre 2000 et 2009 par produits finaux (Roskill, 2010 [2]).

3.1.1. Alliages hautes performances/superalliages

Les alliages de hautes performances (HPA) sont des alliages contenant principalement du fer, du nickel et du cobalt qui ont des propriétés exceptionnelles de résistance à la chaleur, à l'usure et à la corrosion. Dans cette famille, on reconnaît les super alliages dont le domaine d'application est celui des températures supérieures à 800 °C.

En 2009, 80 % de la demande mondiale de rhénium (soit environ 44 t) a été faite par le secteur métallurgique des superalliages. Les États-Unis sont les principaux fabricants de superalliages, essentiellement pour leur importante filière aéronautique. Dans ce seul pays, la baisse de la consommation en rhénium a atteint 18,5 t (soit - 56 % à partir du niveau de 33 t consommées en 2008) par suite des effets de la crise financière mondiale sur l'industrie aéronautique.

C'est uniquement dans les alliages à base de **nickel** qu'est utilisé le rhénium comme constituant de la matrice des alliages. Il confère notamment à ces derniers un meilleur comportement au risque de fluage (« creeping ») lors d'une utilisation de ces matériaux dans des conditions de températures élevées.

Les principaux utilisateurs finaux des superalliages au nickel contenant du rhénium sont **Cannon-Muskegon**, **GE** (General Electric), **Pratt & Whitney** et **Rolls Royce** [2].

Utilisation du rhénium dans les superalliages à base de nickel

L'utilisation du rhénium dans les superalliages au nickel a commencé au début des années 1990. Deux domaines principaux d'applications industrielles ont porté le développement de cette utilisation : celui des **turbines des moteurs d'avions** et celui des **turbines de génératrices électriques terrestres**. Au moins 60 % de cette utilisation correspond au secteur aéronautique.

Les développements technologiques autour des superalliages contenant du rhénium ont été très nombreux, portant à la fois sur la qualité de la matrice et sur les propriétés de surface.

Pour l'amélioration des propriétés matricielles, l'utilisation de monocristaux d'alliages a été développée et continue à se développer. Plusieurs générations de superalliages ont ainsi vu le jour. Les alliages de seconde génération contiennent ainsi 3 % de rhénium qui améliore leur résistance thermique ainsi que des traces d'yttrium et de lanthane qui améliorent les propriétés de surface. Les alliages de troisième génération sont maintenant développés avec des contenus en rhénium qui atteignent 5 à 6 % (Tableau 1).

Alliage	Elements										
	Cr	Co	Mo	Re	W	Al	Ti	Ta	Nb	Hf	Autres
CMSX4 ¹	5.7	11.0	0.42	3.0	5.2	5.2	0.74	5.6	-	0.1	-
CMSX10 ¹	2.0	3.0	0.4	6.0	5.0	5.7	0.2	8.0	0.1	0.03	-
René N5	7.0	8.0	2.0	3.0	5.0	6.2	-	7.0	-	0.2	-
René N6	4.2	12.5	1.4	5.0	6.0	5.75	-	7.2	-	0.15	-
RR3000	2.3	3.3	0.4	6.3	5.5	5.8	0.2	8.4	-	0.03	-
UCSX1	2.3	6.0	1.5	6.3	7.0	5.8	0.2	8.4	-	0.03	2.0Ru
UCSX8	2.3	6.0	3.0	6.3	6.0	5.8	0.2	8.4	-	0.03	6.0Ru
TMS75	3.0	12.0	2.0	5.0	6.0	-	-	6.0	-	0.1	-
TMS138	3.0	12.0	3.0	5.0	6.0	-	-	6.0	-	0.1	2.0Ru
TMS162	2.9	5.8	3.9	4.9	5.8	5.8	-	5.6	-	0.1	6.0Ru

Source : "Nickel Based Superalloys" H.K.D.H. Bhadeshia, Cambridge University

Note : 1) Alliage déposé par Cannon-Muskegon Corporation

Tableau 1 : Compositions typiques de plusieurs références de superalliages monocristallins au nickel (en % pondéral) (d'après Roskill, 2010 [2]).

Au niveau des recherches, General Electric essaie de mettre au point des superalliages contenant moins de rhénium, suite à la forte hausse des prix des matières premières début 2008. De même, la Snecma, filiale du groupe Safran, a par le passé connu des problèmes d'approvisionnement en rhénium et en ruthénium, ce qui pousse cette société à privilégier dorénavant un alliage dépourvu de rhénium. À partir des alliages de troisième génération, des recherches explorent la possibilité d'amélioration des performances à la corrosion par l'addition de métaux du groupe du platine ainsi que d'iridium pour stabiliser la microstructure des alliages.

Pour ces domaines d'applications, le rhénium reste peu substituable dans l'élaboration des superalliages.

Marché des superalliages

Le développement de l'**industrie aéronautique** européenne a beaucoup réduit la domination américaine sur le marché des super alliages, ceux-ci ne représentant ainsi à l'heure actuelle pas plus de 60 % du marché. Cependant, les super alliages contenant du rhénium ne sont utilisés que pour la fabrication des pièces entrant dans la partie chaude des turbines/réacteurs, à l'opposé des superalliages utilisés dans la structure des avions². Les **turbines fixes terrestres** constituent un marché réduit complémentaire.

Pour l'avenir, la demande pour des alliages de hautes performances est croissante dans les secteurs des turbines terrestres, de l'énergie nucléaire, de l'énergie solaire, des centrales thermiques à charbon de dernière génération, de l'industrie chimique, gazière et pétrolière. Il est toutefois prématuré d'affirmer que ces différents secteurs devront avoir recours aux superalliages contenant du rhénium.

Applications aérospatiales

L'aviation militaire, bien que ne représentant que 12 % du marché global de l'aéronautique, utilise des motorisations plus chaudes que le secteur civil. L'utilisation de superalliages contenant du rhénium est donc plus importante dans le domaine de la Défense.

Boeing et Airbus, bien qu'étant des consommateurs importants, emploient surtout les superalliages pour la construction de la structure des avions, alliages qui sont dépourvus de rhénium. Pour le secteur aéronautique, les principaux consommateurs de super alliages à rhénium sont les **motoristes**. En 2009, CFM International (joint-venture entre GE et la Snecma) a représenté 23 % de la consommation globale de super alliages, Rolls Royce 14 %, Pratt & Whitney 11 % et IAE (joint-venture entre Rolls Royce, Pratt & Whitney, Aero Engines et MTU) 7 %.

Autres applications des superalliages

Les super alliages à nickel et rhénium s'étendent difficilement aux secteurs autres que l'aérospatial. Ainsi, sur la consommation en alliages de hautes technologies des États-Unis, seuls 20 % sont dédiés à ces autres secteurs industriels en raison de leur coût important. Ils trouvent alors des applications dans des installations mettant en jeu de fortes températures telles que les turbines à gaz industrielles (production d'électricité), les industries du pétrole et du gaz, les échangeurs thermiques et récupérateurs de chaleur. La bonne résistance à la corrosion des alliages apportée par la présence de

² Sur les 38 300 t de super alliages consommés par l'industrie aéronautique mondiale en 2009, 85 % correspondait à des superalliages pour la motorisation et 15 % pour les structures des avions.

rhénium est également mise à profit dans les installations chimiques et pétrochimiques comportant des produits corrosifs.

3.1.2. Applications dans les catalyseurs

Le secteur de la catalyse industrielle est le second domaine d'application du rhénium (14 % de la consommation globale en 2009). Il est alors utilisé associé avec du platine pour le réformage³ du pétrole brut ou du naphta qui aboutit à fabrication de différents dérivés pétroliers : essence et gas-oil, essence à haut niveau d'octane (85-105), dérivés aromatiques, BTX (benzène, toluène, xylène), hydrogène.

Catalyseurs à platine et rhénium et raffinage du pétrole

Les catalyseurs bimétalliques à platine et rhénium sont largement utilisés dans l'industrie pétrochimique, notamment pour le réformage du pétrole. Les avantages apportés par le couplage du rhénium au platine, par rapport à l'utilisation du platine seul, sont nombreux. Dans ce cas, le catalyseur peut-être complètement régénéré pour de nouveaux cycles d'utilisation, les performances et la stabilité du processus de réformage sont améliorées, ce qui permet d'augmenter de 30 % la cadence du raffinage dans les unités de production. Enfin, la présence du rhénium permet d'élargir la fenêtre des températures dans laquelle le réformage peut être réalisé de manière performante.

Avec un taux de croissance annuel moyen de 0,4 %, les capacités de raffinage pétrolier ont peu changé depuis 2002 ; elles ont atteint 11,5 millions de barils/jour (Mbb/j) en 2009. Ce segment est donc stabilisé avec une consommation de rhénium correspondant qui est localisée dans les régions de raffinage pétrolier important (Amérique du Nord : 4,23 Mbb/j, Europe de l'Ouest : 2,19 Mbb/j, Asie : 2,15 Mbb/j, Europe de l'Est : 1,47 Mbb/j). La France détient 3 % de la capacité mondiale de réformage catalytique (Figure 4).

Le marché de la production de catalyseurs à rhénium utilisés dans le raffinage pétrolier est entre les mains de sept sociétés : **Axens** (filiale du groupe français IFP Energies Nouvelles), BASF Catalysts, Criterion Catalyst, Exxon Mobil, Indian Petrochemicals, Sinopec (Chine) et UOP (États-Unis).

³ Le **réformage catalytique** est une méthode de raffinage pour convertir les molécules naphthéniques en molécules aromatiques ayant un indice d'octane élevé servant de base dans la fabrication des carburants automobiles.

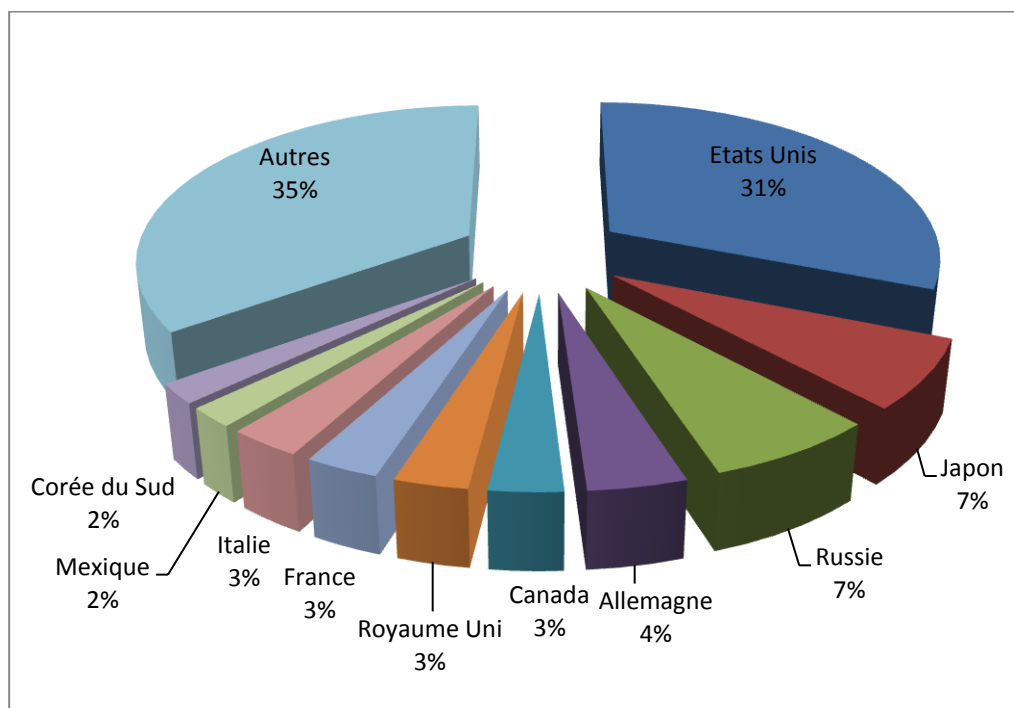


Figure 4 : Distribution de la capacité mondiale de réformage catalytique en 2009 (Roskill, 2010, d'après Oil and Gas Journal).

Catalyseurs pour la production de BTX (benzène, toluène, xylène)

Les composés BTX (Benzène, Toluène, Xylène) trouvent de larges applications dans l'industrie pétrochimique, notamment dans la fabrication de résines (résines ABS et SBR) et de fibres telles que le nylon, le lycra et les polyesters (Othmer, 1978 [3]).

Lors de l'élaboration de ces composés, la nécessité de travailler à basse pression favorise la cokéfaction. Les catalyseurs à platine et rhénium, plus résistants à ce phénomène et entièrement régénérables, sont alors privilégiés.

Catalyseurs pour la technologie « gas-to-liquid » (GTL)

Le procédé GTL (« Gas-to-liquid ») consiste à tirer parti des larges réserves en gaz naturel disponibles afin de produire du gasoil et du kérosène plus propres (le gaz naturel étant moins riche en impuretés que le pétrole brut), du naphta et des produits hydrocarbonés tels que des plastiques. Cette technologie est actuellement en plein essor et concurrence les méthodes traditionnelles de liquéfaction du gaz naturel (LNG pour *Liquidified Natural Gas*). Si le procédé GTL est actuellement plus coûteux, il permet d'obtenir des produits de qualité supérieure.

Plusieurs installations industrielles utilisent déjà le procédé GTL. C'est notamment le cas de Mossel Bay en Afrique du Sud dans laquelle **PetroSA/Statoil** produit 30 000 barils/jour ainsi que celle de Bintulu en Malaisie qui fournit 40 000 barils/jour à la compagnie **Shell**. Plusieurs projets sont en développement, comme au Qatar où

l'ouverture de l'installation Pearl (Shell) qui produirait 140 000 barils/jour est prévue pour 2011.

Dans le procédé GTL, le gaz naturel passe au travers d'un catalyseur à cobalt qui nécessite un promoteur à hauteur de 0.5%, que ce soit du rhénium ou du ruthénium. À l'heure actuelle, 100 000 barils sont produits par jour via ce procédé. 2 500 t de catalyseur sont ainsi mis en jeu, ce qui représente environ 500 t de cobalt et **12 500 kg** de promoteur, rhénium ou ruthénium. Comme le présente le diagramme ci-dessous (Figure 5), le prix inférieur du kilogramme de rhénium privilégierait l'usage de celui-ci en se basant sur de simples critères du prix de la matière première.

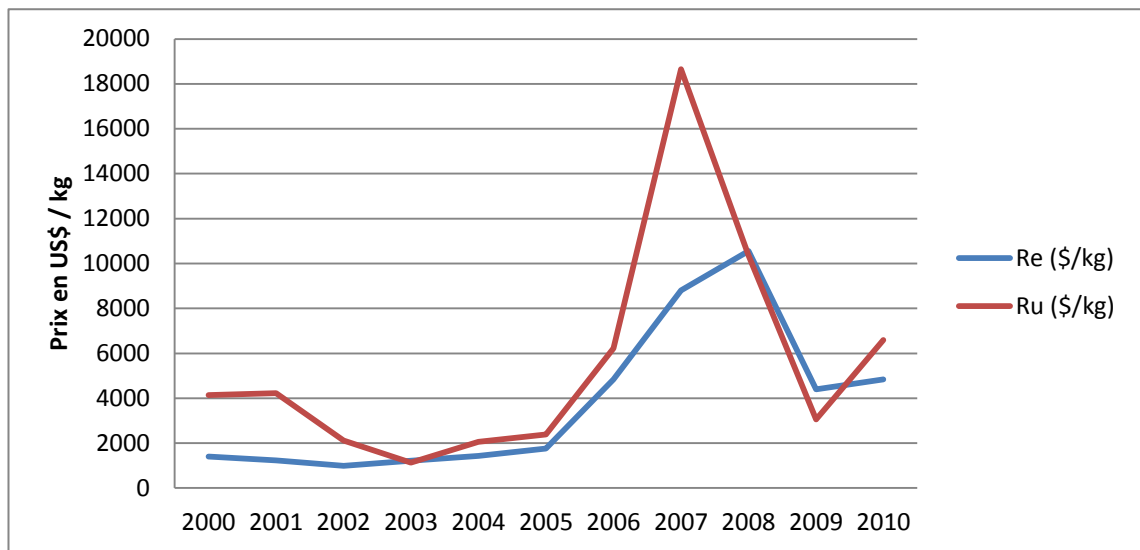


Figure 5 : Comparaison des prix entre le rhénium et le ruthénium sur les dix dernières années. Mise en évidence de la compétition entre ces deux métaux dans le choix du promoteur des catalyseurs de GTL (MetalPrice [4] et Johnson Matthey NY [5]).

Cependant, il semble peu probable que suffisamment de rhénium soit disponible sur le marché pour satisfaire les besoins grandissants de cette industrie. En envisageant, en effet, une croissance de la capacité de production de la filière GTL à 240 000 barils/jours d'ici 2015 (contre 100 000 barils/jour à l'heure actuelle), les besoins en rhénium (ou ruthénium) pourraient plus que doubler (**25 t**). C'est la raison pour laquelle les sociétés qui développent des projets GTL recherchent des alternatives, comme des catalyseurs à molybdène. Toutefois, la voie des catalyseurs dans le procédé GTL présente un marché potentiellement très vaste et doit être prise en considération.

3.1.3. Autres usages du rhénium

Le rhénium trouve également des applications plus marginales dans lesquelles il est utilisé, la plupart du temps, comme alliage avec du molybdène ou du tungstène. L'ajout de rhénium à ces alliages leur confère en effet une plus grande ductilité, ce qui permet de les fabriquer à des températures inférieures mais également d'abaisser leur point de transition ductile-fragile. Il est ainsi introduit à hauteur de 50 % en poids à des alliages à molybdène et de 24 % lorsqu'il accompagne le tungstène.

Le Tableau 2 présente les principales applications des alliages à Mo-Re et W-Re dont le principal fabricant à l'échelle mondiale est **Rhenium Alloys** (États-Unis).

Depuis la fin des années 1970, la compagnie américaine **Ultramet** met au point des chambres de combustion de fusée à base de rhénium et d'iridium. Elles sont principalement utilisées pour mettre en orbite des satellites géostationnaires. Elles présentent l'avantage de pouvoir fonctionner au-delà de 2 200 °C et d'améliorer les performances de 10 à 20 secondes par rapport aux chambres traditionnelles [6].

Nature du filament	Domaine d'application	Propriétés offertes par l'ajout de rhénium	Perspectives pour l'évolution de la filière
W - Re (5 %) - Th (2,2 %)	Filament des lampes à incandescence	Forte résistivité électrique du rhénium : Filaments de plus gros diamètre, plus résistants et à plus longue durée de vie ; Plus grande ductilité : Meilleure résistance aux chocs thermiques et mécaniques.	Concurrence du secteur des LED (Light Emitting Diodes) et des ampoules basse-consommation.
W - Re (<5 %)	Manomètres à ionisation, vacuomètres, valves thermo-ioniques	-	-
W - Mo - Re (25 %)	Tubes à électrons	Plus grande ductilité : Filaments plus résistants ; Re utilisé en revêtement des filaments : Résistance à l'attaque de la vapeur d'eau ; Opère à des températures plus élevées.	-
Re	Spectroscopie de masse	Plus grande ductilité ; Re ne réagit pas avec le carbone (pas de formation de carbure comme avec le W) ; L'oxyde de Re est très conducteur : Pas d'augmentation de la résistance du filament en cas de formation d'un film d'oxydes (et donc pas de surchauffe).	Dans de nombreux domaines, la spectroscopie de masse a été remplacée par la chromatographie en phase gazeuse.
W - Re (3 %)	Éléments de chauffage, pompes à vide	Forte résistance à l'attaque de métaux en fusion ; Re est/sera utilisé comme élément de chauffage menant à l'évaporation de métaux.	-
W - Re (10 %)	Anodes de tubes à rayons X et cibles	Meilleure résistance au bombardement électronique que du W pur ; Réduction de l'usure ; Un revêtement en Re sur les cibles empêche les recristallisations (qui peuvent se produire avec un	Méthode de plus en plus utilisée par GE Medical Systems (États-Unis), qui consommerait 2 000 kg/an de Re

Nature du filament	Domaine d'application	Propriétés offertes par l'ajout de rhénium	Perspectives pour l'évolution de la filière
		revêtement en W et Co) ; Possibilité de déposer le revêtement en Re par vaporisation à partir d'un plasma ;	à cet usage.
W - Re Couple, avec un fil à 3-5 % Re et l'autre à 25-26 % Re	Thermocouples	Permet le contrôle et la mesure de températures élevées (jusqu'à 2 500 °C, et 2 800 °C pour de courtes périodes) ; Des thermocouples à Mo-Re peuvent également être utilisés pour mesurer des températures plus basses dans des atmosphères à hydrogène dans lesquelles l'usage de thermocouples à métaux précieux est impossible.	Ces thermocouples sont de plus en plus répandus, mais doivent faire face à la concurrence des semi-conducteurs et des appareillages à détection électronique.
Re seul et alliages à Re (Re-Ag...)	Contacteurs électriques (allumeur de moteurs, relais téléphoniques...)	Résistance à l'usure et à l'érosion due aux phénomènes d'arcs ; Forte résistance aux transferts de matière dans des circuits électriques ; Résiste à l'attaque de l'eau salée.	Filière en croissance : le Re seul ou en alliage offre de meilleurs contacts que des associations Pt-Pd ou Ag-CdO.

Tableau 2 : Applications de fils et filaments à rhénium ou à alliages W-Re ou Mo-Re dans l'industrie (adapté d'après Roskill, 2010 [2]).

La consommation de rhénium pour ces différents produits s'élevait à 4 t en 2009. Cependant, ces domaines d'applications très spécialisés restent des secteurs de niches, ce qui rend la prévision de la demande future dans ces industries délicate. Roskill [2] envisage une augmentation de la consommation de rhénium de l'ordre de 7 % par an à l'horizon 2015, pour atteindre un besoin de 7 t en 2015. Le coût à l'heure actuelle attractif de ce métal pourrait en effet encourager son utilisation dans des technologies émergentes.

À noter que les isotopes radioactifs ^{188}Re et ^{186}Re sont utilisés dans le traitement du cancer du foie (Dilworth *et al.*, 1998 [9]). Ils ont tous deux une profondeur de pénétration similaire dans le tissu (5 mm pour ^{186}Re contre 11 mm pour ^{188}Re), mais ^{186}Re présente l'avantage d'avoir une plus grande durée de vie (90 heures contre 17 pour l'isotope 188). Ces isotopes sont produits artificiellement et en infimes quantités pour des applications thérapeutiques, indépendamment la filière industrielle du rhénium.

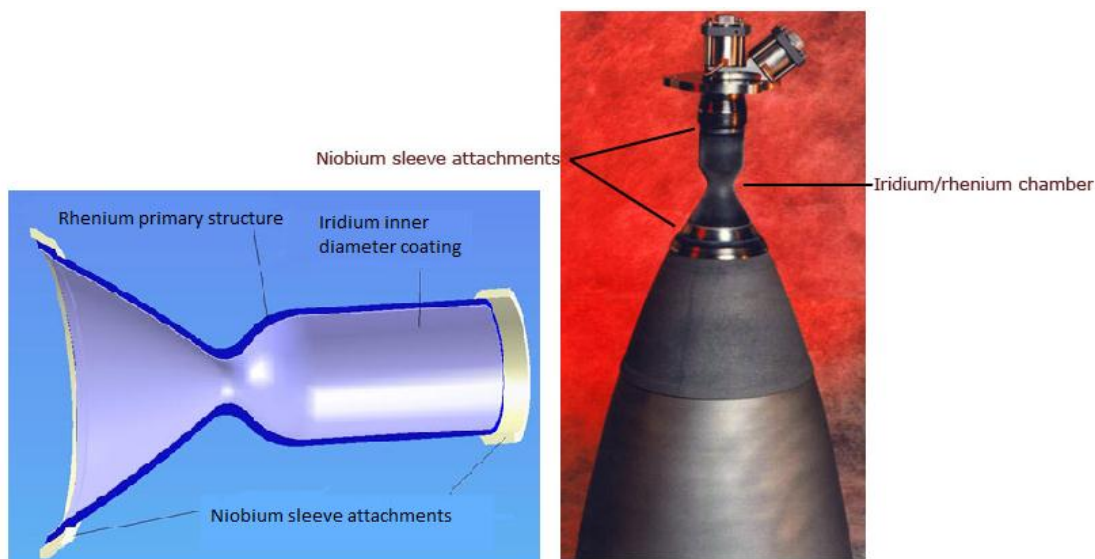


Figure 6 : Chambre à propulsion à iridium-rhénium brevetée par Ultramet [6]
(© www.ultramet.com).

3.1.4. Usages des composés du rhénium

Il existe une large gamme de composés du rhénium qui trouvent des applications dans des domaines variés. Parmi ceux-ci, les deux principaux sont le **perrhénate d'ammonium** (ou APR, de formule NH_4ReO_4) et l'**acide perrhénique** (HReO_4) qui sont utilisés en tant que catalyseurs. L'APR, tout comme occasionnellement le perrhénate de potassium, est également utilisé pour produire du rhénium métal (cf. 5.1.2). Le tableau ci-après fournit une liste non exhaustive des applications des autres composés du rhénium (Tableau 3).

Composés du rhénium	Applications
Décacarbonyle de rhénium $\text{Re}_2(\text{CO})_{10}$	Recherches en cours pour son utilisation dans la production de métal de haute pureté Vapeurs utilisées pour le dépôt de revêtements de rhénium (minoritaire).
Trichlorure de rhénium ReCl_3	• Vapeurs utilisées pour le dépôt de revêtements de rhénium (majoritaire).
Hydrures de rhénium	• Puissants agents réducteurs utilisés dans l'industrie pharmaceutique
Sulfure de rhénium	Catalyseurs d'hydrogénation de composés organiques Catalyseurs de déshydrogénation d'alcools en cétones et aldéhydes
Oxydes de rhénium	• Catalyseurs de réactions d'oxydation (nitrates en nitrites, ...)
Hydrures de rhénium et composés alkyls	• Catalyseurs
Hexachlororhénite de potassium	• Empêche le développement de halos sur les pellicules
Disulfure et dioxyde de rhénium	• Activateurs de phosphores (tubes cathodiques) dans les écrans de télévision

Tableau 3 : Principales applications des composés du rhénium (adapté d'après Roskill, 2010).

3.2. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DES USAGES À L'HORIZON 2015

Les dix dernières années, la consommation mondiale de rhénium a augmenté de 6,8 % par an en moyenne, atteignant 20 % de croissance par an entre 2003 et 2008. C'est le développement de l'industrie aéronautique qui a été le principal moteur de cette croissance. Dans les prochaines années, ces tendances devraient se poursuivre.

3.2.1. Les superalliages

Les superalliages à base de nickel et rhénium constituent 80 % de la demande mondiale en rhénium. Ils sont principalement utilisés dans le secteur aéronautique qui représente à lui seul pas loin de 60 % de la demande globale. L'évolution de sa demande dans le futur est donc intimement liée au développement de ce secteur.

Rolls Royce, l'un des producteurs mondiaux majeurs de moteurs d'avions, a publié ses perspectives concernant l'évolution du marché à l'horizon 2028 (Rolls-Royce plc., 2009 [16]). Mis à part un ralentissement en 2009, conséquence de la crise mondiale et de la récession qu'elle a entraînée, le trafic aérien de passagers ainsi que la livraison de nouveaux moteurs devraient poursuivre leur croissance dans les prochaines années. Le graphique suivant (Figure 7) présente ces estimations pour 2028 en fonction de la catégorie de moteur concernée.

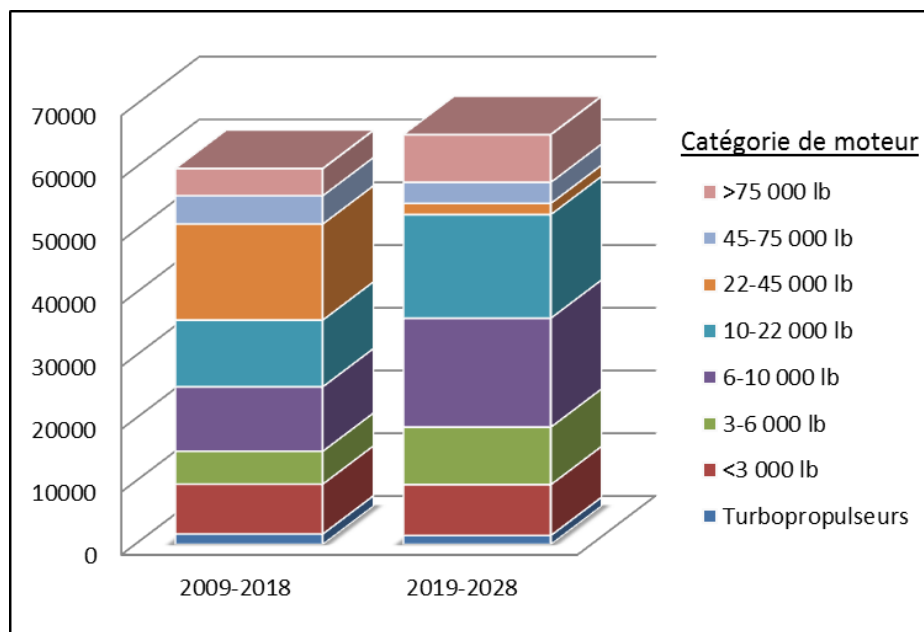


Figure 7 : Estimation du nombre de moteurs délivrés par Rolls Royce sur les périodes 2009-2018 et 2019-2028 (Rolls Royce plc., 2009 [16]).

L'industrie aéronautique est caractérisée par sa cyclicité, marquée par des périodes de forte croissance suivies de déclin. Un ralentissement de ce secteur a, de ce fait, été envisagé pour 2012-2013 par les économistes, avant de connaître un nouveau rebond.

Un autre marché prédominant pour les alliages de haute technologie contenant du rhénium est celui des **turbines de génératrices électriques terrestres**. Si, à l'heure actuelle, l'évolution de ce secteur a peu d'incidences sur la demande globale en rhénium car les superalliages à rhénium y restent minoritaires, cette tendance devrait changer dans les années futures. En effet, afin d'accroître leur rendement et de réduire leurs émissions, ces turbines fonctionnent dans des conditions de température de plus en plus élevées, ce qui devrait ainsi élargir la part de marché des superalliages à rhénium. De 46 500 génératrices électriques recensées dans le monde en 2009, ce nombre devrait atteindre les 57 000 en 2018, accroissant ainsi la demande en rhénium dans ce secteur (Aerostrategy Management Consulting, 2010 [17]).

En ce qui concerne les éventuelles substitutions du rhénium dans les superalliages, les avis des industriels sont partagés. Si Rolls Royce vient de signer un contrat de 5 ans avec KGHM Ecoren qui produit du rhénium métal en Pologne, General Electric cherche actuellement à développer des alliages contenant peu (1,5 % Re) ou pas de rhénium, et Snecma/Safran a déjà largement abandonné le rhénium dans ses superalliages. Leur stratégie actuelle concernant le rhénium est celle des trois 'R' : réduire, réutiliser et recycler. De nombreuses autres compagnies envisagent de développer le recyclage de leurs ferrailles afin de limiter leurs achats de rhénium primaire, comme H.C Starck, Johnson Matthey, Buss & Buss et Nordmet.

À partir de tous ces éléments, il apparaît difficile de prévoir l'évolution du marché des superalliages à rhénium. S'ils pourraient se démocratiser dans certains secteurs comme l'aéronautique, de nombreuses recherches sont menées afin de limiter leur usage, ou du moins, réduire leur contenu en rhénium. Trois scénarios sur la demande future en rhénium dans les superalliages ont été établis (Roskill, 2010 [2]) :

- **Faible croissance** : les superalliages de prochaine génération pourraient contenir moins de rhénium et le recyclage tendrait à se généraliser. De plus, l'industrie aéronautique pourrait connaître une période de ralentissement en fin de cycle plus importante que prévu. La consommation de rhénium dans les superalliages diminuerait alors jusqu'à 40 t en 2015 contre les 41,5 t de 2009.
- **Croissance moyenne** : le scénario moyen se base sur le développement du recyclage, une petite économie en rhénium dans les alliages de la prochaine génération ainsi qu'une croissance continue de 3,5 à 4% par an du nombre de nouveaux avions livrés. La croissance de la demande serait alors de 4,5 % entre 2009 et 2015.
- **Forte croissance** : ce scénario prend en compte un taux constant de recyclage des scraps et catalyseurs, la poursuite de l'usage de superalliages à proportion constante de rhénium ainsi que l'absence de déclin de l'industrie aéronautique.

3.2.2. Les catalyseurs

Les catalyseurs à rhénium et platine sont principalement utilisés dans l'industrie pétrochimique dans les procédés de raffinage pétrolier. Il est, de plus, utilisé dans les nouveaux procédés GTL (Gas to Liquid) dont les projets, à l'heure actuelle, semblent se développer.

Trois scénarios concernant les évolutions de la demande en rhénium dans les catalyseurs ont été formulés par Roskill [2] :

- **Faible croissance** : la demande en pétrole et diesel pourrait ralentir, notamment aux États-Unis et en Europe en conséquence de la hausse des prix du baril et de la récession économique. D'autre part, les catalyseurs développés pour les projets de GTL pourraient privilégier des alternatives au rhénium, comme le ruthénium par exemple. La demande en rhénium à l'horizon 2015 dans la catalyse resterait alors identique à celle de 2009, soit 7,5 t.
- **Croissance moyenne** : le scénario moyen se base sur une progression constante de la demande du secteur pétrolier. Les catalyseurs à rhénium sont utilisés dans la technologie GTL, mais ce secteur reste marginal. Les besoins en rhénium pour la catalyse atteindraient alors 10,5 t en 2015, soit un taux de croissance annuel de 5,8 %.
- **Forte croissance** : la production GTL, qui privilégierait des catalyseurs à rhénium, pourrait atteindre un niveau industriel. D'autre part, tirée par la croissance plus rapide qu'actuellement envisagé des BRIC, l'industrie pétrolière pourrait voir sa capacité de raffinage largement augmentée. 24 t de rhénium seraient alors nécessaires pour les industries catalytiques à l'horizon 2015 (12 t pour le raffinage pétrolier et 12 t dans le secteur GTL). Le taux de croissance serait alors de 21,4 %.

	2009		2015				
			Faible croissance		Croissance moyenne		Forte croissance
	t Re	t Re	Croissance annuelle	t Re	Croissance annuelle	t Re	Croissance annuelle
Superalliages (tous) secteurs confondus	41,5	40	-0,6%	54	4,5%	60	6,3%
Catalyseurs (raffinage pétrolier, procédé GTL)	7,5	7,5	0%	10,5	5,8%	24	21,4%

Tableau 4 : Prévission de l'évolution de la consommation du rhénium dans les superalliages et les catalyseurs à l'horizon 2015 selon trois scénarios (source : Roskill, 2010 [2]).

3.3. SUBSTITUTION ET RECYCLAGE

La rareté et la haute valeur du rhénium sont autant de facteurs incitatifs au recyclage des produits usés. La capacité de production de rhénium secondaire pourrait atteindre les 30 t de Re par an. Cependant, une large part de cette capacité est utilisée par les catalyseurs dont le recyclage fonctionne en circuit fermé, n'injectant alors pas de rhénium secondaire sur le marché.

3.3.1. Traitement des catalyseurs et des ferrailles d'alliages

Les catalyseurs de réformage usés peuvent être retraités afin de récupérer le platine et le rhénium. Afin d'éviter des rejets d'hydrogène sulfuré (H₂S) toxique, les techniques classiques de recyclage des catalyseurs d'attaque à l'acide sulfurique ou à la soude ne

sont pas utilisées. On leur privilégie alors soit une attaque par dissolution dans une solution de carbonate de sodium à 220°C dans une autoclave, soit une sinterisation⁴ avec de la soude ou du carbonate de soude. Les matières carbonées peuvent préalablement être éliminées par un pré-traitement acide ou basique car elles interfèrent négativement lors de la filtration des résidus d'attaque enrichis en platine et en rhénium (Blazy et Jehanne, 2002 [18]).

Aux États-Unis, plus de 2 250 t/an de catalyseurs de réformage sont recyclés pour récupérer le platine et le rhénium (Blazy et Jdid, 2004 [15]).

Les techniques mises en jeu dans le recyclage des scraps diffèrent selon le type d'alliage traité [15]. Dans le cas des alliages binaires (W-Re, Mo-Re ou Ni-Re), un grillage oxydant est mis en œuvre. Re_2O_7 , volatil, est alors récupéré avec de très bons rendements (92-94 %). D'autres techniques, comme la combinaison d'une chloruration et d'une extraction par solvant, peuvent également être utilisées. 92 % du rhénium peut ensuite être récupéré à partir des solutions par des solvants ou des résines. Le recyclage des alliages à Pt-Re aboutit à la formation d'un perrhénate 4N très pur.

Le cas des alliages ternaires à Al-Pt-Re est plus difficile à traiter de manière industrielle. Une fusion avec Na_2CO_3 ou une oxydation est réalisée afin de récupérer 90 % de rhénium [15].

Dans tous les cas, les procédés de recyclage des ferrailles ont de très bons rendements car ils permettent de récupérer au moins 90 % du rhénium contenu dans l'alliage.

D'après l'ADEME (Monier *et al.*, 2010 [19]), il n'existe pas de recyclage des catalyseurs en France, les producteurs Heraeus et Johnson Matthey récupérant tous les déchets issus de ce secteur. Il est cependant à noter que le français **Eurecat** (www.eurecat.fr) procède à la régénération et au recyclage de catalyseurs utilisés en pétrochimie. Parmi la large gamme de catalyseurs traités, il est possible que certains contiennent du rhénium, mais nous ne disposons pas d'informations précises.

En ce qui concerne les superalliages, **Eramet** semble être le seul groupe français à s'intéresser à leur recyclage du fait de son statut de premier producteur historique de rhénium en France. Le groupe indique être en train de mettre en place une technique de recyclage des métaux contenus dans leurs alliages (Re, Co, W, Ni). Le pilote, prévu pour le deuxième semestre 2010, devrait permettre de recycler 400 kg de rhénium par an à partir de 13 000 kg de déchets de superalliages.

3.3.2. Traitement de poussières ou de scories

Lors du traitement des minerais de porphyres cuprifères, si le rhénium suit préférentiellement la molybdénite dans le concentré de flottation, une part non

⁴ La sinterisation est l'agglomération des particules d'un polymère ou d'un minerai par pression à froid suivie d'un traitement thermique.

négligeable peut se retrouver dans le concentré de cuivre qui peut alors contenir une dizaine de ppm de rhénium. Les poussières et les gaz formés lors de la fonte du concentré de cuivre peuvent alors contenir quelques pourcents de rhénium.

Le procédé mis en œuvre pour récupérer le rhénium est développé dans le flow sheet de la Figure 19.

3.3.3. Substitution

Les recherches de substituts au rhénium sont permanentes, et tout particulièrement depuis les cinq dernières années. Les possibilités évoquées sont les suivantes (Blazy et Jdid, 2004 [15], USGS, 2011 [20]) :

- **Catalyseurs** : Ir et Sn ont déjà été utilisés avec succès. D'autres métaux sont également étudiés : Ga, Ge, In, Se, Si, W et V. Si l'utilisation d'un autre métal dans les catalyseurs bi-métalliques pourrait diminuer la part du rhénium sur ce marché, le développement des projets GTL à rhénium compenserait cet effet ;
- **Tubes à rayons X** : revêtements en Co et W ;
- **Couples thermoélectriques** : Rh et Rh-Ir pourraient également être utilisés à des très hautes températures ;
- **Contacteurs électriques** : revêtement en W, ou alliage Pt-Ru ;
- Emetteurs d'électrons : W ou Ta.

3.4. LES PRIX ET LES MARCHÉS DU RHÉNIUM : ÉVOLUTION ET SPÉCIFICITÉS

Le rhénium n'est pas coté dans des bourses telles que le London Stock Exchange (LSE). Il est commercialisé sous forme de perrhénate d'ammonium (APR, de formule NH_4ReO_4) qui doit contenir au minimum 69,4 % de rhénium et pour qui deux qualités sont disponibles (basique et catalytique), mais également sous forme de rhénium métal (99,9% Re au minimum) qui prend plusieurs formes de conditionnements : en pellets, en barres ou en poudres (Figure 8).

Le prix du rhénium est ainsi fixé entre les vendeurs et les acheteurs. Quelques traders interviennent sur le marché du rhénium par le biais de la **Minor Metals Trade Association** (MMTA) basée à Londres. Si leur activité est assez restreinte, ils restent la meilleure voie pour transiter l'APR de qualité basique des producteurs russes et kazakhs vers l'Europe de l'Ouest et les États-Unis où il sera manufacturé. Les sites Metal Pages [8] et Metal Prices [4] publient des intervalles de prix négociés entre des valeurs basses et hautes sur les différents marchés mondiaux (Amérique du Nord, Chine, Union Européenne).



Figure 8 : Produits et modes de conditionnement du rhénium (© Ultra Minor Metals Ltd, www.rheniumet.com [7]).

a : perrhénate d'ammonium, b : pellets de rhénium, c : barres de rhénium, d : poudre de rhénium

La plupart des produits de ce métal mineur, et notamment le rhénium métal, sont livrés à un très faible nombre d'acteurs de la catalyse pétrolière et du secteur des superalliages. De manière à sécuriser leurs transactions sur le long terme, autant les producteurs que les acheteurs ont tendance à établir des contrats commerciaux à terme qui les engagent sur des périodes pouvant atteindre 5 ans. La part du marché spot pour les trois produits à base de rhénium reste comparativement beaucoup plus limitée.

Le volume global du marché du rhénium, qui se situe à des niveaux très faibles en termes de tonnage (53,5 t consommées en 2009), reste un important facteur de volatilité des prix sur le marché spot pour les trois types de produits commerciaux. L'incidence de tout évènement extraordinaire est donc très importante pour les prix sur ce marché.

3.4.1. Évolution récente des prix du rhénium

Comme le montrent les graphiques suivants (Figure 10), les **prix spot** du rhénium sous ses trois formes principales décollèrent de manière spectaculaire en 2006 lorsque la demande du secteur aéronautique, qui était alors en pleine croissance, dépassa les capacités de commercialisation de l'industrie du rhénium.

Le prix spot du rhénium métal atteignit alors 12 000 \$/kg au cours du second semestre 2008 (soit plus de 370 \$/oz à titre de comparaison avec les prix du marché de l'or). Cette bulle du rhénium éclata à la suite des effets de la crise financière de 2008 et du

ralentissement industriel qui frappa l'industrie aéronautique. À la fin 2009, la chute vertigineuse des prix sur le marché spot s'arrêta sur un palier à 4 000 \$/kg qui aura caractérisé l'essentiel de l'année 2010.

À titre de comparaison, les prix sur les **contrats à terme** ne connurent jamais de variations d'une telle amplitude. En 2005, le rhénium métal en provenance du Chili s'achetait en moyenne 1 167 \$/kg, 1 549 \$/kg en 2007, 2 250 \$/kg en 2008, et 2 300 \$/kg en 2009. Il y eut un facteur différentiel supérieur à 5 entre les prix du rhénium selon leur voie de commercialisation (contrats à terme ou spot). Ce facteur est actuellement inférieur à deux.

La croissance continue du prix du rhénium entre 2007 et fin 2008 semble bien traduire une prise en compte des augmentations des prix spot lors du renouvellement des contrats. Un raccourcissement de la durée des contrats pourrait avoir accompagné également les nouvelles négociations des prix.

Le prix des différentes formes de rhénium résultant de négociations entre producteurs et acheteurs, la part de spéculation sur son marché reste relativement faible, en particulier sur les contrats à terme. L'évolution de son cours calque alors rigoureusement les déséquilibres entre offre et demande. Ainsi, si le cours du rhénium est resté relativement bas et constant jusqu'en 2005 alors que la production globale était excédentaire, celui-ci s'est mis à flamber à partir de 2005 lorsque la production globale est devenue incapable d'assouvir la demande mondiale grandissante, en particulier de l'industrie aéronautique, nécessitant alors de piocher dans les stocks (Figure 10).

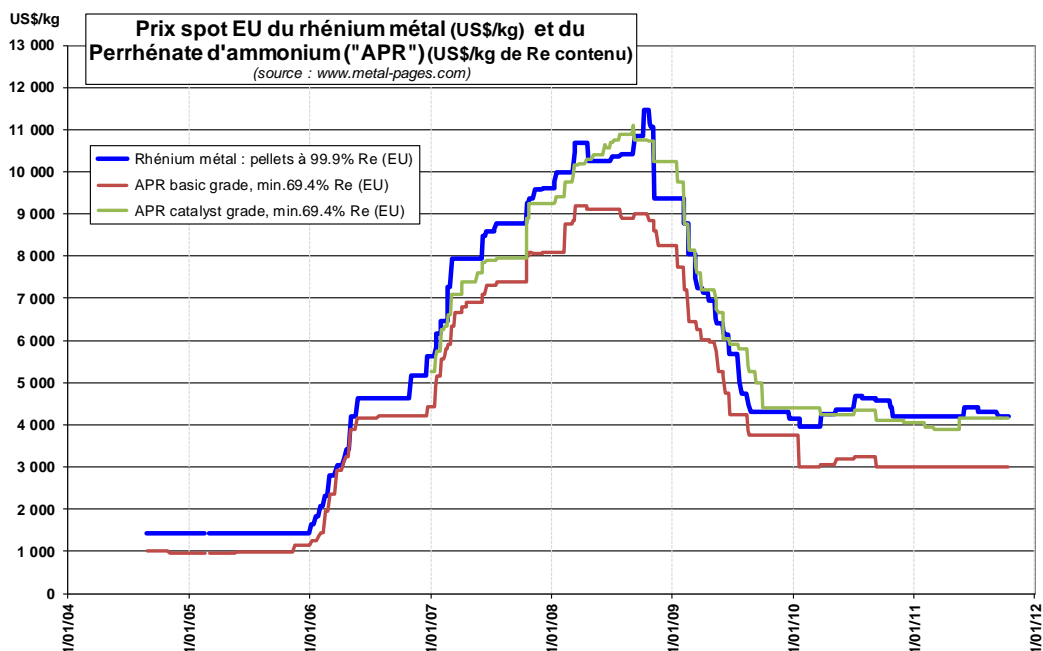


Figure 9 : Comparaison des prix spots des 3 produits de base du rhénium (les 2 qualités d'APR et les pellets de rhénium métal) depuis juillet 2004 sur le marché européen.

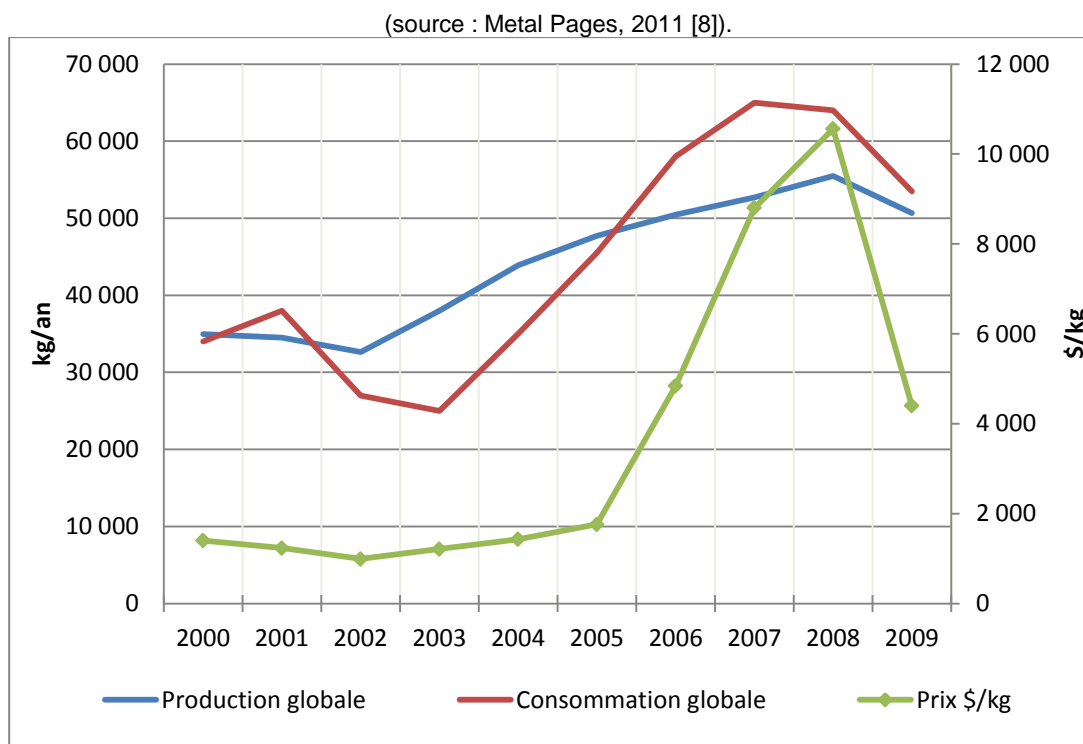


Figure 10 : Évolution de la production et de la consommation globale parallèlement au prix spot du rhénium métal (pellets) entre 2000 et 2010 (adapté d'après Roskill, 2010 [2]).

3.4.2. Perspectives d'évolution du prix du rhénium à l'horizon 2015

L'utilisation du rhénium est bien établie dans deux marchés : celui des catalyseurs de réformage et celui des superalliages. Sa demande future, et par conséquent son prix, est donc conditionnée par l'évolution des secteurs aéronautiques et pétroliers.

L'évolution future de la demande en rhénium dans le secteur aéronautique est conditionnée par les besoins des fabricants de moteurs d'avions, elle-même soumise aux prévisions d'évolution du trafic aérien et des dépenses du secteur de la Défense. Ces différents secteurs tendent à continuer leur croissance, mais ont déjà pu par le passé démontrer leur nature cyclique. Ainsi, avant la récession de 2008-2009, un ralentissement de l'industrie aéronautique était envisagé à l'horizon 2012-2013. Ces cycles économiques peuvent cependant être affectés par divers facteurs externes, qu'ils soient inopinés comme ce fut le cas suite au 11 septembre 2001, ou prévisibles tels qu'une augmentation des prix du kérosène.

Les besoins en rhénium dans les catalyseurs ont également augmenté, mais plus lentement que pour le secteur des superalliages. Le développement des BRIC (Brésil, Russie, Inde et Chine) va conduire à une plus forte demande en pétrole sur le marché mondial et au développement de leur propre capacité de raffinage. La tendance à diminuer de plus en plus la teneur en soufre des pétroles raffinés va également stimuler la demande en rhénium.

Cependant, cette demande est monopolisée par deux secteurs industriels parmi lesquels une petite dizaine de consommateurs majeurs se partagent le marché. Ainsi, l'équilibre existant entre l'offre et la demande peut être très facilement bousculé par l'apparition d'un nouveau produit, un changement de législation ou encore des problèmes de production, constituant autant des facteurs de volatilité des prix.

Selon Roskill [2], les capacités de production, si l'on inclut le rhénium primaire et secondaire, seront en mesure de satisfaire les besoins croissants des industries. Le développement de nouveaux projets miniers (KGHM, Molymet, Kennecott et probablement Ivanhoe avec son projet Merlin) devrait accroître l'offre en rhénium primaire. Toutefois, l'augmentation des apports des sources secondaires devrait marquer les tendances futures, avec le développement, voire la systématisation, du recyclage des ferrailles de superalliages et des aubes de turbines.

Après avoir connu une chute vertigineuse en 2010, Roskill (2010) envisage une nouvelle hausse des prix, modérée en raison du ralentissement prévisible de l'industrie aéronautique et de ses besoins, pour atteindre aux environs de 6 500-7 500 \$/kg en 2015.

Des acteurs de la filière du rhénium estiment qu'un prix correct du rhénium serait de l'ordre de 5 500 - 6 500 \$/kg. Il permettrait, en effet, tant de garantir un bon retour aux producteurs tout en encourageant les industriels à concevoir des produits mettant en jeu du rhénium [2].

4. La filière industrielle

4.1. LES RESSOURCES ET RÉSERVES EN RHÉNIUM

Le rhénium est une ressource métallique qui, de manière primaire, est récupérable à l'issue d'un processus industriel complexe de traitement de certains minerais de cuivre, accessoirement de molybdène-tungstène.

Essentiellement récupéré comme sous-produit du traitement par grillage de la molybdénite, qui est elle-même le plus souvent un sous-produit de l'exploitation de certains types de gisement de cuivre, il n'existe pas, à proprement parler, de gisements de rhénium dans le monde. Les productions primaires de rhénium restent donc dépendantes d'autres productions métalliques (Cu, Mo, U, W...) qui sont récupérables économiquement en amont. Aussi, il est permis de penser que les ressources et réserves primaires exposées sont sous-estimées du fait que le rhénium était rarement recherché et que sa récupération en tant que sous-produit a pu être négligée lors des étapes de traitement de certains minerais cuprifères.

Enfin, les ressources secondaires en rhénium, issues du recyclage des produits en fin de vie, constituent une part croissante de l'approvisionnement global en rhénium (environ 25 % en 2010).

4.1.1. Abondance du rhénium dans l'écorce terrestre

Le rhénium est l'un des éléments métalliques parmi les plus rares de l'écorce terrestre, avec une abondance moyenne variant en 0,7 et 7 ppb selon les auteurs. Il possède une forte affinité pour le molybdène avec qui il partage un rayon atomique similaire et s'associe facilement avec le soufre.

C'est donc dans les sulfures de molybdène (comme la molybdénite MoS_2) que le rhénium se trouve le plus concentré, là où il peut atteindre plusieurs centaines de ppm (jusqu'à 700 ppm).

Accessoirement, on peut trouver le rhénium à l'état de traces dans plusieurs autres minéraux ou minerais, mais à des teneurs bien inférieures aux molybdénites des gisements de cuivre (Tab. 5). Parmi eux, seuls quelques minerais d'uranium ont pu donner lieu à une récupération de rhénium au stade industriel.

Minéraux/Minerais	Teneur en Re (g/t = ppm)
Minéraux des pegmatites	0,01 - 0,60
Zircon	0,01 - 0,05
Minéraux du Groupe du Platine	0,03 - 0,10
Minéraux de manganèse	0,05 - 0,10
Minerais de tungstène	0,02
Minerais d'uranium	0,05 - 0,10

Tableau 5 : Composition en rhénium de quelques minéraux et minerais non cuprifères (Sutulov, 1976 [10]).

4.1.2. La ressource

Les principales ressources primaires de rhénium sont tirées des unités métallurgiques qui traitent par grillage des concentrés de sulfures de molybdène. Ces molybdénites proviennent pour l'essentiel du traitement par broyage et gravimétrie des minéralisations sulfurées des porphyres cuprifères. Ces objets géologiques d'origine magmatique constituent avant tout la première ressource mondiale de cuivre. Environ 80 % de la production mondiale de rhénium primaire provient donc de ces porphyres cuprifères, qui ont une large distribution mondiale.

En contexte sédimentaire, les grès cuprifères de Dzhezkazgan (Kazakhstan) sont une autre source importante de rhénium primaire. Le rhénium peut aussi être géochimiquement associé à l'uranium, comme c'est le cas dans les grès uranifères du Colorado aux États-Unis. Dans le passé, certains gisements Zn-Pb de type pipe (MVT) ont généré des productions de Re, comme à Kipushi en République Démocratique du Congo.

La matière organique est également favorable aux concentrations du rhénium. Dans des gisements sédimentaires liés à des schistes noirs, dont le principal représentant est le Kupferschiefer qui s'étend en Pologne et en Allemagne, le rhénium se trouve associé au molybdène sous la forme de deux sulfures : la castaingite (CuMoS_2) et la jordisite (MoS_2 , molybdénite de basse température). KGHM Ecoren récupère ainsi le rhénium dans le circuit hydrométallurgique de traitement du minerai polonais afin de produire du perrhénate d'ammonium (6 t en 2009) (Polish Academy of Sciences, 2007 [11]). Les schistes noirs phosphatés à Ni-Mo présentent également des indices à Re, comme à Zunyi en Chine.

Minéraux et minerais

Les minéraux à rhénium sont rares ; le principal est bien sûr la **molybdénite** (MoS_2) dans laquelle les atomes de rhénium peuvent substituer en très faible proportion aux atomes de molybdène. Le rhénium peut également se trouver concentré dans d'autres sulfures de molybdène tels que la **jordisite** ou la **castaingite**.

La **dzhezkazganite** est un minéral sulfuré combiné de cuivre, de molybdène et de rhénium qui a été identifié dans le gisement de Dzhezkazgan au Kazakhstan. Sa formule chimique est incertaine ($\text{ReMoCu}_2\text{PbS}_6$? selon Mindat).

Enfin, il faut citer la **rhéniite** (ReS_2) qui est tout à fait exceptionnelle et dont un des seuls indices est lié à des dépôts fumerolliens du volcan Kudriavyy dans les îles Kouriles, dans l'extrême-orient russe (Fig.12). Des essais anecdotiques de récupération ont permis d'en isoler quelques kilogrammes.



Figure 11 : Échantillon de rhéniite du volcan Judriavy (Iles Kouriles, Russie).

Principaux types de gisements

L'inventaire géologique détaillé des occurrences de rhénium à l'échelle mondiale permet de distinguer une dizaine de types de présentations géologiques de gisements ou d'indices porteurs de ce métal ().

On pourra distinguer 3 grandes familles de gisements ou indices.

Tout d'abord la famille des **gisements d'origine magmatique** qui sont en relation avec des intrusions plutoniques différenciées, et parfois du volcanisme d'arc à tendance explosive :

- *Les porphyres à Cu-Mo* constituent la principale ressource en rhénium en sous-produit du traitement de leur minerai sulfuré. Ces porphyres caractérisent le magmatisme de toutes les chaînes de collision qui ont vu le jour du Crétacé à l'actuel. On les retrouve assez bien répartis à l'échelle mondiale (Côte Ouest américaine, Sud Est asiatique, Balkans...). De manière encore peu comprise, ce ne sont pas les porphyres les plus riches en Mo qui sont les plus riches en Re. L'Afrique est dépourvue de ce type de gisements.

Typologie géologique	Porphyre Cu-Mo	Porphyre Mo-(W)	Skarn W-(Mo)	Pegmatite Mo	Fumerolien de haute T°	Grès cuprifère	Grès uranifère	Schistes noirs cuprifères "Kupferschiefer"	Schistes noirs phosphatés à Ni-Zn-Mo-(EGP)	MVT de type pipe (Kipushi)
Part de la production en Re	env. 80 % (dont quelques % seulement à partir des porphyres Mo-W) (Chili, USA, CEI)		Ancienne	-	Projet ?	env. 12% (Kazakhstan)	-	Ancienne (Mansfeld), Projet (Lubin)	-	Ancienne
Expression de la minéralisation	stockwerk, disséminé	stockwerk, disséminé	disséminé	disséminé, veines	encroûtements, disséminé	disséminé stratiforme	disséminé stratiforme	disséminé stratiforme	disséminé stratiforme	disséminé
Principaux éléments associés	Cu, Mo, (Se, Te)	Mo, (W, Cu)	W, Mo, (Bi, Cu)	Mo, Bi	Zn, Cd, In, As, Pb, Bi, Mo, Ag, Ge, S	Cu, Mo	U, Mo, V (Zn, Cd, Pb)	Cu, Ag, (Zn, Pb, Cd, V, Mo, Ni, Co, U, EGP)	Ni, Mo, As, (Zn, Pt, Pd, Rh, Au, U, Ba, Se, As, V)	Cu, Zn, As, Pb, Cd, Ag, Co, Mo, Ga, Ge
Porteur de Re	Molybdénite	Molybdénite	Molybdénite	Molybdénite	Rhenite (ReS ₂)	Dzhezkazganiite (CuReS ₄)	Jordisite ?, phases solubles : ilsemannite, Re ₂ O ₇ , HReO ₄	Molybdénite	Jordisite (MoS ₂ amorphe)	Molybdénite
Teneur moyenne Mo	0,005 - 0,03 %	> 0,05 - 0,3 %	-	max. 0,3 - 0,5 %	-	-	-	-	de 0,1 - 0,4 % (Nick) jusqu'à 4 % (Zunyi)	Faible (Mo non récupéré)
Teneur en Re du porteur principal	x10 à 2000 ppm (souvent x100 ppm) ; jusqu'à 40 ppm Re dans concentré Cu et pyrite	10 ppm (2 - 30 ppm)	10 - 40 ppm	< 50 ppm (15 - 30 ppm)	74%	> 45 %	-	100 ppm (Mansfeld)	-	> 1%
Facteurs pénalisants	Contraintes environnementales (sulfures, pyrite, As, etc.)	Faible teneur Re	Gisements irréguliers, faible teneur Re	Petits gisements peu mécanisables, faible teneur Re	Gîtes exceptionnels difficilement exploitables	Radio-activité élevée	Radio-activité élevée	Minéral fin réfractaire (MO, composés organo-métalliques), niveaux minces	Niveaux minéralisés très minces, granulométrie fine	
Teneur moyenne Re du minéral tout-venant	2 - 5 ppm	0,01 à 0,1 ppm	env. 10 ppm	nd	x100 à x1000 ppm	30 ppm (10 - 100 ppm)	50 - 700 ppm	1 - 20 ppm	10 - 60 ppm (Nick)	10 - 30 ppm (concentré Cu)
Gîtes de référence	Sierrita (USA), Kounrad (Kazakhstan)	Climax, Questa (USA)	King Island (Australie) ; TyrniAuz (Russie)	Mätäsvaara (Finlande)	Kudryavyy, Kouriles (Russie)	Balkash mine (Dzhezkazgan) (Kazakhstan)	Colorado (USA)	Lubin (Pologne); Mansfeld (Allemagne)	Zunyi (Chine) ; Nick (Canada)	Kipushi (Rép. Démocratique du Congo)

Tableau 6 : Typologie géologique des principaux gisements de rhénium (Deschamps, 2003).

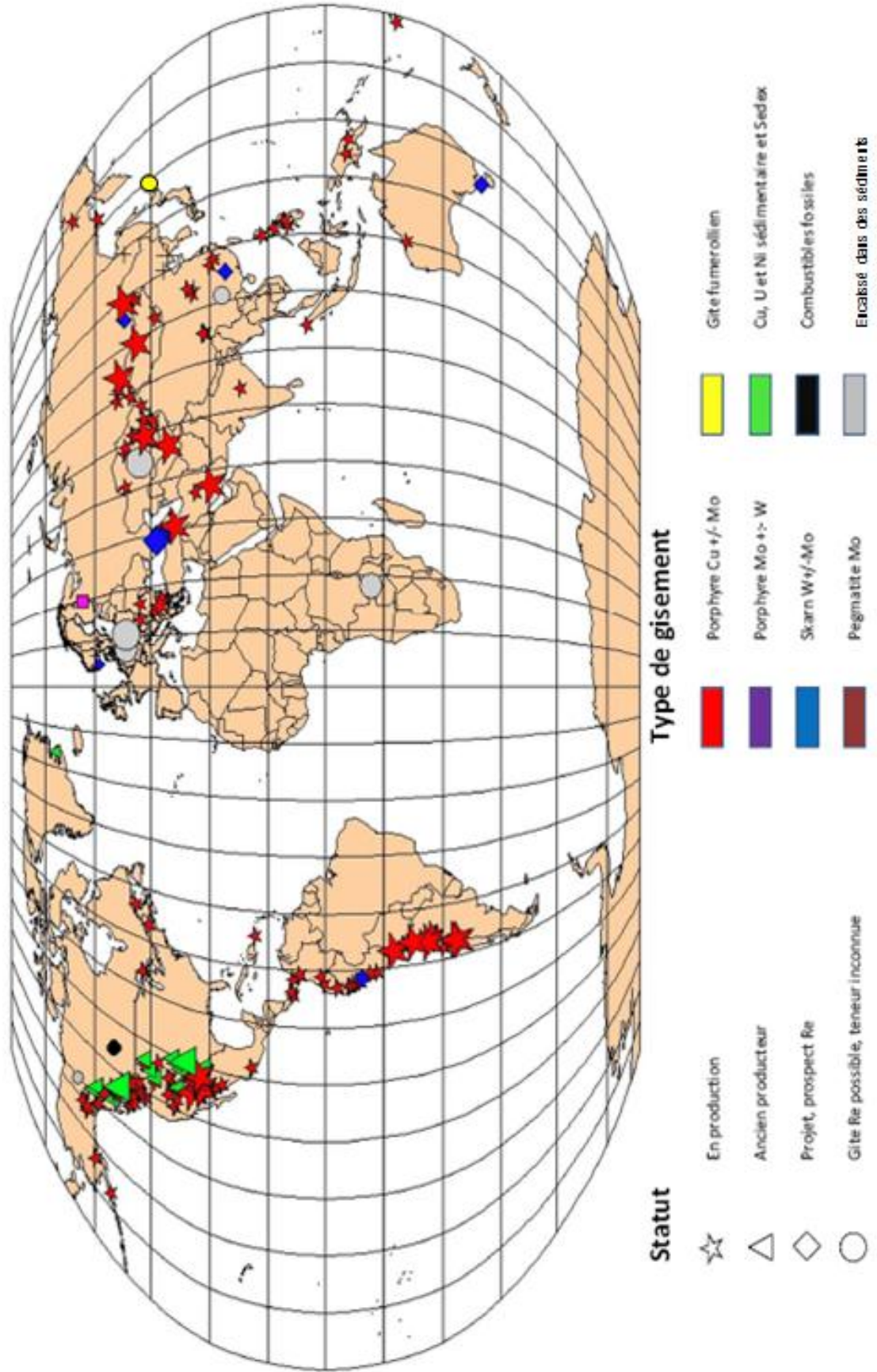


Figure 12 : Distribution mondiale des prospects, gîtes et gisements abritant du rhénium classés par typologie (Deschamps, 2003 [28]).

- Les *porphyres à Mo (W)*, les skarns à W (Mo), et certains filons de pegmatites à Mo peuvent représenter des ressources marginales en rhénium.
- Les *dépôts fumeroliens* de haute température du volcan Kudryavyi dans les îles Kouriles, ont donné lieu à des essais peu concluants de récupération de rhéniite.

On distingue ensuite la famille des **gisements de type sédimentaire stratiforme** qui sont associés à des niveaux gréseux ou schisteux noirs à matière organique, voire mixtes :

- Les *grès cuprifères* de Dzhezkazgan (région du lac Balkash – Kazakhstan), ou les *grès uranifères* du Colorado. Le rhénium est ici associé au cuivre ou alors à des phases solubles récupérables par lixiviation.
- Les *niveaux schisteux noirs cuprifères* du Kupferschiefer d'Allemagne et de Pologne (districts de Mansfield et de Lubin), où le rhénium fait l'objet d'une récupération ; et les *niveaux schisteux phosphatés à Ni* de Chine (Zunyi) et du Canada (Nick). Dans tous les cas le rhénium est porté par des sulfures de molybdène, jordisite ou castaingite. Dans le cas du Kupferschiefer, Piestrzynski [15] évalue la teneur moyenne en Re dans les faciès oxydés de la Rote Faule à 1 ppm, tandis qu'elle atteint en moyenne 5,3 ppm dans les faciès les plus riches en cuivre. Hammer *et al.* (1990, [13]) ont pu faire des observations similaires, avec certains échantillons de la zone riche en cuivre contenant jusqu'à 27,3 ppm Re. De tels enrichissements semblent toutefois exceptionnels, comme le montre Bechtel (2000, [12]) qui évalue la teneur en Re des faciès oxydés à plusieurs centaines de ppb.

Enfin une famille est représentée par un gisement atypique à Cu, Zn, Pb et As, dit de type « **Mississippi Valley** » (MVT) et présentant une morphologie de pipe discordant dans un environnement sédimentaire. Le rhénium est ici encore porté par la molybdénite.

La carte de la Figure 12 illustre la distribution mondiale des prospectes, gîtes et gisements classés suivant la typologie précisée dans les tableaux suivants. La ressource minière globale est donc diversifiée tant en termes de localisation géographique que de type de gisement.

4.1.3. Gisements et potentiel en France

On ne connaît à ce jour aucun indice géologique porteur de rhénium en France métropolitaine ou en Guyane. Il convient toutefois de rappeler que le rhénium, comme nombre de métaux mineurs, n'était pas analysé dans l'inventaire français, étant donné le caractère très récent des applications qu'il a pu trouver. Sa présence en très faible teneur dans les minerais ne peut, de plus, être mise en évidence que par des appareils à limite de détection très fine.

Les indices de molybdénite recensés par l'inventaire sont au nombre d'une trentaine répartis dans tous les massifs cristallins français (Bretagne, Vosges, Alpes, Corse).

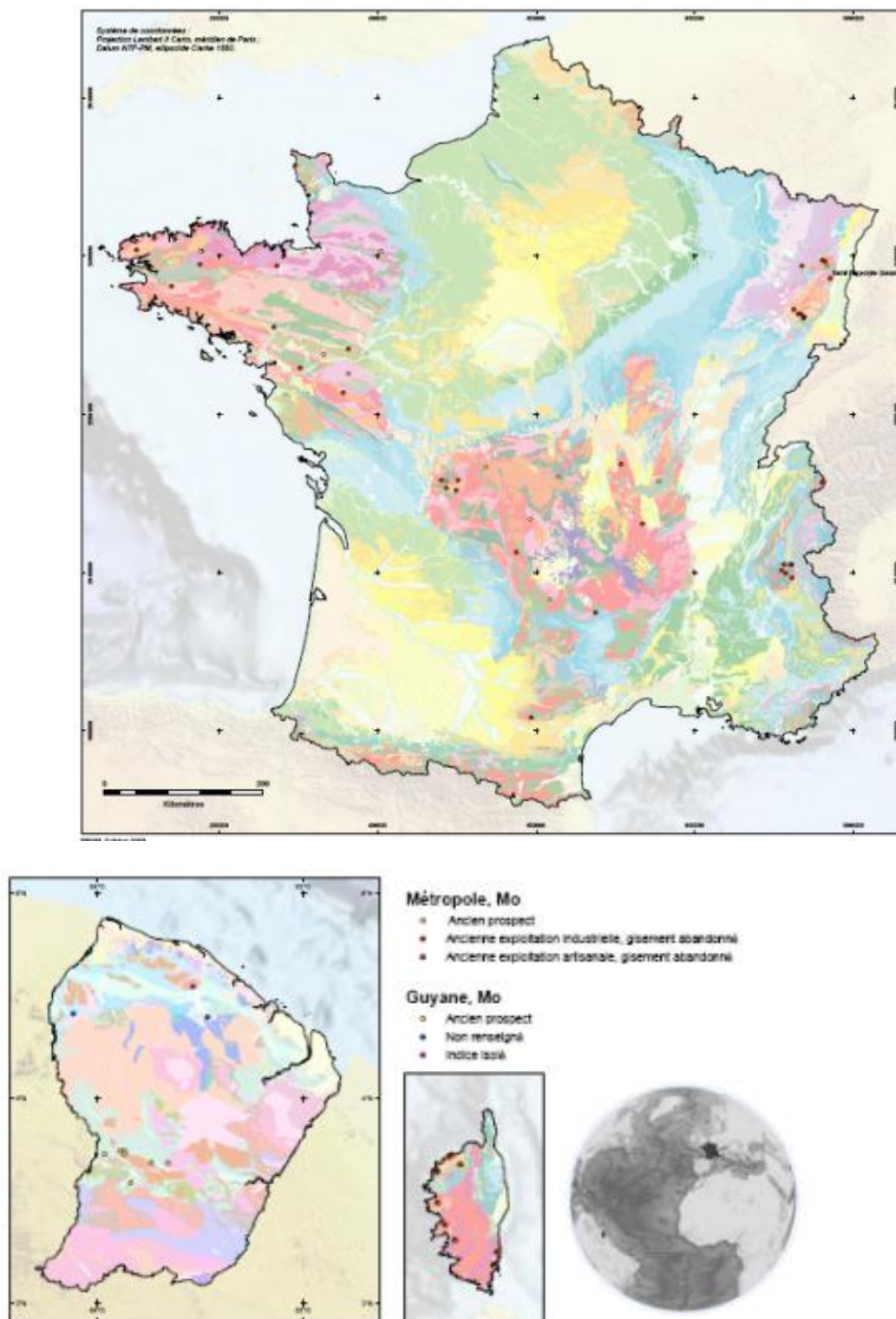


Figure 13 : Inventaire des principaux indices à molybdénite identifiés en France métropolitaine et en Guyane (BRGM, 2010).

Ce sont des minéralisations disséminées généralement associées à des environnements de granites différenciés, d'âge briovérien à carbonifère, de filons pegmatitiques, ou aplitiques, et de skarns. Si quelques-uns de ces indices ont fait l'objet d'exploitations à caractère artisanal pour le cuivre ou le tungstène (qui peut être associé à la molybdénite), trois sites seulement ont fait l'objet de recherches plus conséquentes :

- **le granite de Beauvin** (61) à Sb-W-Bi-Sn-Mo-As a fait l'objet d'une première évaluation de ses ressources (60 000 t de minerai) mais n'a jamais été exploité ;
- **le porphyre de Breitenbach** (67) montre des filons à Sb-W-Bi-Sn-Mo-As qui a donné lieu à des travaux de prospection. Les ressources n'ont pas été évaluées ;
- les filons à sulfures de Mo-Cu de la diorite de **Château-Lambert** (70) ont été exploités et ont permis de produire 37 t de Mo (ou MoS₂ ?) en co-produit du cuivre.

Ne possédant aucun complexe porphyrique développé à Cu-Mo comme ceux présents dans les marges actives des Balkans au crétacé supérieur, le territoire français révèle *a priori* un potentiel extrêmement faible pour la mise en évidence de ressources en rhénium significatives en regard des indices cités plus haut, et cela même si les recherches qui ont été mises en œuvre dans le cadre de l'inventaire minier métropolitain sont restées insuffisantes pour le démontrer.

D'autre part, en ce qui concerne les gisements sédimentaires, on ne connaît que peu d'indices de grès cuprifères, même si certains ont donné lieu à des exploitations au XIX^e siècle : Cap Garonne (83), le Cerisier (06). Cependant, aucune indication de rhénium n'y a encore été reconnue. Par ailleurs, on ne connaît aucun équivalent aux formations du « Kupferschiefer » polonais sur le territoire national. Des formations de shales noirs sont toutefois clairement identifiées en France dans la Montagne Noire, les Pyrénées et plus anecdotiquement, dans le Massif Armoricaïn. Le rhénium n'y a cependant jamais été dosé.

Enfin, en ce qui concerne les grès à uranium du bassin de **Lodève** (34), de **Coutras** (33) ou de **Lombre** (03), aucun contenu en rhénium n'y a jamais été mentionné.

4.1.4. Commentaire sur les ressources et réserves en rhénium

Selon les estimations courantes de l'USGS, les réserves primaires en rhénium identifiées à l'échelle globale seraient de 2 500 t, soit l'équivalent de 50 ans de la consommation mondiale annuelle actuelle (Tab.7). 85 % du stock de rhénium correspondant sont répartis dans trois pays américains, par ordre d'importance États-Unis, Chili et Canada. Cette production est subordonnée au développement de la filière du cuivre à partir des porphyres cuprifères de ces trois pays.

Les autres ressources en rhénium sont réparties dans plusieurs autres pays de l'hémisphère nord (Russie, Kazakhstan, Arménie, Pologne, Iran...) et peuvent couvrir d'autres modèles géotologiques que le type porphyrique dominant.

Pays	Réserves* (t Re)	Réserve base** (t Re)
Chili	1 300	2 500
États-Unis	390	4 500
Russie	310	400
Kazakhstan	190	250
Arménie	95	120
Autres	91	360
Pérou	45	550
Canada	32	1 500
Total	2 500	10 000

* Les réserves représentent le contenu en rhénium valorisable à partir des réserves en minerais exploitables de façon économique en 2010.

** Les « réserves base », suivant la terminologie originelle de l'USGS, représentent le contenu rhénium des ressources en minerai démontrées (mesurées + indiquées) et qui pourraient être à l'avenir transformées en réserves de minerais économiquement exploitables. Les ressources "supposées" sont exclues de cette définition.

Tableau 7 : Estimation des ressources et réserves minières en rhénium (USGS, 2010).

On pourra toujours faire remarquer que cette évaluation des ressources ne prend pas en compte ni les ressources supposées, ni les ressources hypothétiques que les progrès de la connaissance n'ont pas encore révélées.

Se pose alors la question du potentiel en rhénium des formations sédimentaires à cuivre de la Copperbelt (Zambie, République Démocratique du Congo). Cette question est importante car cette région contient d'importantes ressources en cuivre. Dans l'avenir, elle pourrait, grâce à ses coûts d'exploitation inférieurs à ceux des porphyres cuprifères chiliens ou américains et à ses plus fortes teneurs, devenir un producteur majeur de rhénium.

On ne peut toutefois pas avancer que cette concurrence pourrait remettre en cause l'équilibre actuel sur la répartition mondiale des ressources en rhénium.

Enfin, à partir d'un point de vue métropolitain et même si les ressources globales apparaissent importantes, on devra prendre en compte prioritairement les facteurs suivants pour définir un niveau de criticité sur la répartition des ressources :

- absence complète de ressources (au sens USGS) sur le territoire national ;
- ressources significatives sur le continent européen (Pologne, Allemagne et Balkans) ;
- importantes ressources localisées aux États-Unis, Canada et Chili, trois pays se caractérisant par une grande ouverture commerciale de leurs produits.

Ainsi la criticité du rhénium par rapport à l'importance et la localisation de ses ressources à l'échelle globale est évaluée à 3 /5.

Il est de plus intéressant de souligner le fait qu'une part importante de la ressource globale est le fait des produits rhénifères en fin d'usage. D'autre part, il ne semble pas,

à l'heure actuelle, y avoir de stockage stratégique du rhénium, au moins dans les pays qui ont une transparence économique.

4.2. PRODUCTION

4.2.1. Productions historiques et actuelles

Le Chili est de loin le premier producteur de rhénium avec une contribution qui reste proche de 50% de l'approvisionnement mondial (24 t en 2009). Les États-Unis (10 t) viennent en seconde position mettant ainsi les Amériques en position dominante pour l'approvisionnement de ce marché. Viennent ensuite les contributions plus modestes de la Pologne avec 4 t en 2009 et celles du Kazakhstan (3 t en 2009), mais qui présentent des enjeux géopolitiques importants pour l'Europe (Figure 14).

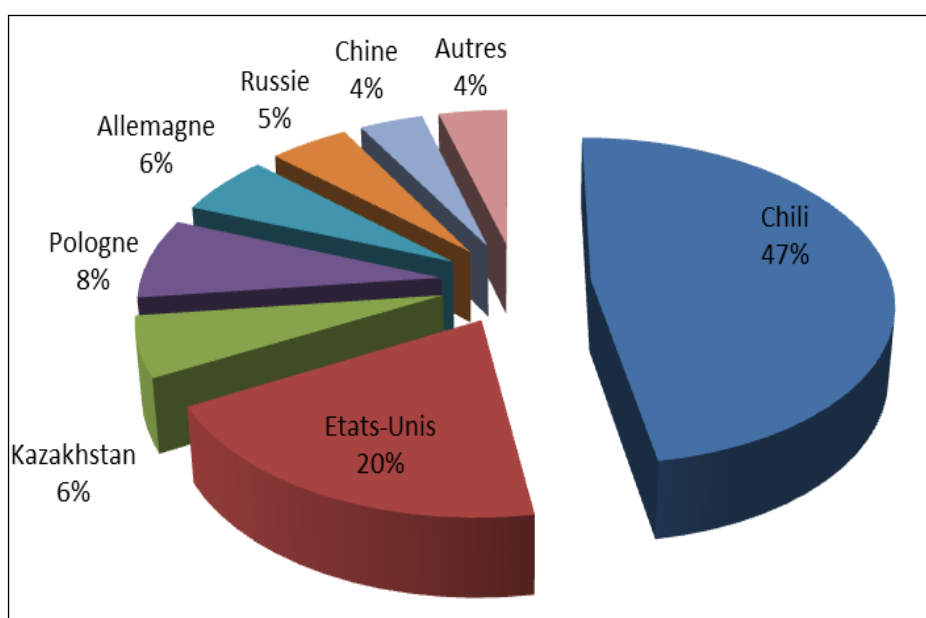
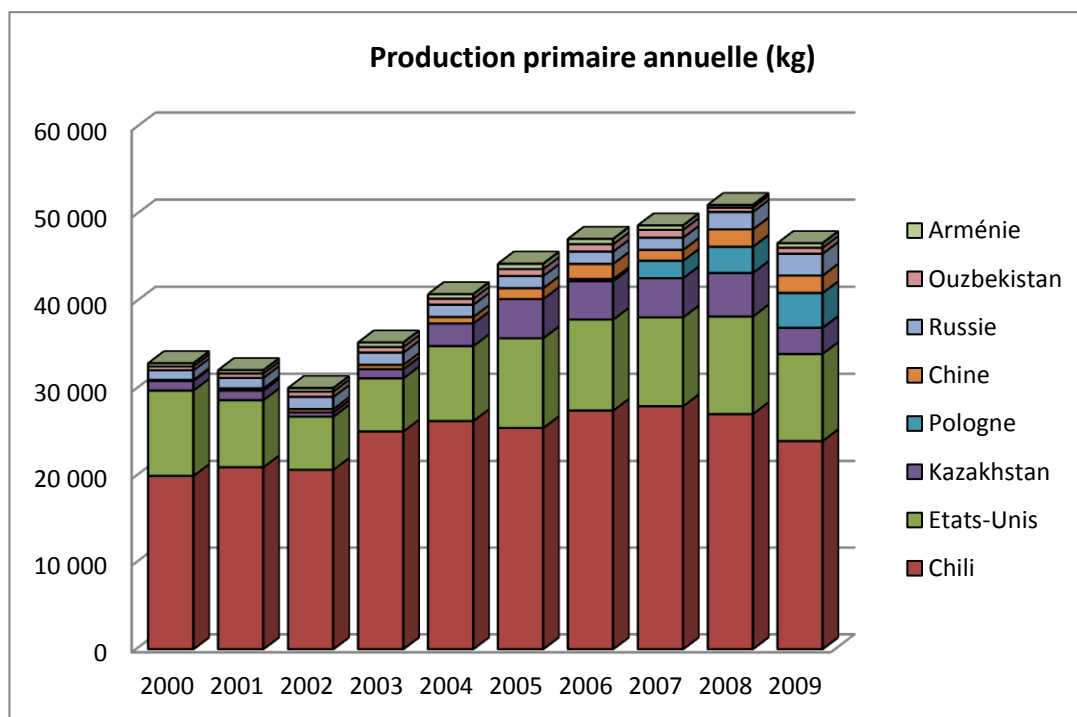


Figure 14 : Répartition de la production mondiale totale (primaire + secondaire) de rhénium en 2009 (50,06 t) (adapté d'après Roskill, 2010 [2]).

Après un maximum de 55,5 t atteint en 2008, la production mondiale de rhénium a retrouvé en 2009 son niveau de 2006, soit un peu plus de 50 t/an. Cette production couvre deux types de ressources : la ressource primaire issue du traitement en plusieurs étapes des minerais et la ressource secondaire qui est issue du recyclage en fin de vie des produits contenant du rhénium. Le Tableau 8 distingue les productions primaires et secondaires des principaux pays producteurs entre 2000 et 2009.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Production primaire										
Chili	20 000	21 000	20 700	25 100	26 300	25 500	27 500	28 000	27 100	24 000
Etats-Unis	8 800	6 700	5 100	5 100	7 600	8 800	7 900	7 200	7 700	7 000
Kazakhstan	1 100	1 100	500	1 050	2 600	4 500	4 400	4 500	5 000	3 000
Pologne	-	-	-	-	-	-	250	2 000	3 000	4 000
Chine	125	250	375	500	750	1 250	1 750	1 250	2 000	2 000
Russie	1 100	1 200	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	0	0
Ouzbekistan	450	500	600	650	700	800	850	900	500	700
Arménie	350	375	400	500	500	600	600	500	300	500
Production secondaire										
Allemagne	1 155	1 320	1 500	1 650	1 980	2 310	2 640	3 000	3 400	3 000
Estonie	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Etats-Unis	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 500	2 550	3 000	3 500	3 000
Russie	-	-	-	-	-	-	-	-	2 000	2 500
Autres	400	550	550	550	550	550	100	450	500	450
Totaux										
Production primaire	31 925	31 125	29 075	34 300	39 850	42 850	44 650	45 750	45 600	41 200
Production secondaire	3 055	3 370	3 550	3 700	4 030	4 860	5 790	6 950	9 900	9 450
Production globale	34 980	34 495	32 625	38 000	43 880	47 710	50 440	52 700	55 500	50 650

Tableau 8 : Productions primaire et secondaire (kg) de rhénium sur la période 2000-2009 (Roskill, 2010 [2]).



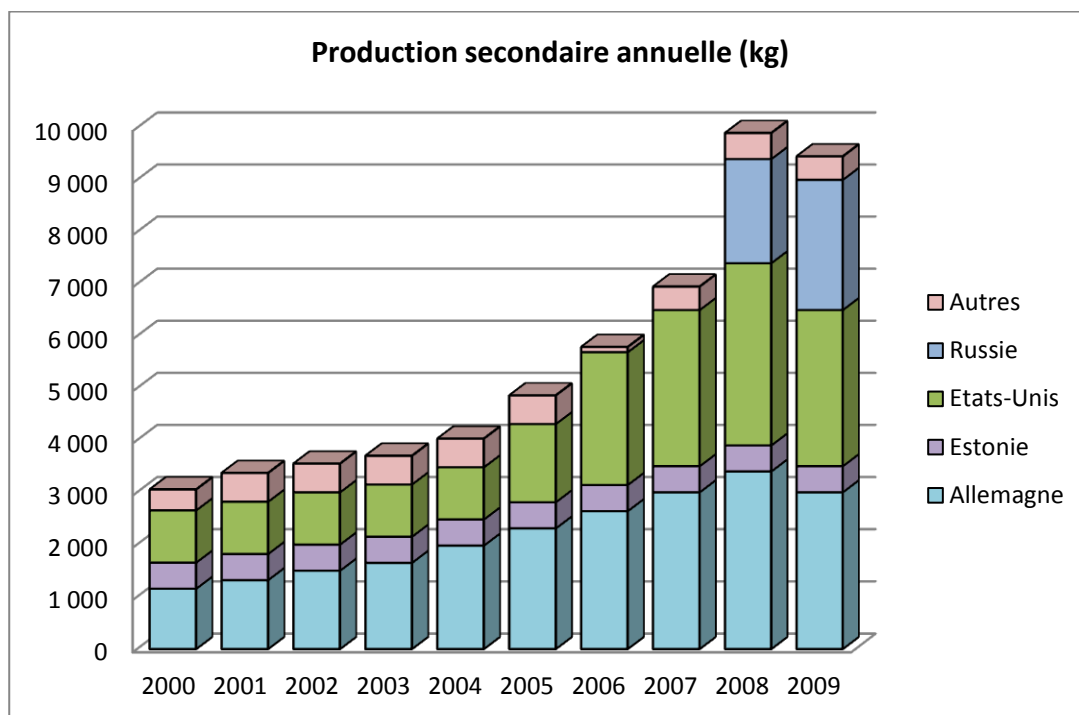


Figure 15 : Évolution des productions primaires et secondaires de rhénium entre 2000 et 2009. Les deux graphiques sont volontairement à deux échelles différentes afin de mieux mettre en évidence les acteurs du secteur secondaire (adapté d'après Roskill, 2010 [2]).

Une analyse plus détaillée de ces statistiques met en évidence la part croissante des apports secondaires sur la production globale. Si la production minière est restée relativement stable depuis 2006, le recyclage des scraps d'alliages et des catalyseurs apporte de nouvelles sources de rhénium sur le marché mondial.

Le recyclage, notamment des catalyseurs, est une pratique bien établie en Allemagne, aux États-Unis ainsi qu'en Estonie, ce qui fait de ces pays des producteurs de rhénium secondaire historiques. Depuis 2008, les États-Unis sont devenus les premiers producteurs de rhénium secondaire (3 t en 2009), dépassant l'Allemagne.

Avec l'Estonie et l'Allemagne, l'Europe reste encore en 2010 le premier producteur de rhénium secondaire mondial (3,5 t), cependant la croissance rapide de ce secteur voit apparaître de nouveaux producteurs significatifs comme la Russie, qui a opéré une forte conversion du primaire au secondaire au cours de la décennie.

La croissance ininterrompue de la part du rhénium secondaire dans l'approvisionnement mondial est clairement mise en évidence en Figure 16. Elle en effet atteint 23 % en 2009, après une croissance moyenne de 1,5 % par an depuis une décennie. Les projections basées sur une croissance linéaire de la part du recyclage porteraient à 28-30 % environ sa contribution à la production mondiale en 2015.

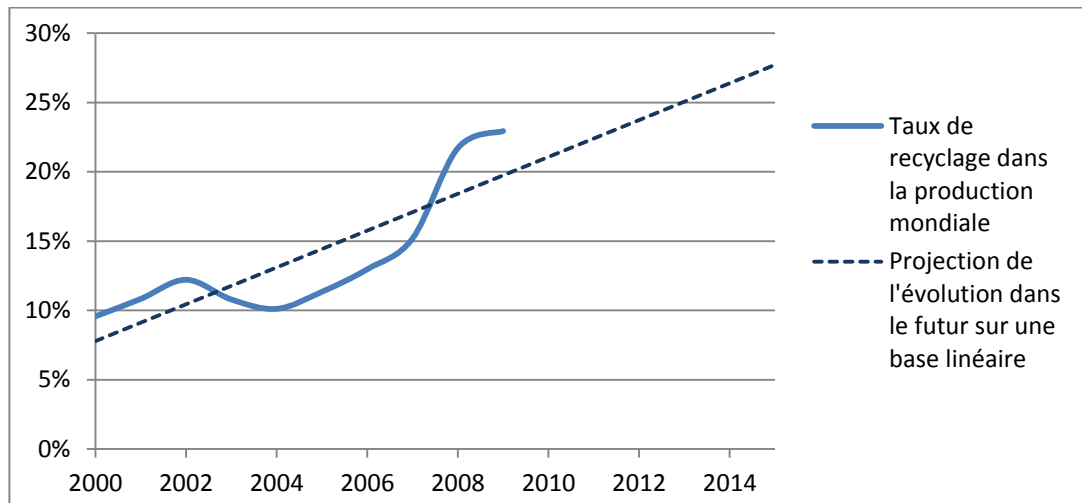


Figure 16 : Evolution historique et projection de la part de rhénium recyclé dans la production globale (BRGM, 2011).

La filière de la production secondaire de rhénium est cependant, à l'heure actuelle, moins diversifiée que la production primaire qui fait intervenir des acteurs américains, européens et asiatiques.

Mines actives et projets miniers en développement

Selon les estimations de l'USGS, le contenu en rhénium de tous les minerais classés comme réserves (réserves prouvées et probables) dans les mines en activité et les gisements en développement (faisabilité) est de l'ordre de 2 500 tonnes. Cela représente à peu près l'équivalent de 50 ans de consommation mondiale à régime stabilisé 2010 (200 ans de consommation mondiale en se basant sur les 10 000 tonnes de « reserves base » de l'USGS).

En 2010, on recense une soixantaine de projets miniers à différents stades de développement entre les études de faisabilité et l'exploitation pour lesquelles du rhénium est identifié comme étant un des constituants du minerai qui constituent les réserves (Figure 17). On remarquera l'absence de tels projets en Afrique.

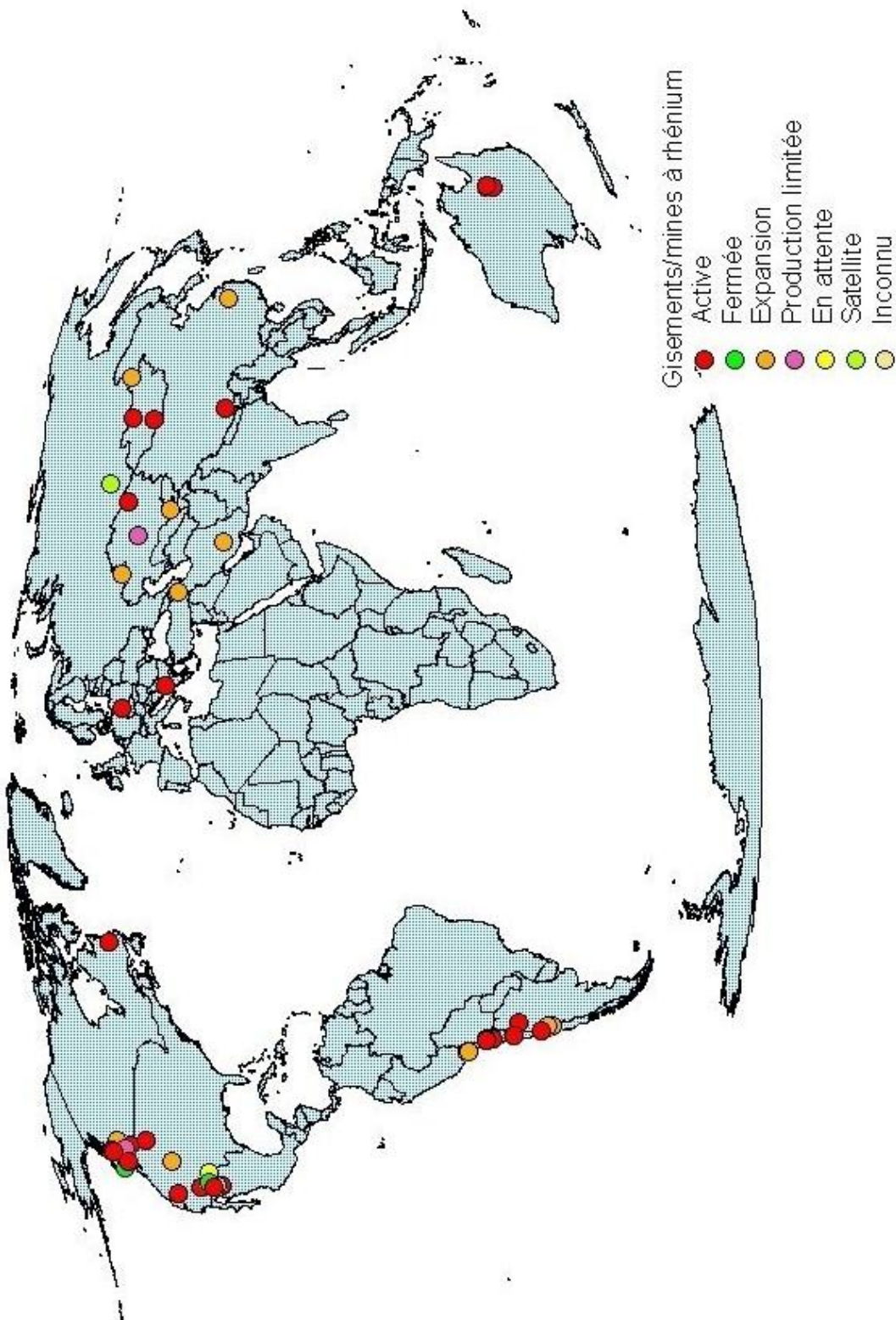


Figure 17 : Localisation mondiale des projets miniers à statut reconnu comme sources actuelles de rhénium (BRGM, 2011).

Région	Pays	Nom du Projet	Substances	Etat du projet	Acteur principal	Méthode d'exploitation	Méthodes de traitement du minerai	Produits	Ressources + Réserves (Mt)	Teneurs Cu (%)	Teneurs Mo (%)	Teneurs Re (g/t) des concentrés MoS2
Asie	Chine	Dexing Complex	Cu, Mo, Au, Ag	Prod.	Jiangxi Copper Co Ltd	C	F	Cc.	1 140	0,460	0,011	...
		Wunugetushan	Cu, Mo, Zn, Ag, Au, Se	Prod.	China National Gold Group Corp	C	...	...	275	0,460	0,055	...
		Yuanzhuding Mountain	Cu, Mo	Fais.	Shenghua Real Estate Development Co Ltd	C	...	Cc.	295	0,132	0,063	...
		Nimu	Cu, Mo, Au, Ag, Re	Dévp.	Sichuan Bureau of Metallurgical Geol Explo	...	...	...	53	1,100	...	...
	Mongolie	Erdenet-Oovo	Cu, Mo, Ag, Au, W	Prod.	Government of Mongolia	C	F	Cc.	500	0,790	0,020	500
		Zuun Mod	Mo, Cu, Re	Dévp.	Erdene Resource Development Corp	...	...	...	365	...	0,052	...
Am. Nord	Canada	Highland Valley	Cu, Mo, Ag	Prod.	Teck Resources Ltd	C	F	Cc.	642	0,327	0,010	300
		Gibraltar	Cu, Mo	Prod.	Taseko Mines Ltd	C	F + SX-EW	Cc.+ Ca.	870	0,298	0,008	50
		Island Copper	Cu, Mo, Au, Ag	Prod.	BHP Billiton Group	C	F	Cc.	...	...	...	1000
		Huckleberry	Cu, Mo, Au, Ag	Prod.	Imperial Metals Corp	C	F	Cc.	228	0,314	...	500
		Ok Property	Cu, Mo	Dévp.	Prophecy Resource Corp	C	...	...	87	0,310	0,008	...
		Red Bird	Mo, Cu	Dévp.	Torch River Resources Ltd	...	...	...	152	...	0,058	...
		Carmi	Mo	Dévp.	Hi Ho Silver Resources Inc	C	...	...	40	...	0,056	...
		Central Mineral Belt	U, Mo, Rh	Dévp.	Baysw ater Uranium Corp	...	...	...	5	...	0,014	...
		Lone Pine	Mo, Re	Dévp.	Bard Ventures Ltd	...	...	...	136	...	0,084	...
		Platyer	Mo, Re, Ag	Dévp.	Metalcorp Ltd	...	...	...	1	...	...	...
	Etats-Unis	Sierrita	Cu, Mo, Au, Ag, Re	Prod.	Freeport-McMoRan Copper and Gold Inc	C	F + SX-EW	Cc.+ Ca.	3 800	0,218	0,024	150-200
		Mission Complex	Cu, Ag, Mo	Prod.	Asarco Inc	C + S	F	Cc.	152	0,580	0,020	600
		San Manuel Division	Cu, Au, Mo, Ag	Prod.	BHP Billiton Group	S + C	F + SX-EW	Ca. + Cc. + Rés.	958	0,604	...	900
		Bagdad	Cu, Mo, Ag, Au	Prod.	Freeport-McMoRan Copper and Gold Inc	C	F	Cc.+ Ca.	1 671	0,315	0,017	250-300
		Butte - Continental	Cu, Mo, Ag	Prod.	Montana Resources Inc	C	F	Cc.	385	0,350	0,030	150
		Chino/Cobre	Cu, Mo, Ag, Au	Prod.	Freeport-McMoRan Copper and Gold Inc	C	F	Cc.+ Ca.	804	0,425	0,007	1000
		Bingham Canyon	Cu, Au, Mo, Ag, Re	Prod.	Kennecott Exploration Inc (Rio Tinto plc)	C	F	Cc.	1 721	0,320	0,066	150
		Ann Mason	Cu, Mo	Dévp.	Entree Gold Inc	C	...	...	810	0,399	0,004	...
		Tw in Buttes	Cu, Mo, Au, Ag, Re	Dévp.	Freeport-McMoRan Copper and Gold Inc	C	...	...	686	0,437	0,023	...
		Pine Tree	Cu, Mo	Dévp.	...	...	...	...	...	...	...	...
		Spruce Mountain	Au, Ag, Zn, Pb, Mo, W	Dévp.	Mosquito Consolidated Gold Mines Ltd	C	...	...	...	...	...	...
		Am. Lat.	Argentine	Agua Rica	Cu, Au, Mo, Ag, Re	Fais.	Yamana Gold Inc	C	F	Cc.	1 761	0,422	0,029	800
Chili	El Teniente		Cu, Mo	Prod.	Codelco	S	F + SX-EW + Fd.	Mattes + Ca.	19 182	0,553	...	400
	Chuquicamata		Cu, Mo, Re	Prod.	Codelco	C + T. + S	F + SX-EW	Ca. + Cc.	18 879	0,502	...	220
	Los Bronces		Cu, Mo	Prod.	Anglo American plc	C	F + SX-EW	Ca. + Cc.	6 585	0,464	...	250
	Los Pelambres		Cu, Mo, Au, Ag	Prod.	Antofagasta plc	C	F	Cc.	5 755	0,522	0,011	250
	Collahuasi		Cu, Mo	Prod.	Xstrata Plc	C	F + SX-EW	Cc.+ Ca.	5 115	0,806	...	250
	Andina Division		Cu, Mo, Au, Ag	Prod.	Codelco	S + C	F + SX-EW	Cc.+ Ca.	16 975	0,628	...	300
	Salvador Division		Cu, Mo	Prod.	Codelco	S + C	F + SX-EW	Ca. + Cc.	4 061	0,366	...	500
	Copaquire		Cu, Mo, Re	Dévp.	International PBX Ventures Ltd	C	F	Cc.	423	0,128	0,033	...
Mexique	Maria		Cu, Mo, Ag	Prod.	Servicios Corporativos Frisco SA De CV	S	F	Cc.	0,32	0,906	0,688	300-400
	La Caridad		Cu, Mo, Au, Ag, Re	Prod.	Southern Copper Corp	C	F + SX-EW	Cc.+ Ca.	5 062	0,204	0,023	400
Perou	Cuajone		Cu, Mo, Ag, Au	Prod.	Southern Copper Corp	C	F	Cc.	2 783	0,468	0,017	450
	Toquepala		Cu, Mo, Ag, Au, Re	Prod.	Southern Copper Corp	C	F + SX-EW	Cc.+ Ca.	6 481	0,317	0,013	300-350

CEI	Kazakhstan	Zhezkazgan Complex	Cu, Ag, Re	Prod.	Kazakhmys plc	S + C	F + SX-EW	Ca. + Cc.	439	0,908	...	...
		Shorskoye	Mo, Cu	Prod.	Severstal Group	C	F	...	20	0,060	0,095	320
	Kyrgyzstan	Kuru Tegerek	Cu, Au	Dévp.	Fortune Pegasus International Ltd	...	...	...	173	0,590	...	...
	Ouzbekistan	Almalyk Complex	Cu, Au, Ag, Mo, Zn, Pb	Prod.	Almalyk Mining and Metals Combine	C + S	F	Cc.	1 295	0,346	...	...
	Russie	Gaisky Complex	Cu, Zn, Au, Ag	Prod.	Urals Mining and Metallurgical Co	S + C	F	Cc.	310	1,400	...	...
Sorskoe		Mo, Cu	Prod.	Strikeforce Mining and Resources Ltd		F	Cc.	284	0,050	0,060	250	
Europe	Pologne	KGHM Polska Miedz	Cu, Ag, Re, Mo	Prod.	KGHM Polska Miedz SA	S	F + SX-EW	Ca. + Cc.	1 027	1,970	...	...
	Serbie	Surdulica	Mo, Rh	Dévp.	Dundee Precious Metals Inc	...	...	...	147	...	0,050	...
M. Orient	Arménie	Zangezur	Cu, Mo, Re, Au, Ag, Zn	Prod.	Cronimet	C	F	Cc.	4 305	0,114	0,002	...
	Iran	Sarcheshmeh	Cu, Mo, Au, Ag, Re	Prod.	National Iranian Copper Industries	C	F	Ca.	1 200	0,700	0,030	...
Océanie	Australie	Osborne	Cu, Au	Prod.	Barrick Gold Corp	S + Stockpile	F + Fd.	Cc. + Doré	7,6	1,453	...	...
		Rocklands Group	Cu, Co, Au, U	Fais.	CuDECO Ltd	...	F	Cc.	25	1,570	...	...
		Kalman	Mo, Re, Cu, Au, Ag	Fais.	Kings Minerals NL	...	F	Cc.	60	0,324	0,049	...
		Merlin	Mo, Re, Cu, Ag, U	Dévp.	Ivanhoe Australia Ltd	S + C	F	...	9	0,240	0,941	...

C = Carrière F = Flottation Cc. = Concentrés
S = Souterrain SX-EW = Hydrométallurgie Ca. = Cathodes
T = rejets de laverie Fd. = Fonderie Rés. = Résidus
Stockpile = minerais en stock

Tableau 9 : Inventaire des réserves de minerai à rhénium dans le monde (BRGM, 2011).

À partir des bases de données accessibles par le BRGM sur les réserves de minerai à rhénium identifiées dans le monde, l'inventaire le plus exhaustif que l'on puisse faire est présenté dans le tableau précédent. Certaines données sur la composition en rhénium des minéraux porteurs restent erratiques, ce qui reflète également le faible niveau général des connaissances sur les ressources/réserves globales.

Sur la soixantaine de projets identifiés, la moitié sont en production et alimentent actuellement le marché. L'autre moitié liste des projets en développement dont les réserves sont encore vierges de toute exploitation et permettront d'alimenter le marché dans un futur proche (*a priori* 5 ans en moyenne).

D'autre part, il n'existe pas de stockage stratégique de rhénium à l'heure actuelle aux États-Unis. La Russie stocke actuellement un peu de rhénium, tandis que le Japon (JOGMEC) et l'Union Européenne envisagent les possibilités de stocks stratégiques.

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

Comme indiqué précédemment, la production primaire de rhénium n'est pas une production directe de métal à partir d'un minerai spécifique. Le rhénium que le marché met à disposition provient de manière très dominante du traitement de concentré de molybdénites, elles-mêmes co-produits des concentrés de cuivre des porphyres cuprifères à hauteur de 47 %.

Le délaissement de la production de concentrés de cuivre sulfuré pour une raison économique, par exemple au profit de minéralisations oxydées dans les mêmes types de gisements, pourrait remettre en cause une partie de la production primaire de rhénium. Les minerais alors extraits et/ou les méthodes de traitement auront alors changé, et ne mettront pas forcément en place des procédés de récupération du rhénium.

Cette dépendance forte de la production primaire de rhénium aux multiples évolutions possibles de la filière cuivre dans le futur ne permet pas de dresser de perspectives nettes sur l'évolution des capacités de production primaire sur le long terme. Elle ne permet pas non plus à l'inverse d'en dresser un panorama pessimiste.

Pour ce qui est du court terme, un bilan des capacités de production en rhénium des installations métallurgiques actives en 2009 montre que ces capacités avoisinent les 71 t/an (Tableau 10). Ce tonnage représente une réserve de capacité de 35 % par rapport à la production primaire maximale de l'année 2007, et un chiffre supérieur au pic de consommation mondiale qui avait atteint 65 t la même année. À l'heure actuelle, la capacité de production primaire à elle-seule est donc en mesure de satisfaire la demande mondiale.

Pays	Sociétés	Capacité de production (kg Re/an)	% de la capacité mondiale
Chili	Molymet	40 000	56,1
Kazakhstan	Zhezkazganredmet (Redmet), Yuzhpolimetal	8 650	12,1
États-Unis	Freeport McMoRan	8 000	11,2
Pologne	KGHM Ecoren	5 000	7,0
Ouzbekistan	Navoi	5 000	7,0
Chine	Jiangxi Copper	1 800	2,5
Arménie	ZCMC, Plant of Pure Iron, Armenian Moly.	1 500	2,1
Russie	Uralelectromed	1 000	1,4
Ossétie du Nord	Pobedit	325	0,5
TOTAL		71 275	

Tableau 10 : Compilation mondiale des principales capacités métallurgiques de production en rhénium en 2009 (source : Roskill, 2010 [2]).

De nouveaux projets miniers sont de plus en plus en développement. Le tableau suivant (Tableau 11) recense les prochains gisements sur lesquelles les études de faisabilité pourraient conduire à leur mise en production d'ici 2013. Parmi ceux-ci les plus probables sont :

- Agua Rica (Yaman Gold) en Argentine ;
- Merlin (Invanhoe) en Australie ;
- Pine Tree aux États-Unis ;

- Zunn Mod en Mongolie.

Pays	Société	Projet/Lieu	Caractéristiques	Ressources	Etat/démarrage opérations
Argentine	Yamana Gold	Agua Rica	Cu-Au-Mo	16 Mt à 0,6% Mo(10g/t Re)	2013
Australie	Syndicated metals/Kings Minerals Ivanhoe Australia	Kalman, Queensland Merlin, Queensland	Cu-Mo-Au-Re Mo-Re-Cu-Ag	49,7 Mt à 0,06% Mo 9 Mt à 0,94% Mo	Exploration 2012-2013
Canada	Torch River Resources	Red Bird	Mo	75 Mt à 0,0065% Mo	Exploration / Scoping
Etats-Unis	Freeport McMoRan	Climax Colorado	Mo - réouverture	6,8	Suspendu 2008
	Mexivada	Moly Dome, Nevada		...	Exploration
	Mosquito Consolidated Gold	Pine Tree, Nevada Spruce Mountain, Nevada	Cu-Mo-Re-In-Ga-Au-Ag Mo-Au-Ag-Pb-Re	500 Mt à 0,06% Mo, 100ppb Re >200 Mt	Faisabilité d'ici 2013 Exploration
Mongolie	Erdene Resource Development	Zuun Mod	Mo-Cu-Re	121 Mt à 0,06% Mo	Pré faisabilité en 2010
Serbie	Dundee Precious Metals	Surdulica	Mo-Re		Scoping

Tableau 11 : Liste probable des prochains projets miniers producteurs de rhénium d'ici 5 ans (source : Roskill, 2010 [2]).

De plus, d'ici 2014, des capacités métallurgiques supplémentaires de production primaire de rhénium vont voir le jour au Chili, aux États-Unis, en Australie et en Pologne. Ces nouvelles capacités pourraient approcher les 30 tonnes de rhénium par an en 2014 (Tableau 12).

Société	Pays	Capacités additionnelles de production primaire (kg Re/an)	Date de démarrage
Xstrata	Chili	3 500 ¹	2009 ²
KGHM	Pologne	3 500 ³	2010-2012
Codelco	Chili (Chuquicamata/Rebrisa)	2 800	2010
Molybmet	Chili	3 000 ⁴	2011
Codelco	Chili	6 000 ⁵	2011 ⁵
Ivanhoe	Australie	6 - 7000	2011
Kennecott Utah Copper	Etats-Unis	4 000	2012
Total		28 800 - 29 800	

1 - Estimé à partir des prévisions d'augmentation de capacité de production de molybdène à Altonorte (Cu-Mo)

2 - Repoussé à une date indéterminée compte-tenu des conditions du marché

3 - Prévisions soumises aux conditions du marché

4 - Expansion à partir des capacités actuelles

5 - Estimé à partir des prévisions de capacités de production en molybdène de la fonderie de de Meijllones. Probablement dépendante de la réouverture de Chuquicamata

Tableau 12 : Capacités supplémentaires de production primaire de rhénium à venir d'ici 2014.

Par la somme des capacités de production primaire actuelles et à venir d'ici 2014, soit 100 t/an, on voit bien que sur le court terme, à lui seul, le secteur métallurgique du rhénium paraît bien armé pour supporter les évolutions à venir du marché.

Le second facteur qui conditionne l'évolution de la production de rhénium pour le futur est la part déjà prise par la production secondaire dans la production globale et la croissance de cette dernière.

Le Tableau 13 montre qu'en 2009, les capacités mondiales des productions secondaires avoisinent les 30 t/an de Re. Plus de la moitié de ces capacités (57 %) se localisant en Allemagne. Avec les capacités supplémentaires de l'Estonie, la position européenne est donc très forte car en théorie ses capacités de production secondaire seraient en passe de couvrir plus du tiers de la consommation globale actuelle de rhénium.

Pays	Société	Production de rhénium secondaire (kg)
Allemagne	W.C. Heraeus	11 000
	H.C. starck	3 600
	Buss & Buss	2 000
Etats-unis	Gemini Industries	3 700
	Recapture Metals (Neo Material Technologies)	3 000
	BASF/Englehard	1 000
	Colonial Metals	500
Estonie	Toma group	2 400
Russie/Estonie	AS Nordmet	2 000
Total :		29 200

Tableau 13 : Répartition des capacités de production de rhénium secondaire en 2009 (Roskill, 2010 [2]).

5. La filière industrielle et les principaux acteurs

Tout au long du cycle de vie du rhénium, qui va de son extraction au traitement des produits usagés, plusieurs acteurs entrent en jeu. Cependant, du fait des spécificités et de l'étroitesse du marché de rhénium (produit en tant que sous-produit, utilisé dans des secteurs de niche), peu d'acteurs se partagent les activités de chaque étape de son cycle de vie. Dans son étude sur le recyclage de certains métaux rares [19], l'ADEME publie le schéma suivant.

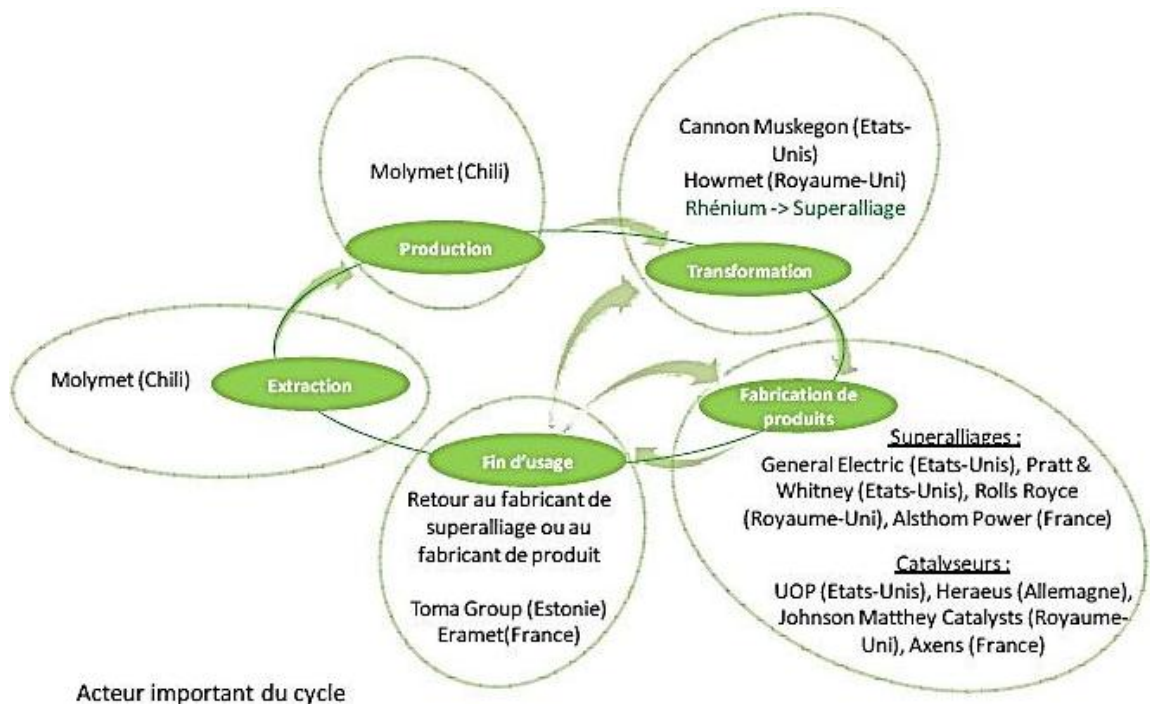


Figure 18 : Principaux acteurs intervenant dans le cycle de vie du rhénium (Monier et al. (ADEME), 2010 [19]).

5.1. DU MINERAI AU MÉTAL : ÉTAPES DE LA TRANSFORMATION

La fabrication des produits commerciaux de rhénium à partir d'un minerai sulfuré à Cu-Mo comporte deux étapes distinctes. La première permet de produire du perrhénate d'ammonium (NH_4ReO_4 , abréviation APR en anglais) qui est un produit commercial dès lors que sa composition dépasse 64,9 % de Re. Le second volet regroupe des opérations d'extraction et de purification visant à obtenir du rhénium métal avec des niveaux de pureté différents.

5.1.1. Le traitement des minerais de rhénium

Le traitement de minerai le plus représentatif de la métallurgie du rhénium est celui des minerais sulfurés à cuivre et molybdène, où la première étape sera une séparation des concentrés de molybdénite par flottation après concassage et broyage du minerai.

Le « flow sheet » (schéma de traitement) présenté en Figure 19 schématise les différentes étapes de traitement que subit un concentré de molybdène favorable à la production de perrhénate d'ammonium

Les concentrés de molybdénite sont d'abord traités par pyrométallurgie, ce qui permet leur grillage afin d'obtenir des oxydes de molybdène. Ces oxydes sont le point d'entrée de la filière métallurgique du molybdène, des gaz de combustion contenant des traces d'heptoxyde de rhénium (Re_2O_7) sous forme gazeuse, et des suies qui sont des particules solides de Re_2O_7 entraînées par les gaz.

La seconde étape consiste à effectuer une capture des gaz et des suies suivie d'un barbotage dans l'eau. La solution acide ainsi produite contient différents composés métalliques, dont des sels de molybdène et de l'acide perrhénique (HReO_4), principal porteur du rhénium. À ce stade du traitement, seulement 60 % du rhénium contenu dans la molybdénite du minerai est récupéré ; le reste est perdu.

La solution est alors rincée à la soude, ce qui permet la précipitation des sulfures métalliques. Elle est ensuite passée sur une résine échangeuse d'ions qui capte alors le rhénium.

Une fois chargée, la résine est rincée par des solvants afin d'obtenir une solution enrichie en ReO_4 . Cette solution est alors acidifiée par ajout d' HCl et de H_2S , ce qui permet la précipitation d'un composé sulfuré de rhénium (Re_2S_7).

Après filtration, le précipité subit une peroxydation (lavage à l'eau oxygénée) pour obtenir une solution de perrhénate d'ammonium qu'il suffit de faire cristalliser par évaporation et séchage afin d'obtenir un produit commercial en poudre.

Le bilan métal total avoisine alors les 50 %, ce qui met en exergue l'importance stratégique de la qualité du traitement métallurgique et de toutes ses améliorations possibles dans la problématique de l'approvisionnement futur en rhénium.

Pour les minerais cuprifères polonais sans molybdénite, le rhénium est récupéré à partir des gaz de combustion de la pyrométallurgie du cuivre. Après barbotage dans l'eau, ils produisent une solution d'acide sulfurique contenant du rhénium qui est ensuite traitée sur résine échangeuse d'ions. La chaîne du traitement rejoint alors le procédé décrit en détail plus haut jusqu'à la production d'APR.

Pour les minerais d'uranium à rhénium, une attaque à l'acide sulfurique (soit en usine, soit *in situ*) met en solution le rhénium. Il peut être ensuite être capté sur résine échangeuse d'ion comme précédemment.

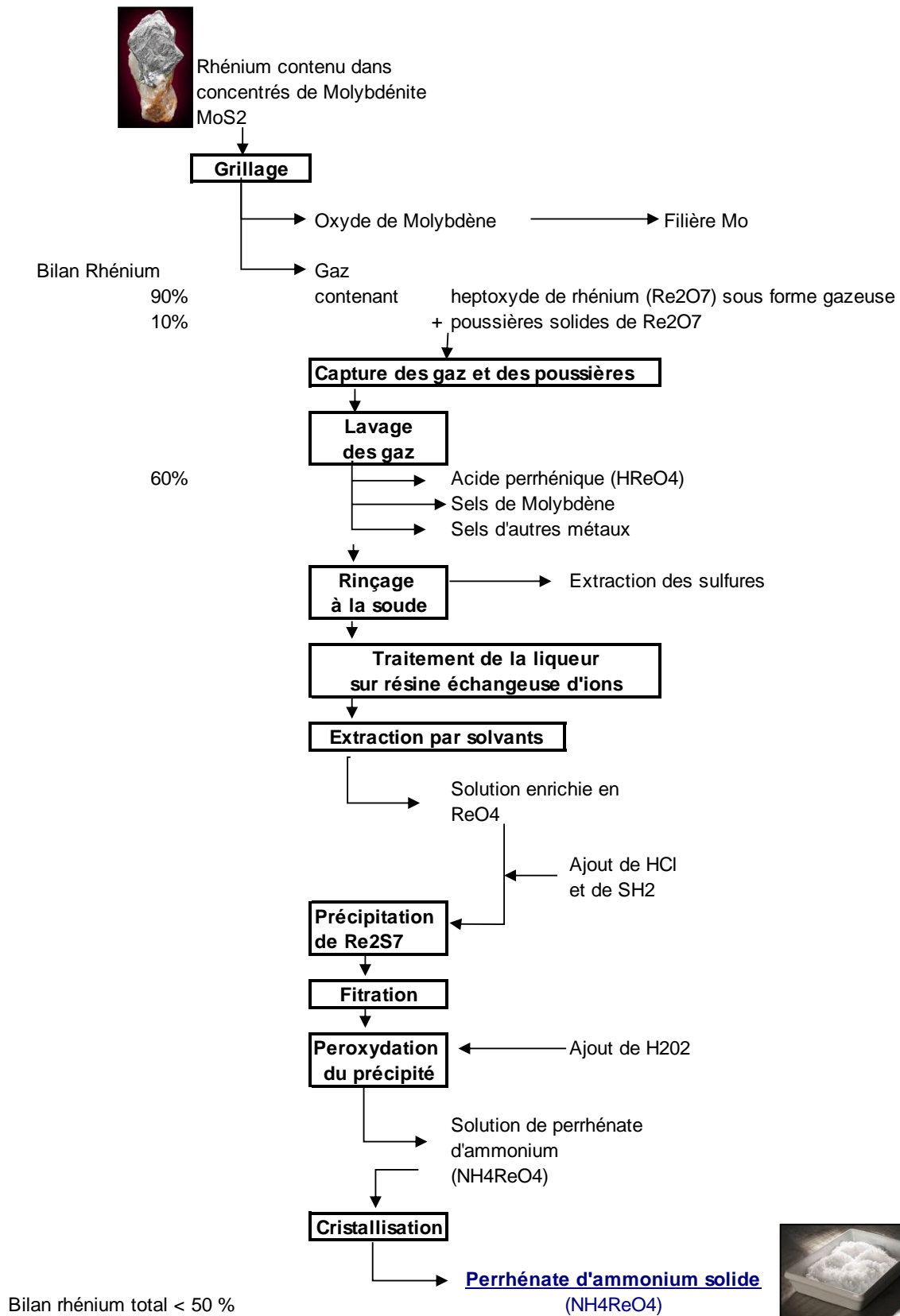


Figure 19 : Flow sheet de traitement des concentrés de molybdénite pour la production d'APR (procédé Pechiney).

Au niveau industriel, Il n'existe à ce jour aucun procédé uniquement hydrométallurgique appliqué au traitement de la molybdénite. Des recherches en laboratoire, ayant atteint pour certaines le stade de pilote, sont cependant menées en ce sens. Trois techniques sont à ce jour explorées : la lixiviation au persulfate d'ammonium ((NH₄)₂S₂O₈), l'emploi de carbonate de sodium fondu à 700-950 °C ainsi que l'électro-oxydation par des ions hypochlorite [16].

5.1.2. Purification et extraction du rhénium

À partir de perrhénate d'ammonium solide, la fabrication de rhénium métal est relativement facile, par réduction à l'hydrogène (Figure 20).

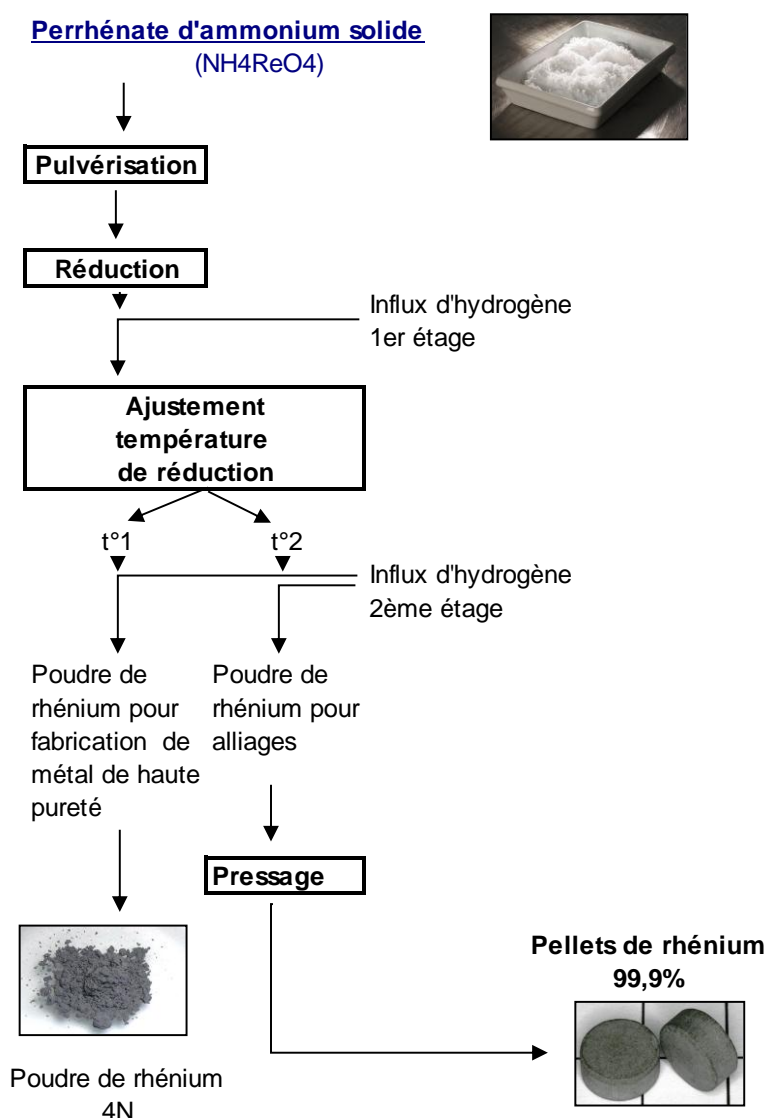


Figure 20 : Flow sheet de la transformation de l'APR en rhénium métal

La transformation de l'APR en rhénium métal s'opère en deux étapes successives d'hydrogénation qui suivent une micronisation du composé.

L'hydrogénation conduit à une réduction de l'APR.

Lors du deuxième étage d'hydrogénation, l'adaptation du flux d'hydrogène et le réglage de la température de réaction permet d'obtenir des poudres de rhénium de qualités différentes.

Une première qualité de poudre est utilisable pour la fabrication de rhénium à 99,99% (pureté 4N).

Une seconde qualité de poudre servira de base pour la fabrication de la plupart des alliages. Elle sera commercialisée après pressage sous forme de pellets à 99,9 % Re.

5.1.3. Pollution et environnement

La pyrométallurgie de la molybdénite dégage du SO₂ lors de son grillage. L'utilisation d'air enrichi en oxygène permet également de réduire le volume des gaz émis, tout en assurant une oxydation totale de la molybdénite (Blazy et Jdid, 2004 [15]). Et les gaz rejetés sont traités en particulier pour l'extraction du rhénium.

Les points sensibles, du point de vue environnemental, de la métallurgie du rhénium sont donc les suivants [15] :

- le rejet de SO₂ dans les gaz en sortie du traitement ;
- les boues de lavage, contenant Mo et Se, doivent être stockées ou retraitées ;
- les boues d'oxydation-neutralisation des solutions acides contiennent du Na₂SO₄ et doivent être stockées ;
- l'emploi de H₂S pour la précipitation de Re₂S₇ nécessite des précautions.

5.1.4. Les acteurs de la filière

Le principal producteur mondial de ce rhénium primaire est le chilien **MolyMet** (Molibdenos y Metales SA) qui, à lui seul, pourvoit à plus de 56 % à la production mondiale. Il est suivi de l'américain **Freeport McMoRan** et du polonais **KGHM Ecoren**. Les capacités de production de **Redmet** (Kazakhstan) pourraient le placer au deuxième rang mondial, mais en 2009, seulement la moitié de sa capacité était en production.

Le tableau suivant liste les principaux producteurs de rhénium métal ou d'APR. Si quelques groupes produisent du rhénium à partir de concentrés de molybdène ou de cuivre issus de mines locales, comme en partie MolyMet, Freeport McMoRan, KGHM Ecoren, Jiangxi Copper et ZCMC, la plupart des producteurs importent des concentrés à des groupes étrangers (Tableau 14).

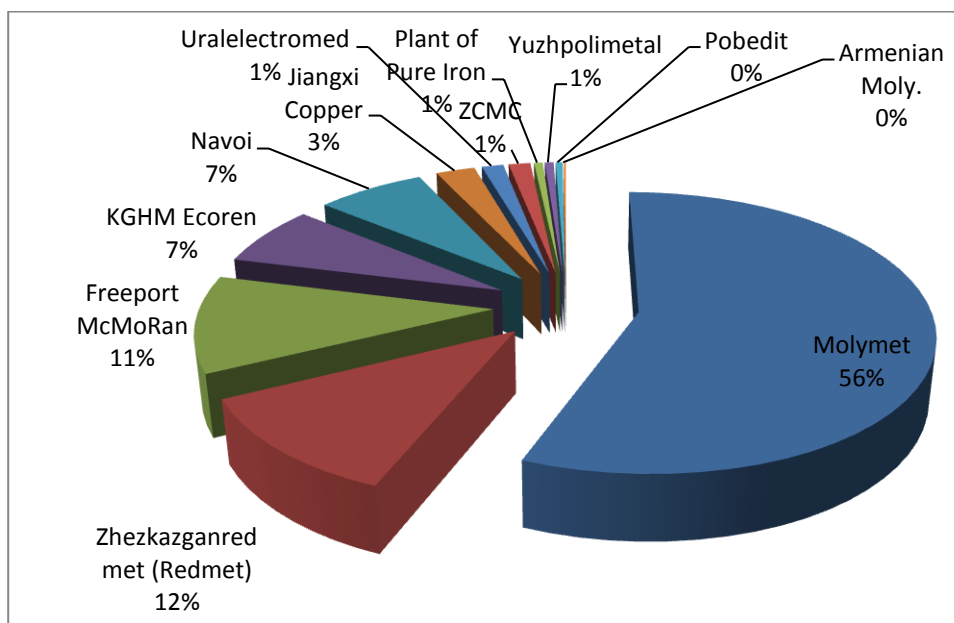


Figure 21 : Estimations des capacités de production de rhénium par compagnie en 2009 (Roskill, 2010 [2]).

Producteur	Pays	Matière première	Capacité (kg Re/an)
Molymet	Chili	MoS ₂ locale et importée	40000
Zhezkazganredmet (Redmet)	Kazakhstan	Minerais de cuivre de Zhezkazgan/Balkhash	8250
Freeport McMoRan	Etats-Unis	MoS ₂ issus de mines américaines, et poussières de conduits importées	8000
KGHM Ecoren	Pologne	Concentrés de cuivre locaux	5000
Navoi	Ouzbekistan	Anciens procédés nucléaires	5000
Jiangxi Copper	Chine	Propres concentrés de MoS ₂	1800
Uralelectromed	Russie	Mednogorsk, complexe de Gaisky	1000
ZCMC	Arménie	Propres concentrés de MoS ₂	1000
Plant of Pure Iron	Arménie	Concentrés de MoS ₂ de ZCMC	400
Yuzhpolimetal	Kazakhstan	Poussières de conduits du process du plomb	400
Pobedit	Ossétie du Nord	MoS ₂ importées de Mongolie et de Sork	325
Armenian Moly.	Arménie	Concentrés de MoS ₂ de ZCMC et AMC	100
TOTAL			71275

Tableau 14 : Principaux producteurs de rhénium primaires et nature de leur matière première (Roskill, 2010 [2]).

En particulier, le chilien Molymet a des sources d'approvisionnement très diversifiées. Le groupe détient en effet des installations de traitement et de grillage de concentrés de molybdène en Belgique (Gand), au Chili (Nos) et au Mexique (Cumobabi). Une nouvelle installation à Mejillones (Chili) devait entrer en production en décembre 2009. Il possède également une usine de métallurgie des poudres en Allemagne (Chemimetall). Si les installations de Gand et de Cumobabi ne récupèrent pas le rhénium, elles envoient leurs résidus au complexe de Nos qui est le plus grand producteur mondial de rhénium.

Les principales sources nationales de matière première rhénifère pour Molymet sont les mines à cuivre et molybdène de Chuquicamata (Codelco), Disputada (Anglo American) et de Los Pelambres (Antofagasta). Un contrat à long terme associe Molymet au chilien Codelco qui lui vend la majorité de ses concentrés de molybdène.

Le groupe importe également des concentrés de molybdène depuis ses installations belges et mexicaines. De plus, comme l'illustre le graphique suivant (Figure 22), il diversifie ses sources d'approvisionnement en achetant des concentrés partout dans le monde. Ainsi, 19 374 t de concentrés ont été importées en 2008 du Pérou.

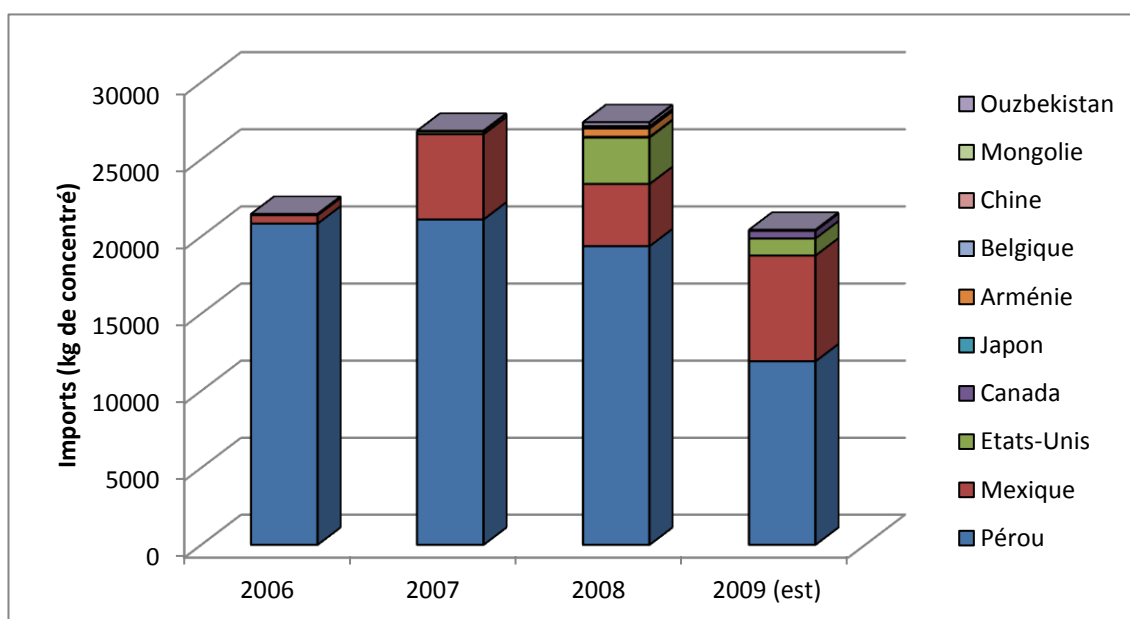


Figure 22 : Source et tonnage des imports de concentrés de molybdène de Molymet entre 2006 et 2009 (Roskill, 2010 [2]).

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

En aval de la filière se situent les procédés de transformation du rhénium en superalliage et de fabrication des produits semi-finis ou finis, tels que les catalyseurs.

5.2.1. Les acteurs français

Production de rhénium métal

Eurotungstène Poudres, filiale du groupe Eramet, produit des poudres très fines contenant au minimum 99,98 % Re dans son installation de Grenoble. Il existe 4 catégories de poudres vendues (Re1102, Re1103, Re1104 et Re1108) qui se distinguent par le diamètre de grains (variant de 1 à 5 μm) et la pureté [21]. La production annuelle n'est pas publiée. Selon Roskill [2], la capacité annuelle de production serait inférieure à 100 kg/an, mais cette production aurait été de 300kg de poudre de rhénium en 1997 (Société Chimique de France, 1997 [22]).

Fabrication marginale de produits semi-finis rhénifères

Riber SA est un des principaux fournisseurs de produits et de services destinés aux procédés sous vide [23]. Il commercialise notamment des fils de mesure de température à base de tungstène et de rhénium. Il se fournit en rhénium auprès des deux américains Concept Alloys pour les fils et Omega pour les prises thermocouple.

Acal BFI France SAS est une filiale du groupe britannique Acal BFI. Elle vend de petites quantités moly-rhénium et des gaines en rhénium à des laboratoires de recherche.

Fabrication de catalyseurs

Axens, filiale de l'IFP Energies Nouvelles, fabrique des catalyseurs contenant du rhénium pour l'industrie pétrochimique.

Superalliages dans l'industrie aéronautique

L'**ONERA**, centre de recherche aérospatial, a développé des superalliages monocristallins destinés aux turbines à haute pression des moteurs.

La **Snecma**, filiale du groupe Safran, n'utilise pas de rhénium dans ses superalliages, contrairement aux autres motoristes (Rolls Royce, General Electric et Pratt & Whitney). Elle privilégie en effet un alliage à Ni, Cr, Co, Mo..., un peu moins performant que les équivalents de General Electric, mais exempt de rhénium. Cependant, Safran envisage de réutiliser du rhénium dans un moteur développé en joint-venture avec General Electric.

Turbomeca, une autre filiale du groupe Safran, envisage d'utiliser un alliage contenant du rhénium fabriqué par l'américain Cannon Muskegon.

Électronique

Alcatel Lucent utilise de petites quantités de rhénium par an dans la fabrication de thermocouples.

Thales Electron Devices utilise du rhénium pur et en alliage avec du tungstène..

Production d'électricité

Alstom power France utilise des superalliages contenant du rhénium.

Recyclage

Eramet est en train de mettre en place une technique de recyclage des métaux contenus dans les superalliages (rhénium, cobalt, tungstène, nickel). Un pilote de recyclage sera mis en place au second semestre 2010 et devrait permettre de recycler 400 kg de rhénium. Pour obtenir cette quantité de rhénium, il est nécessaire de recycler un peu plus de 13 000 kg de déchets de superalliages (Monier *et al.*, 2010 [19]). La difficulté de cette opération est alors de collecter les produits usés, car lors du démantèlement des avions, les pièces détachées sont vendues et il est difficile de suivre leur devenir.

L'allemand **BASF** produit également de petites quantités de rhénium secondaire en France. Les tonnages ne sont cependant pas communiqués [2].

La filière française du rhénium fait donc intervenir plusieurs acteurs, notamment dans les industries de haute technologie comme l'aéronautique ou l'électronique, mais n'est pas intégrée vers l'amont. Devant les risques et incertitudes sur les approvisionnements en rhénium, ce métal est de moins en moins utilisé et risque d'être abandonné par les industriels français.

5.2.2. Autres acteurs européens

Les sociétés européennes sont très bien représentées dans les activités aval de la filière, certaines sont mêmes parmi les leaders mondiaux.

Etapas amont : rappel des principaux acteurs

Rappelons que la Pologne, par l'intermédiaire de **KGHM Ecoren**, est l'un des premiers producteurs mondiaux de rhénium. Il est en effet récupéré dans le circuit hydrométallurgique de traitement du minerai polonais afin de produire du perrhénate d'ammonium (6 t en 2009) (Polish Academy of Sciences, 2007 [11]).

La filiale belge de Molymet, **Sadaci**, procède au grillage de concentrés de molybdène importés des Pays Bas et des États-Unis majoritairement. L'installation de Gand a une capacité d'entrée de 18,5 kt/an de concentrés de Mo, ainsi que d'1 kt/an de molybdate de sodium, de 4 kt/an de ferrovanadium et une installation de recyclage des catalyseurs. Les résidus de grillage enrichis en rhénium sont ensuite expédiés au Chili où ils sont récupérés dans les installations de Molymet (Nos). 6 t de Re par an pourraient ainsi être produites (Roskill, 2010 [2]).

Des productions historiques ont de plus été recensées dans les potasses et les shales cuprifères de la région de Mansfeld en Allemagne. Le rhénium y était récupéré dans

les gaz de conduits pour produire de l'APR en Allemagne mais aussi à Outokumpu en Finlande. L'exploitation de cuivre dans cette région s'est achevée en 1990.

Les intermédiaires et traders

Le groupe britannique **Lipmann Walton** est l'un des plus grands revendeurs sur le marché du rhénium. Il commercialise des pellets de rhénium (produits par l'allemand W.C. Heraeus) utilisés dans les alliages à base nickel des turbines, ainsi que du rhénium métal produit dans les pays de la CEI. Le groupe achète et vend également des ferrailles d'alliages Mo-Re et W-Re [2].

Johnson Matthey (Royaume Uni) a signé un contrat de 5 ans avec le polonais KGHM Ecoren pour l'approvisionner en APR. Le devenir de cet APR n'est pas clair, il est soit transformé par le britannique, soit vendu directement aux fabricants de catalyseurs. Johnson Matthey commercialise ainsi des APR de qualité basique et catalytique, de l'acide perrhénique ainsi que des poudres et pellets de rhénium métal.

Les superalliages

Le motoriste anglais **RollsRoyce** est l'un des trois leaders mondiaux sur le marché des superalliages, représentant à lui seul 14 % de la consommation mondiale en superalliages. Le groupe vient de signer un contrat de 5 ans avec KGHM Ecoren, en Pologne.

Les fils et filaments

Depuis son acquisition d'**Engelhard**, l'allemand **BASF** développe et produit des thermocouples à W-Re. Cet assemblage permet en effet de mesurer des températures jusqu'à 2 800 °C, contre seulement 1 200 °C dans le cas des thermocouples basiques.

Les catalyseurs

L'allemand **W.C. Heraeus** fabrique et recycle des catalyseurs. Sa capacité de production de rhénium secondaire estimée à 11 t/an, associées aux 3,63 t/an de **H.C. Strack** et aux 2 t/an de **Buss&Buss** placent l'Allemagne au rang de deuxième producteur mondial de rhénium secondaire (premier jusqu'en 2008). Il est important de souligner que le recyclage des catalyseurs est une boucle fermée, donc sur une capacité annuelle de 11 t, seules 2 t sont injectées sur le marché, le reste retournant aux fabricants de catalyseurs.

Le recyclage

Sadaci, filiale de Molymet, recycle des catalyseurs dans son installation de Gand par calcination dans un four rotatoire. Les volumes recyclés ne sont pas publiés.

Toma Group, basé à Tallinn en Estonie, a produit du perrhénate d'ammonium à partir du traitement de ferrailles depuis 1999. Une grande variété de déchets y est traitée: alliages W-Re ou Mo-Re, poudres, fils, anodes à Re-Mo (cibles), APR impur et

ferrailles de rhénium métal. La capacité de production d'APR basique est de 1 800 kg/an. La compagnie travaille essentiellement avec des entreprises américaines et européennes.

5.2.3. Les principaux acteurs dans le reste du monde

Les superalliages

Cannon Muskegon (États-Unis) est l'un des premiers producteurs de superalliages à base de nickel et de cobalt. Il fabrique ainsi la gamme de superalliages monocristallins CMSX qui contiennent 3 à 6 % Re pour des applications aérospatiales et médicales.

L'américain **General Electric** est l'un des principaux consommateurs mondiaux de superalliages avec 22 % de la demande mondiale en 2009. Il utilise des alliages rhéniés dans les secteurs aéronautiques (GE Aircraft Engines), de la santé (GE Medical Services) et de l'énergie (GE Power Systems). Rappelons que CFM International, joint-venture entre la Snecma et GE, a représenté 22 % de la demande mondiale en superalliages en 2009.

Pratt & Whitney (États-Unis) est lui aussi l'un des premiers consommateurs mondiaux de superalliages à rhénium qu'il utilise dans la fabrication de moteurs d'avions. En 2009, sa demande s'est élevée à 11 % de la demande mondiale en superalliages [2].

Les catalyseurs

Les principaux groupes pétroliers possèdent une filiale dédiée à la fabrication de catalyseurs destinés au raffinage du pétrole. Ainsi, **Criterion catalyst**, filiale de CRI qui fait lui-même partie de la multinationale **Shell**, est un producteur majeur de catalyseurs pour le raffinage et les procédés pétrochimiques. Ils développent également des catalyseurs destinés à la technologie GTL. Parmi ses produits manufacturés, il vend des catalyseurs de réformage à Pt-Re [2]. **Exxon Mobil** fabrique également des catalyseurs.

L'américain **UOP** du groupe Honeywell fabrique des catalyseurs pour le réformage pétrolier.

Indian Petrochemicals fabrique toute une gamme de produits issus ou destinés à l'industrie pétrochimique : polymères, fibres synthétiques, solvants, catalyseurs de réformage, absorbants, surfactants et polyesters. Les catalyseurs sont fabriqués dans leur installation de Vadadora (Inde).

Le groupe chinois **Sinopec** (China Petroleum & Chemical Corporation Limited) est le plus grand raffineur pétrolier d'Asie en termes de volume traité. Sa maison mère, Sinopec Group, est l'une des compagnies pétrolières majeures en Chine, totalement intégré tant à l'aval qu'à l'amont de la filière (exploration pour le pétrole et le gaz, raffinage, transformation, vente de produits pétrochimiques).

Petro SA (Petroleum Oil and Gas Corporation of South Africa) est la compagnie pétrolière nationale d'Afrique du Sud. Elle est l'un des pionniers de la technologie GTL. En 2002, une joint-venture a été signée entre Petro SA, le norvégien *Statoil* et la filiale d'Air Liquide **Lurgi** afin de développer la technologie Fischer Tropsch (FT) dans le procédé GTL [24].

Les fils et filaments

Rhenium Alloys des États-Unis est le principal producteur mondial de fils à W-Re et Mo-Re. Cette compagnie s'est spécialisée dans le secteur du rhénium et fabrique une large gamme de produits : poudre de rhénium, pellets, barres à plus de 99,99% de pureté. Sa capacité de production pour l'ensemble des produits est de 23 t/an.

L'américain **Concept Alloys** fabrique des fils de thermocouple à W-Mo. Certains assemblages contiennent jusqu'à 26 % de rhénium [2].

Le recyclage

L'américain **Gemini Industries** possède la plus grande capacité de retraitement des catalyseurs usés d'Amérique du Nord. Il travaille essentiellement pour les industries pétrolières et pétrochimiques. Grâce à l'acquisition récente de Zodiac Enterprises au Texas, sa capacité de production devrait augmenter d'ici les 10 prochaines années pour atteindre 5 500 kg/an [2].

Recapture Metals, filiale du groupe américain Neo Material Technologies, recycle des ferrailles de superalliages (CSMX4, ReneN5...) et d'alliages à Pt-Re. Ils recyclent également des ferrailles à gallium et indium. En 2008, leur production de rhénium secondaire était de 3 000 kg (Roskill, 2010 [2], Recapture Metals [25]).

6. Conclusions

6.1. SYNTHÈSE DES CRITICITÉS

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	3	1	2	3	3
<p>Les gisements contenant du rhénium sont nombreux et géographiquement bien répartis (Europe, Amérique, Asie, Australie). Le rhénium est cependant systématiquement un sous-produit, sa production est dépendante des porphyres cuprifères (80 %).</p>	<p>La pérennité des filières cuivre est assurée à court et moyen termes. Les raffineries chiliennes traitent des concentrés nationaux mais également étrangers (péruvien en majorité) et concentrent significativement la production de rhénium.</p>	<p>Une politique de restrictions 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 lors du grillage de la molybdénite. Peu de choses sont connues à propos de la toxicité du rhénium et de ses composés.</p>	<p>Au niveau européen, seul le polonais KGHM Ecoren produit du rhénium primaire. La croissance de la production secondaire est un important facteur de détente de la criticité. Cette production secondaire est de plus à 40 % européenne.</p>	<p>Le rhénium est difficilement substituable dans la catalyse. Avis partagé des industriels sur sa substituabilité dans les superalliages. Utilisation dans des secteurs de niches, mais stratégiques.</p>

Tableau 15 : Composantes de la criticité du rhénium.

La criticité moyenne sur les approvisionnements est évaluée à « modérée » (2,5 sur 5 en synthèse des composantes du tableau 15 ci-dessus), vu l'éventail des producteurs et les quantités minimales utilisées par les industriels français. À noter cependant que c'est justement parce que l'approvisionnement posait problème, avec en conséquence un prix très élevé en 2008, que le motoriste Snecma (Groupe Safran) a cherché à s'affranchir du rhénium dans ses superalliages, contribuant ainsi à réduire la tension sur la demande.

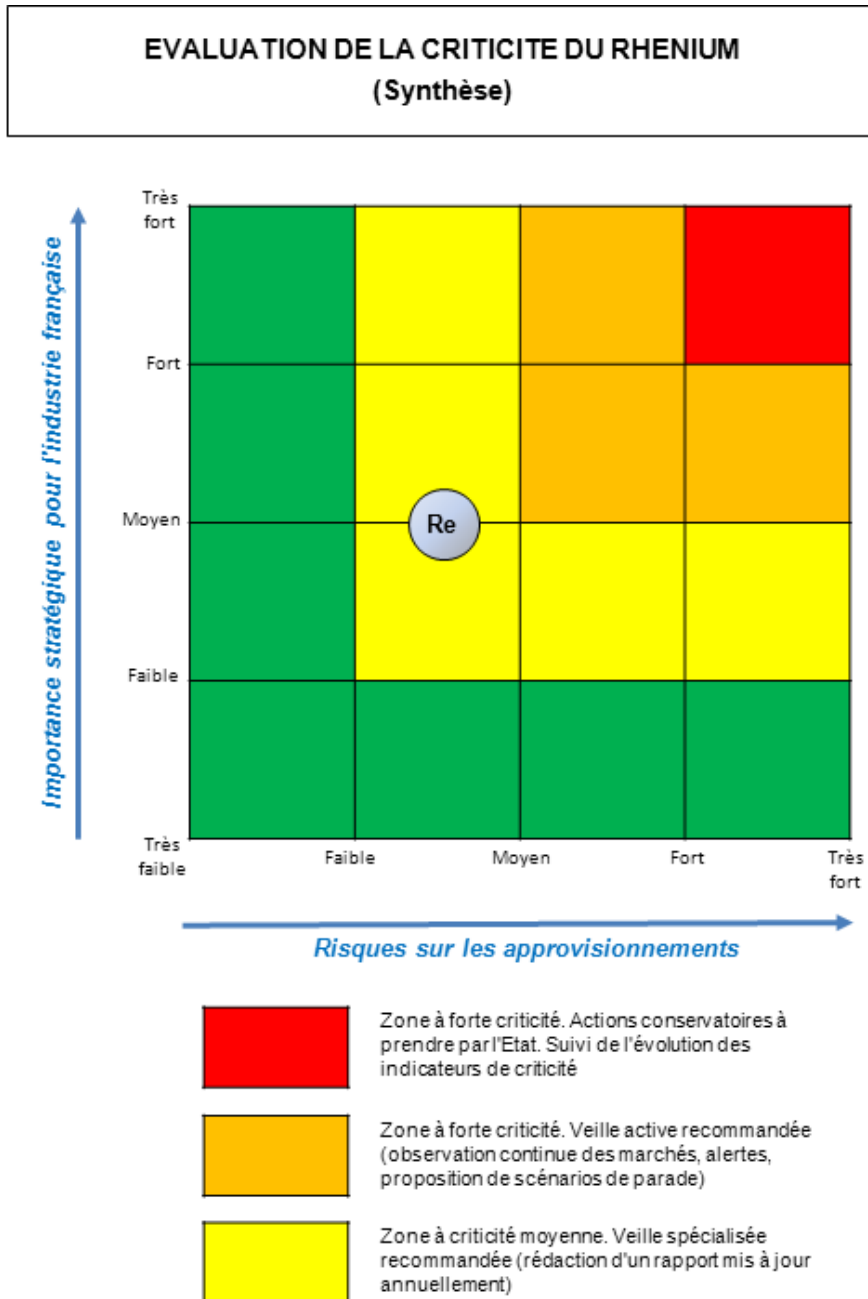


Figure 23 : Synthèse de la criticité du rhénium.

Au niveau impact, le rhénium est variablement critique pour les sociétés utilisatrices (Eramet, Turbomeca, Axens, Groupe Thales, Alcatel Lucent, etc.). Mais les marchés concernés sont des activités de niche et les tonnages utilisés sont faibles (quelques dizaines à quelques centaines de kg). On peut donc l'évaluer à « moyenne » (3/5), avec une sensibilité particulière pour la catalyse.

La synthèse des criticités est résumée par la figure 23.

6.2. STRATÉGIES D'ACTION

Il existe une certaine inquiétude, même si elle est modérée, de la part des industriels français quant à leurs approvisionnements en rhénium et aux impacts qu'auraient une pénurie ou une nouvelle flambée des prix.

6.2.1. Sécurisation des approvisionnements

Des contrats à terme pourraient être signés entre les producteurs et les utilisateurs français, à la manière de Rolls Royce qui vient de passer un contrat de cinq ans avec le polonais KGHM Ecoren. Ces accords permettent d'assurer les approvisionnements sans passer par des intermédiaires ainsi que de garantir une plus grande stabilité des prix.

Le passage d'accords bilatéraux, notamment avec le Kazakhstan, est également conseillé. En marge des porphyres cuprifères d'où sont extraits 80% du rhénium primaire, les grès cuprifères de Dzhezkazgan représentent la deuxième ressource la plus importante en rhénium minier.

6.2.2. Développement d'une veille technologique

Les industriels français s'inquiètent de la disponibilité future du rhénium sur le marché en cas de développement important du secteur aéronautique, qui à lui seul, constitue 60 % de la demande mondiale.

À l'heure actuelle, les leaders mondiaux adoptent des positions différentes pour la conception de leurs superalliages. General Electric tend, en effet, à fortement limiter, voire à abandonner complètement l'utilisation du rhénium. Snecma l'a abandonné. Rolls Royce va continuer à l'utiliser comme le confirme sa signature d'un contrat à long terme avec KGHM Ecoren. Nous ne possédons pas d'information sur la politique de Pratt & Whitney.

Une veille technologique sur le secteur particulier des superalliages est donc recommandée afin de suivre les stratégies adoptées par les principaux utilisateurs. Elle permettra ainsi de faire des bilans réguliers de leur demande en rhénium et de sa disponibilité sur le marché. En cas de diminution du volume de rhénium disponible, ces études serviraient de point d'appui aux industriels afin de développer des produits alternatifs.

Le secteur de la catalyse est également à suivre. En effet, si les projets d'installations GTL se concrétisent, les besoins en rhénium de ce secteur pourraient plus que doubler d'ici 2015.

6.2.3. Développement du recyclage

Une étude de l'ADEME en 2010 [19] indique qu'Eramet est le seul industriel français à s'être intéressé au recyclage du rhénium. Le groupe est en effet en train de mettre en place une technique de recyclage des métaux contenus dans les superalliages (rhénium, cobalt, tungstène, nickel). Un pilote devait être mis en place au second semestre 2010 et devrait permettre de produire 400 kg de rhénium recyclé.

La difficulté de cette opération est alors de collecter les produits usés, car lors du démantèlement des avions, les pièces détachées sont vendues et il est difficile de suivre leur devenir. La filière du recyclage française gagnerait ainsi d'une orientation privilégiée vers elle des produits rhéniés en fin de vie. L'ADEME estime en effet à 45 kg/an le gisement de rhénium collectable en France.

La filière du recyclage des catalyseurs qui contiennent du rhénium n'est, semble-t-il, que très peu présente en France. La grande majorité des déchets issus de ce secteur sont récupérés par leurs producteurs Heraeus et Johnson Matthey, mais il est possible que la société française Eurecat régénère également des catalyseurs pouvant contenir du rhénium.

6.2.4. Développer la connaissance du potentiel minéral français et européen

Lors des travaux de l'inventaire du potentiel minéral français, le rhénium, comme d'autres métaux mineurs, n'était pas recherché. Aussi, l'absence annoncée de ressources sur le territoire métropolitain traduit pour une part un manque de données.

Aussi, en cas de relance générale de collecte d'informations sur le potentiel minier de la France, une évaluation des teneurs en rhénium des minerais déjà connus pour leur contenu en molybdène, ou des formations gréseuses à contenu en uranium du Sud de la France, pourrait être proposée.

Au niveau européen, des programmes de partage des connaissances sont déjà en place et doivent être poursuivis. Ils permettront d'évaluer le potentiel de l'Union Européenne en ressources primaires non développées, et celui des gisements anthropiques constitués par les résidus historiques des activités extractives et métallurgiques. Sur cet axe, de nouveaux programmes de collectes de données permettant cette identification pourraient également être lancés.

Bibliographie

- [1] **Olivier Zajec, Mathieu Anquez (CEIS)** (2010) - Stratégies de sécurisation des approvisionnements en matériaux critiques. Audit de perception industrielle : Béryllium, Molybdène, Rhénium, Sélénium, Tellure, 2010, p 95
- [2] **Roskill** (2010), Rhenium market outlook to 2015 – Eighth edition – Roskill (Londres, Royaume-Uni), 2010, 131 p.
- [3] **Kirk Othmer** (1978) - Encyclopedia of Chemical Technology, Vol. 4, 3rd edition, 1978
- [4] **Metal Price**, Page sur le rhénium www.metalprices.com/FreeSite/metals/re/re.asp
- [5] **Johnson Matthey NY group**, Prix des éléments du groupe du platine www.johnsonmattheyny.com/priceChart
- [6] **Ultramet**, page sur les chambres à combustion à Ir-Re www.ultramet.com/propulsion_system_components_liquid_rocket.html
- [7] **Ultra Minor Metals Ltd**, Ultra high purity refractory metals research centre www.rheniumet.com/english/products2.asp?id=82
- [8] **Metal Pages**, Page sur le rhénium www.metal-pages.com/metalprices/rhenium/
- [9] **Dilworth, Jonathan R., Parrott, Suzanne J.** (1998) - The biomedical chemistry of technetium and rhenium, in *Chemical Society Reviews* 27: 43–55, 1998.
- [10] **Alexander Sutulov** (1976) - Molybdenum and rhenium recovery from porphyry coppers, 1976, 259p.
- [11] **Polish Academy of Sciences** (2007) - Minerals yearbook of Poland 2007, p. 377-378, 511p
- [12] **Bechtel A. et al.** (2000) - The Occurrences of the rare earth elements and the platinum group elements in relation to base metal zoning in the vicinity of Rote Fäule in the Kupferschiefer of Poland, in *Applied Geochemistry* vol. 16, p. 375-386
- [13] **Hammer J. et al.** (1990) - Element and isotope geochemical investigations of the Kupferschiefer in the vicinity of the “Rote Fäule”, indicating copper mineralization (Sangerhausen basin, G.D.R.), in *Chemical Geology* n° 85, 1990, p. 345-360
- [14] **Piestrzynski A., Sawlowicz Z.** (1999) - Exploration for Au and PGE in the Polish Zechstein copper deposits (Kupferschiefer), in *Journal of Geochemical Exploration* n° 66, 1999, p. 17-25

- [15] **Blazy P., Jdid E.A.** (2004), Métallurgie et recyclage du rhénium, in *Techniques de l'Ingénieur M 2 382*, 2004, 12 p.
- [16] **Rolls-Royce plc** (2009) - Market outlook 2009 – Forecast 2009-2028.
www.rolls-royce.com/Images/brochure_MarketOutlook2009_tcm92-14291.pdf
- [17] **AeroStrategy Management Consulting**, www.aerostrategy.com/
- [18] **Blazy P., Jehanne Y.** (2002) - Recyclage des métaux précieux, in *Techniques de l'ingénieur M 2 394*, 2002, 20 p
- [19] **Monier V. et al. (ADEME)** (2010) - Etude du potentiel de recyclage de certains métaux rares, 1^{ère} partie, 2010, 222 p., p. 98-105
- [20] **USGS** (2011), Mineral commodity summaries: rhenium, 2011
- [21] **Eurotungstène poudres**, catalogue en ligne http://www.eurotungstene.com/high_density_material_market.asp
- [22] **Société chimique de France** (1997), page sur le tungstène
www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/metaux/tung/textung.htm
- [23] **Riber SA**, site internet : www.riber.com/
- [24] **Petro SA**, présentation des partenaires de leur joint-venture pour le procédé GTL
www.petrosa.co.za/page.aspx?pagelId=9d45e335-3fe0-4578-8a58-350bf9ede5d
- [25] **Recapture Metals Ltd.**, page sur le recyclage. **Erreur ! Référence de lien hypertexte non valide.**
- [26] **Deschamps Y. (BRGM)** (2003) - Les enjeux du rhénium dans la filière superalliages, Consortium de recherche pour les métaux de haute technologie, 2003, 4 p.



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