



Les filières industrielles de Haute Technologie dépendent étroitement d'une large palette de métaux stratégiques : NTIC (Ta, Ge, In, Ga), superalliages (Re, Sc, Ta, Co), catalyse (Pt, Pd, Ru). Le BRGM, par son expérience et sa position de Service Géologique, a pour ambition de **fédérer la Recherche et le Développement autour de ces métaux** en considérant l'ensemble de leur cycle " du gisement au marché ".

Cette vocation intégratrice autour des métaux de l'avenir découle des compétences multidisciplinaires du BRGM, depuis la métallogénie, la minéralurgie et l'économie minérale, jusqu'aux aspects sociaux et environnementaux du développement durable.

### Métallogénie

- ▣ Synthèses métallogéniques multi-échelles (du continent au gisement) : S.I.G. et cartes de prédictivité minière.
- ▣ Compréhension des processus de formation des gisements.
- ▣ Modélisation géologique des gisements non conventionnels en tant que nouvelles sources d'approvisionnement.
- ▣ Identification de nouveaux gisements associés aux résidus de traitements métallurgiques.
- ▣ Caractérisation minérale des minerais et spéciation ; identification de métaux valorisables.

➤ **Moyens analytiques de pointe au service de la métallogénie : analyses chimiques infra-traces, analyses chimiques in situ, isotopie, inclusions fluides, etc.**

### Minéralurgie

- ▣ Expertise en procédés physiques de valorisation (broyage, gravimétrie classique et centrifuge, flottation, magnétisme) et R&D liée aux procédés de valorisation chimiques (hydrométallurgie, SX-EW).
- ▣ Expertise en biolixiviation des minerais et biotraitement des résidus solides (déchets métallurgiques, tailings, etc).
- ▣ Développement de logiciels de simulations de procédés (USIM-PAC), bilan matière (BILCO) et procédures d'échantillonnage (ECHANT).

➤ **Moyens : laboratoires (450 m<sup>2</sup>) et usine pilote (2 000 m<sup>2</sup>) pour broyage, flottation, biotechnologies, hydrométallurgie.**

### Economie minérale

- ▣ Modélisations des comportements des marchés et prospective ; scénarii offre / demande.
- ▣ Cycles des métaux : dynamique des cycles, analyse des points de rupture. étude de risques par filière, impacts des innovations technologiques.

➤ **Analyses prospectives, anticipation des crises.**

Contact  
[metaux.hightech@brgm.fr](mailto:metaux.hightech@brgm.fr)

Y. Deschamps [y.deschamps@brgm.fr](mailto:y.deschamps@brgm.fr)

**BRGM**  
 3, avenue Claude Guillemin  
 BP 6009  
 45060 Orléans Cedex 2, France

+33 (0)2 38 64 34 34

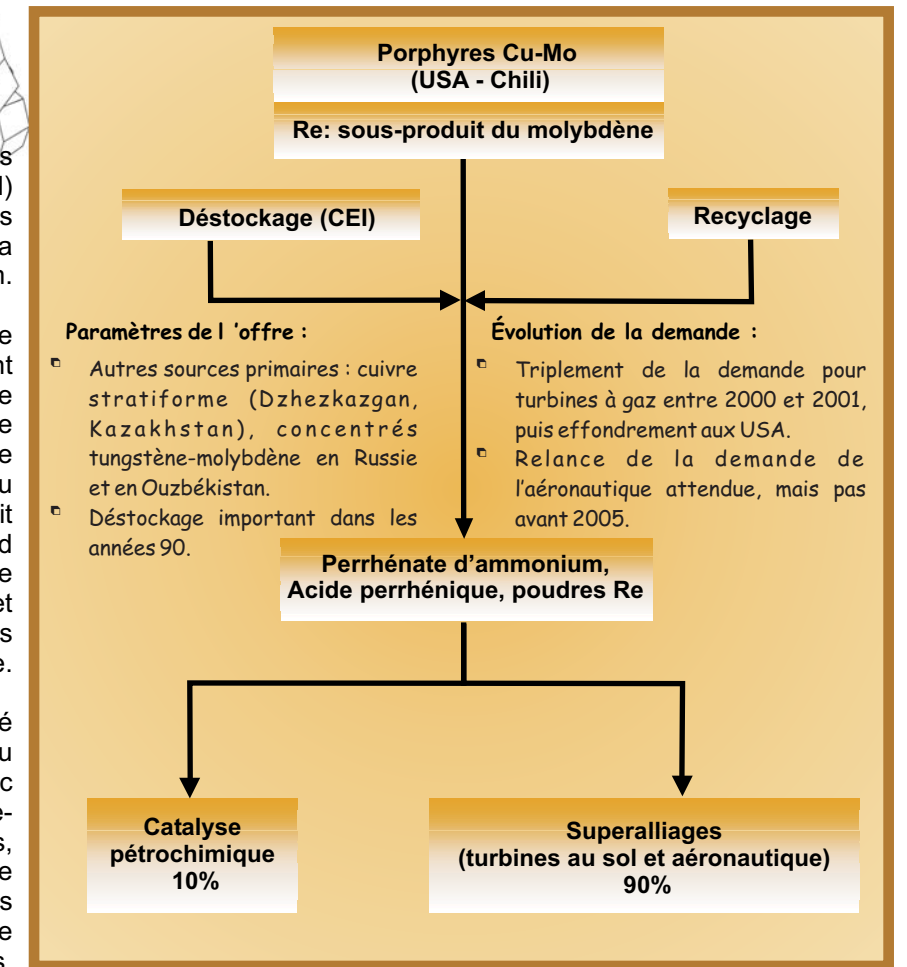
Juin 2003



Le développement des superalliages pour turbines (aéronautique et au sol) devrait accroître de manière très significative à moyen terme la demande en rhénium.

L'offre primaire de Re, sous-produit de sous-produit, est étroitement dépendante d'un seul type de gisement : les porphyres à cuivre molybdène, dans lesquels le molybdène est un sous-produit du cuivre, et le rhénium un sous-produit du molybdène. Or, on ne comprend toujours pas comment se distribue le rhénium dans un gisement donné, et ce qui différencie les porphyres rhénifères de ceux stériles en Re.

Il émerge de ce constat une nécessité forte en R&D aux deux extrémités du cycle du métal : axe économique, avec l'établissement de scénarios offre-demande à court et moyen termes, axe métallogénique, pour une meilleure compréhension des gisements rhénifères et la recherche de sources alternatives.



# Les enjeux du rhénium dans la filière superalliages

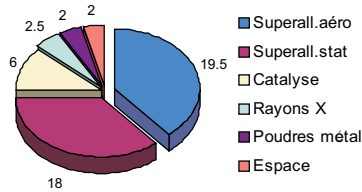
## DEMANDE

### Des utilisations protégées

- Les applications principales du rhénium (Re) sont les superalliages de haute température et la catalyse pétrochimique (Pt-Re).
- Il n'y a pas de menace réelle de substitution de Re dans ses applications les plus importantes à court et moyen termes.

### Une consommation basée sur les superalliages

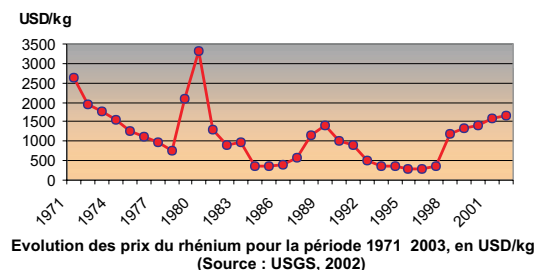
- En 2001, 75% de la demande de Re était assurée par les consommateurs de superalliages : secteur aéronautique (réacteurs), turbines de générateurs électriques stationnaires.
- Le secteur des turbines à gaz a connu un triplement de la demande entre 2000 et 2001, mais a baissé par la suite. Le secteur aéronautique ne devrait redémarrer vraiment qu'en 2004-2005.



Répartition de la demande de rhénium (en t) en 2001 (Source : Lipmann Walton, 2001)

### Des prix encore très volatils

- Une réduction de la production en Amérique du Nord, couplée à une anticipation de forte demande du secteur pétrolier provoque en 1979 et 1980 une flambée des prix du Re, qui atteint 3300 USD/kg.
- Cette situation induit une surproduction, suivie d'un effondrement du cours à 350 USD/kg au milieu de la décennie 80.
- De 1991 à 1997, le marché mondial est déstabilisé par le déstockage d'APR (Ammonium Perrhenate) et de déchets d'alliages riches en Re issus des stocks militaires de l'ex-URSS, provoquant l'effondrement du prix à un bas historique de 300 USD/kg.
- Depuis, le tarissement des stocks russes et la relance du secteur des superalliages s'accompagnent d'une remontée des prix du métal autour de 1500 USD/kg en 2003.



Evolution des prix du rhénium pour la période 1971-2003, en USD/kg (Source : USGS, 2002)

## OFFRE

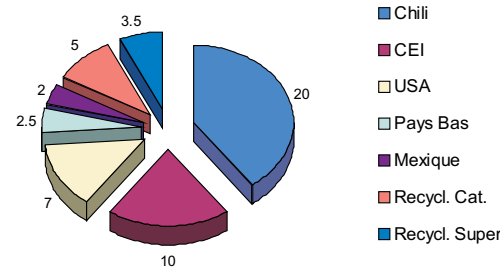
### Les sources primaires

Le rhénium primaire est produit :

- pour plus de 80 % de l'offre totale à partir de concentrés de molybdénite (MoS<sub>2</sub>), sous-produit de l'exploitation de certains porphyres cuprifères (USA, Chili, CEI), seule source d'approvisionnement en Re primaire du monde occidental.
- pour environ 10 % en sous-produit de l'exploitation de cuivre sédimentaire (Dzhezkazgan, Kazakhstan).
- pour environ 5 à 10 % en sous-produit du traitement de concentrés W-Mo (Russie, Ouzbékistan).

### Une offre secondaire importante

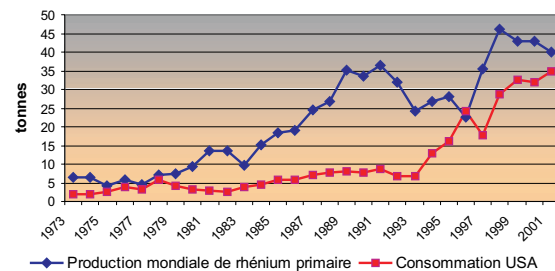
- Il n'existe pas de stocks officiels de Re, mais le déstockage a joué un rôle très important au milieu des années 90.
- Le recyclage est une source importante, pouvant représenter près de 20% de l'offre annuelle (17 % en 2001). Ce métal recyclé est issu de catalyseurs Pt-Re (industrie pétrolière), d'anodes Mo-Re (60/40) et W-Re (75/25) (secteur médical), de déchets de fonderie ("revert") et d'aubes de turbines de réacteurs.



Répartition de l'offre de rhénium (en t) en 2001 (Source : Lipmann Walton, 2001)

### Une production dépendante d'acteurs en nombre très restreint

- Molytmet (Chili), seul producteur pour lequel Re constitue la principale source de profit et sa filiale belge Sadaci, dominent la production primaire.
- Une baisse significative de la production des porphyry Cu-Mo de Sierrita et Bagdad (USA, Phelps Dodge), couplé à une forte reprise de la demande provoquerait une nouvelle crise du rhénium.
- Plusieurs nouveaux petits producteurs de rhénium sont annoncés : Pologne, Arménie ; la production chinoise, probablement faible, est mal connue.
- La production mondiale oscillerait entre 40 et 50 t Re par an, tandis que la capacité de production serait de l'ordre de 70 t.



Production mondiale de rhénium primaire versus consommation des Etats-Unis, 1973-2001 (Source : USGS, 2002)

### Axes R&D en économie proposés par le BRGM

- Quantification de l'évolution de la demande, établissement de scénarios offre-demande.
- Impacts du monopole croissant de Molytmet.

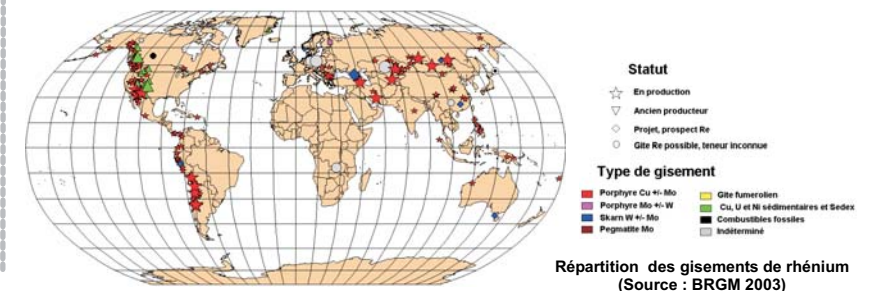
## TPOLOGIE GÉOLOGIQUE DE LA RESSOURCE

### Les porphyres Cu-Mo-(Re) : des sources fragiles, encore mal comprises

- Une vingtaine de mines, majoritairement de type porphyre à Cu-Mo produit du rhénium. Les porphyres les plus riches en Mo sont paradoxalement les plus pauvres en Re.
- Cette source est étroitement dépendante des cours du cuivre pour les gros producteurs du sud-ouest des USA.
- La croissance de l'offre primaire est liée à la récupération du métal au stade du grillage des concentrés de Mo, difficile et coûteuse (la non-récupération de Re est estimée aujourd'hui à près du quart de l'offre primaire totale).
- Les facteurs contrôlant la teneur en Re des molybdénites, hautement variable à l'échelle du district et du gisement sont encore mal compris : composition des magmas, conditions physico-chimiques de mise en place des minéralisations, etc.

### Des sources alternatives de Re, notamment en environnement de bassins sédimentaires ?

- En contexte magmatique, et hors porphyres Cu-Mo, seuls quelques skarns W-Mo et pegmatites Mo ont fourni un peu de Re. Les minéralisations fumeroliennes actives des Kouriles (Russie) sont exceptionnelles et semblent difficilement valorisables.
- En contexte sédimentaire, les grès cuprifères de Dzhezkazgan (Kazakhstan) sont la seule autre source importante de Re primaire. Re peut aussi être géochimiquement associé à l'uranium (e.g. grès uranifères du Colorado, USA). Dans le passé certains gisements Zn-Pb de type "pipe" (Mississippi Valley Type) ont généré des productions de Re (e.g. Kipushi, Congo démocratique).
- La matière organique est également favorable aux concentrations de Re : minéralisations polymétalliques à jordsite (MoS<sub>2</sub> de basse température) des "Kupferschiefer" (production KGHM, Pologne) ; indices Re des schistes noirs phosphatés à Ni-Mo (Zunyi, Chine).



Répartition des gisements de rhénium (Source : BRGM 2003)

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, Pt, Pd, Rh, Au, U, 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	Rheniite (ReS <sub>2</sub> )	Dzhezkazganite (CuReS <sub>4</sub> )	Jordsite ?, phases solubles : isemannite, Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub> , HReO <sub>4</sub>	Molybdénite	Jordsite (MoS <sub>2</sub> 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	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) ; Tyrmiauz (Russie)	Mätäsvaara (Finlande)	Kudryavyi, Kouriles (Russie)	Balkash mine (Dzhezkazgan) (Kazakhstan)	Colorado (USA)	Lubin (Pologne) ; Mansfeld (Allemagne)	Zunyi (Chine) ; Nick (Canada)	Kipushi (Rép. Démocratique du Congo)

Typologie géologique des principaux gisements de rhénium (BRGM, 2003)

### Axes R&D en métallogénie - minéralogie proposés par le BRGM

- Mieux saisir les rapports Mo/Re dans les porphyry et comprendre les caractères spécifiques des porphyres rhénifères.
- Analyse Re des concentrés de molybdénite de l'ensemble des gisements porphyriques exploités le long de la paléothéthys euro-asiatique.
- Circulation de fluides en contexte de bassin, source possible d'enrichissement en Re ; rôle de la matière organique : schistes noirs, combustibles fossiles (e.g. bitumes de l'Athabasca).