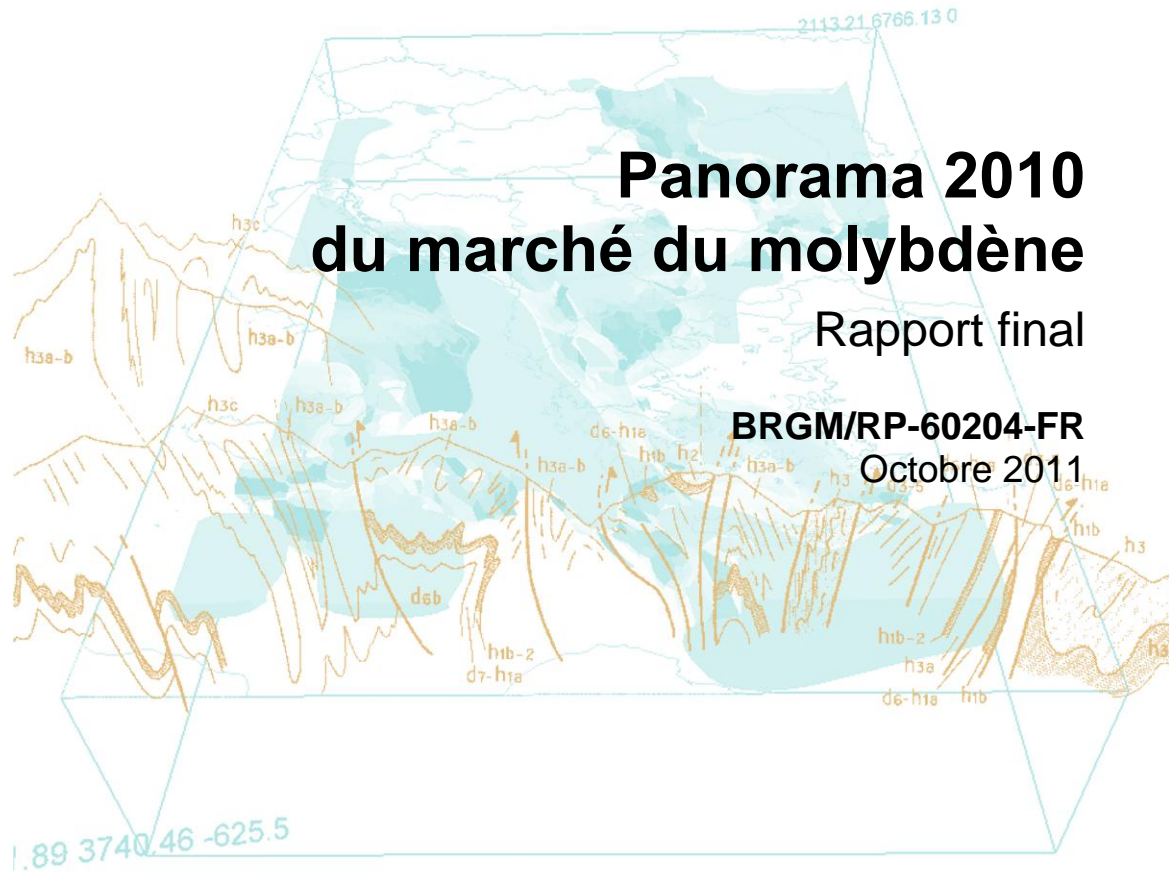


Document public



Panorama 2010 du marché du molybdène

Rapport final

BRGM/RP-60204-FR

Octobre 2011



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Panorama 2010 du marché du molybdène

Rapport final

BRGM/RP-60204-FR

Octobre 2011

F. Barthélémy, P. Christmann

Avec la collaboration de

C. Hocquard, J.F.Labbé

et de la

Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS)

Vérificateur :
Nom : J.F. Labbé
Date : 16/11/2011
Signature :



Approbateur :
Nom : C. Braux
Date : 16/11/2011
Signature :



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

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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Molybdène, Production, Ressources, Marché, Approvisionnement, Vulnérabilité, Criticité.

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

Barthélémy F., Christmann P. (2011) - Panorama mondial 2010 du marché du molybdène. Rapport final. BRGM/RP-60204-FR, 59 p., 14 fig., 5 tabl.

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

Points marquants

Le molybdène est un métal de transition dont la métallurgie ne s'est vraiment développée qu'après la première guerre mondiale.

Ses principales propriétés sont une résistance à des températures élevées, un faible coefficient de dilatation thermique, une stabilité chimique, une résistance à la corrosion, une aptitude à la liaison avec d'autres métaux, une forte conductivité thermique et électrique.

Usages

La filière des ferro-alliages représente près de 80 % de la demande mondiale en molybdène. Dans cette filière des alliages, les deux propriétés principales apportées par le molybdène sont le renforcement des qualités mécaniques à haute température (1 900-2 000 °) et la résistance à la corrosion. À titre d'exemples, il entre à des teneurs de 0,1 à quelques % dans les aciers alliés, jusqu'à 10 % dans les aciers rapides, de 2 à 7 % dans la plupart des aciers inoxydables standards, encore plus dans les inox spéciaux comme le C-22 (13 %) et le C-276 (16 %), et de quelques % à 9 % dans les superalliages.

Sous forme de composés chimiques (14 % de la consommation totale de Mo) il est notamment employé comme catalyseur dans l'industrie du raffinage en association avec le nickel ou le cobalt. Dans l'industrie des pigments et des peintures, il est employé pour limiter la corrosion, voire utilisé dans les engrais.

Enfin sous forme métallique (6 % de la consommation totale), il est utilisé seul ou sous forme alliée dans la filière électronique, les filières des réfractaires ou des verres, où son usage est privilégié dans les zones chaudes des procédés (fours). Son utilisation tend à se développer dans les écrans LCD ou les panneaux solaires, où il constitue un substratum des couches minces CIGS (Cuivre, Indium, Gallium, Sélénium).

Compte tenu de ses performances et de sa disponibilité en termes de volume et de prix, il n'y a pas d'alternative à son utilisation pour ces usages.

Offre minière

La production mondiale de molybdène était estimée à 233 000 t en 2010, dont près de 46 % proviennent de mines de cuivre. Les gisements de cuivre auxquels le molybdène est associé sont des gisements de type porphyre. Leur teneur en molybdène est généralement faible (20 à 300 ppm Mo), mais les tonnages sont élevés, ce qui autorise de telles économies d'échelle que les coûts de production du molybdène y sont souvent inférieurs à 2 \$US le kg de molybdène récupéré, chiffre qu'il convient de comparer à des prix du molybdène qui ont récemment oscillé entre 30 et 40 \$US/kg.

Le molybdène est également produit à partir de gisements de type porphyre où il est le produit principal seul ou associé à d'autres éléments : W, Au, Cu, In. Dans ces types de gisements, les coûts de production sont variables mais peuvent avoisiner les 20 \$US/kg, ce qui les rend très sensibles au prix du Mo.

Le molybdène se rencontre également dans des gisements sédimentaires exhalatifs en liaison avec des shales noirs. Des gisements de ce type, où le molybdène est associé au nickel, sont décrits et apparemment exploités en Chine. Près de 50 000 t de molybdène pourraient être produites dans ce type de gisement. L'information mériterait d'être confirmée. Ces gisements ont des coûts d'exploitation élevés, car la faible puissance des niveaux minéralisés (0,2 m à 2,0 m) implique une exploitation souterraine par nature onéreuse, même en Chine.

Enfin, bien qu'elle ne soit pas encore opérationnelle, la récupération du molybdène pourrait être envisagée en sous-produit :

- dans les gisements de cuivre en contexte sédimentaire comme les kupferschiefer de Pologne et d'Allemagne (où on estime le contenu des tailings entre 90 000 et 180 000 t de molybdène) ;
- dans les gisements de sables bitumineux (type Athabasca au Canada) où les impératifs environnementaux imposeront une récupération de tous les « éléments traces » contenus dans ces huiles lourdes.

L'offre minière telle qu'elle apparaît en termes d'offre, de capacités disponibles et de nouveaux projets montre que le marché est structurellement excédentaire en volume pour le moyen terme même en considérant une progression de la demande supérieure à la croissance du PIB mondial.

L'offre minière est diversifiée tant géographiquement qu'en termes d'acteurs. La majorité des sociétés productrices ont des capacités de production qui varient entre 1 et 8 % de l'offre totale. Seule la société américaine Freeport Mc Moran dispose d'une capacité de production représentant 14 % de l'offre totale, soit environ 31 000 t.

Position de la Chine

La Chine qui ne dispose que de 40 % de l'offre mondiale n'est pas en mesure de tuer le marché comme elle l'a fait pour d'autres ressources (tungstène, terres rares). Elle est, de plus, handicapée par des exploitations à fort coûts de production alors que les besoins de son industrie vont croissants.

À partir de 2011, le molybdène va être classé substance stratégique avec, en mesures complémentaires, le maintien de taxes élevées à l'exportation et l'imposition de quotas de production. La Chine risque donc à court terme de devenir importatrice nette de molybdène, ce qui ne devrait pas peser significativement sur les équilibres du marché mondial.

Filières industrielles et criticité

Les produits intermédiaires de la filière du molybdène faisant l'objet de négoce sont d'abord les concentrés qui sont grillés à façon par les sociétés minières ou leurs filiales, comme Climax Molybdène, filiale de Freeport Mc Moran, ou par des sociétés spécialisées indépendantes, comme la société chilienne Molymet.

Le grillage de la molybdénite permet la fabrication d'oxyde technique molybdique (OTM), produit intermédiaire clé pour tout l'aval de la filière. Conditionné sous forme de pellets ou de briquettes, il permet la fabrication de fontes. Après raffinage, il permet la fabrication des ferro-alliages. Sa transformation en molybdates d'ammonium ou de sodium alimente les filières chimiques dont celle de la catalyse.

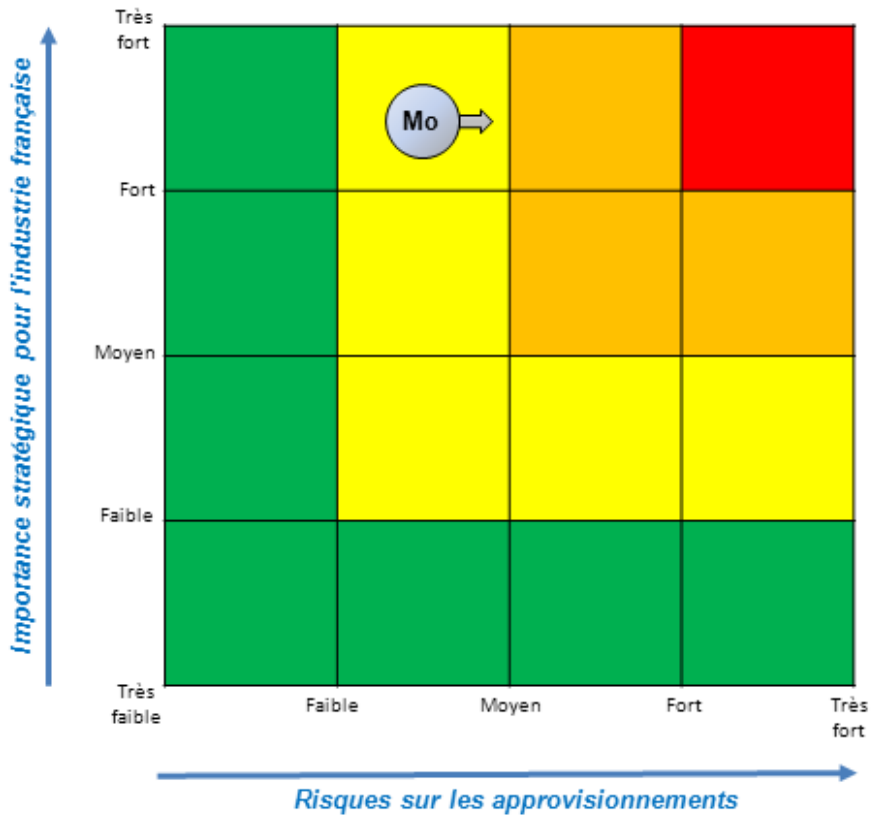
La réduction de cet oxyde permet aussi la production de poudre de molybdène, qui pourra être transformée par frittage en molybdène métal destiné à l'électronique ou à l'élaboration de pièces destinées aux secteurs de l'armement ou de l'aéronautique.

On distingue trois sous-filières principales qui présentent des enjeux différents en termes de criticité : la filière des ferro-alliages, la filière de la catalyse pétrolière et, enfin, la filière du molybdène métal et des produits alliés.

L'approvisionnement en molybdène du secteur des ferro-alliages (80 % de la consommation mondiale) est d'autant moins problématique que l'importance du recyclage accroît l'élasticité de l'offre et que la filière d'élaboration est courte entre la mine et le métallurgiste.

Pour la filière des catalyseurs pétroliers (8 % de la consommation mondiale), l'importance de la régénération et du recyclage permet une visibilité assez grande dans l'éventualité d'une tension sur les approvisionnements.

**EVALUATION DE LA CRITICITE DU MOLYBDENE
(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)

En revanche, pour la filière du molybdène métal (6 % de la consommation mondiale), la problématique d'approvisionnement peut se poser pour les produits intermédiaires, en l'absence de filières de recyclage dédiées et compte tenu de la multiplication des intermédiaires.

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

Recommandations

Compte tenu de l'analyse de criticité qui précède, les actions suivantes sont proposées :

- veille technologique spécifique aux produits de la filière molybdène pur et de ses alliages en termes de spécifications, d'évolution des techniques, d'acteurs et d'évolution de la demande ;
- développement d'un système d'informations partagées pour permettre de valider les informations accessibles et de les partager avec les acteurs de la filière ;
- travaux de recherche pour le développement de produits alternatifs moins consommateurs de molybdène ;
- encouragement du recyclage du molybdène ultra-pur ;
- développement de la connaissance du potentiel minéral français et européen.

Sommaire

Points marquants	3
1. Introduction	13
1.1. DÉFINITIONS	13
1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE	14
2. Le molybdène, généralités	17
3. Les usages	19
3.1. USAGES DU MOLYBDÈNE POUR LA PRODUCTION D'ACIERS	22
3.2. USAGES DES COMPOSÉS CHIMIQUES DU MOLYBDÈNE POUR LA CATALYSE	24
3.3. USAGES DU MOLYBDÈNE MÉTAL ET DES ALLIAGES DE MOLYBDÈNE ..	25
3.4. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DES USAGES	26
3.5. RECYCLAGE	27
4. La filière industrielle	29
4.1. STRUCTURE DE LA PRODUCTION ET RÉSERVES.....	29
4.2. LA RESSOURCE	33
4.2.1. Les porphyres	34
4.2.2. Les gisements sédimentaires exhalatifs liés à des schistes noirs	35
4.2.3. Économie des gisements : coûts de production et investissements en capital.....	37
4.2.4. Capacités de production et nouveaux projets	38
4.3. DU MINÉRAI AU MÉTAL : ÉTAPES DE LA TRANSFORMATION ET FILIERES INDUSTRIELLES.....	40
4.4. ÉVOLUTION RÉCENTE DE LA RELATION OFFRE-DEMANDE EN MOLYBDÈNE ET PERSPECTIVES	42
4.4.1. L'acier, un marché directeur parce que prépondérant (80 % des tonnages)	42
4.4.2. Un basculement de la polarité géographique de croissance marqué par le développement de la Chine	43
4.4.3. Une offre minière structurellement excédentaire	45

4.4.4. Un marché durablement fluide malgré le poids de la Chine	45
4.4.5. Des goulots d'étranglement en aval de la production minière	45
4.4.6. Nécessité d'une analyse par filières et par produits	46
4.5. LES PRIX DU MOLYBDÈNE : STRUCTURE ET SPÉCIFICITÉS.....	47
5. Conclusions	51
5.1. SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ.....	51
5.2. PARTICULARITÉS DE LA FILIÈRE MOLYBDÈNE	52
5.2.1. Une offre minière structurellement excédentaire et diversifiée	52
5.2.2. Stratégie de la Chine	53
5.2.3. Spécificité de la filière molybdène métal	54
5.3. RECOMMANDATIONS	54
5.3.1. La constitution de stocks	54
5.3.2. Le développement du recyclage	54
5.3.3. La recherche pour le développement de produits alternatifs.....	55
5.3.4. Le développement d'un réseau d'informations partagé par les entreprises	55
5.3.5. L'intégration vers l'amont de la filière.....	55
Bibliographie	57

Liste des figures

Figure 1 - Position du molybdène dans le tableau périodique des éléments	17
Figure 2 - Répartition de la consommation de molybdène suivant les produits intermédiaires concernés – Source : International Molybdenum Association (IMOA).	21
Figure 3 - Répartition de la consommation du molybdène par secteurs finaux – Source : International Molybdenum Association (IMOA).	21
Figure 4 - Domaines d'utilisation des aciers inoxydables – D'après Roskill (2009) [4].....	24
Figure 5 - Répartition de la production mondiale et des réserves minières de molybdène par pays (sources : USGS, BRGM) (mise à jour octobre 2011).....	29
Figure 6 - Répartition de la production mondiale de molybdène par pays et types de gisement en 2008. Source : USGS. Les chiffres retenus pour la Russie et la Chine sont des estimations.	32
Figure 7 - Répartition de la production minière de molybdène par sociétés en 2008, source MEG, USGS, BRGM.....	33

Figure 8 - Schéma de la filière de la production du molybdène à partir de la molybdénite, représentant les étapes de la production (cases roses) et les principaux produits intermédiaires commercialisés (cases violettes).....	41
Figure 9 - Consommation mondiale d'acier 1943-2009, en millions de tonnes. source des données : Maratray (2005) [9], [10, pour les données 2009].	42
Figure 10 - Évolution de la répartition géographique de la production mondiale d'acier entre 1998 (bleu) et 2008 (violet) - source des données : [10].	43
Figure 11 - Évolution de la production et de la consommation de molybdène primaire sur 18 ans.....	44
Figure 12 - Évolution du prix du ferromolybdène Mo 60 % du, de l'oxyde technique de molybdène, et du molybdène au LME depuis février 2010 (mis à jour octobre 2011)	48
Figure 13 - Relation offre-demande-prix du molybdène entre 1999-2009.	49
Figure 14 - Synthèse de la criticité du molybdène.	52

Liste des tableaux

Tableau 1 - Utilisations de la poudre de molybdène et perspectives du marché. source : société Plansee (2006).....	26
Tableau 2 - Production mondiale de molybdène en 2008, par pays et par type de ressources (estimations d'après MEG et USGS).	31
Tableau 3 - Ressource indiquée et estimée du gisement de molybdène et rhénium de Merlin, Queensland, Australie (Ivanhoe mining, source de l'information : http://www.ivanhoeaustralia.com/s/Merlin.asp)	35
Tableau 4 - Principaux projets molybdène en 2009 : nature, capacités annuelles et échéances.	39
Tableau 5 - Composantes de la criticité du molybdène.....	51

1. Introduction

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

1.1. DÉFINITIONS

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

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

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

Gisement : concentration naturelle de minéraux économiquement exploitable.

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

Minéral/minéraux : désigne une substance inorganique, d'origine naturelle, caractérisée par sa formule chimique et par l'arrangement de ses atomes selon une structure géométrique particulière.

Minerai : désigne une roche contenant une concentration d'un ou plusieurs minéraux en quantité suffisante pour être économiquement exploitable.

Minéralisation : désigne une concentration naturelle élevée de minéraux dont l'exploitation pourrait présenter un intérêt économique. Il s'agit d'un concept plus large

que le terme minerais qui, dans les gisements, désigne la partie exploitable de la minéralisation.

Potentiel géologique : il s'agit d'une première estimation, basée sur des critères et des raisonnements géologiques, de l'existence de gisements dans une région ou un pays.

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 des produits manufacturés usagés en fin de vie, mais aussi des chutes de fabrication (copeaux, poussières, coulures, bavures, etc.).

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

1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE

Cette étude a été réalisée au cours du second semestre 2010 par le Service Ressources Minérales du BRGM, appuyé par la Compagnie Européenne d'Intelligence Stratégique (CEIS), dans le cadre d'un contrat de sous-traitance pour l'identification et l'analyse de la filière industrielle française. 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 molybdène est peu transparente et les données ouvertes peuvent être incomplètes et/ou sujettes à erreurs.

Le molybdène ne fait pas partie des 14 matières premières considérées comme stratégiques -dans l'acception française du terme « stratégique »¹- telles qu'elles ont

¹ Dans la terminologie utilisée par la Commission Européenne, le terme de « métal critique » est utilisé dans un sens similaire à « métal stratégique ».

été retenues dans le cadre de l'étude sur les matières premières critiques pour l'Union Européenne [1]. Cette étude a été publiée en juin 2010, dans le cadre de l'Initiative Matières Premières de la Commission Européenne.

Elle notait les risques très faibles liés à la sécurité des approvisionnements en molybdène (évalué à 0,5 sur une échelle graduée de 0, pour un risque inexistant, jusqu'à 5, pour un risque maximal) tout en soulignant son importance pour l'économie de l'UE.

Il convient cependant d'affiner l'analyse en s'intéressant aux différents segments des filières d'utilisation, ceux des alliages en premier lieu, mais aussi ceux des catalyseurs de raffinage tant les secteurs concernés sont des secteurs clés pour nos économies aussi bien dans le domaine des énergies, des transports, voire des technologies de l'information.

En Corée du Sud, où la pratique du stockage stratégique existe déjà, une étude menée début 2010 par le bureau d'étude du groupe Samsung (SERI) a établi une liste de huit métaux critiques dont les besoins sont jugés vitaux pour le développement industriel du pays. Ces huit métaux sont : le bismuth, le cobalt, le germanium, l'indium, le manganèse, le molybdène, le niobium et le vanadium (voir Ecomine, mars 2010). Il est symptomatique de noter que cinq de ces métaux sont des métaux d'alliage, les trois autres des « métaux rares ».

Ce rapport a été produit à partir de l'importante documentation technique dont dispose le BRGM, incluant notamment :

- le rapport sur les matières premières stratégiques de la Commission Européenne [1] ;
- les bases de données et rapports publics de l'United States Geological Survey ;
- des bases de données commerciales produites par le Raw Materials Group et le Metals Economics Group ;
- l'étude spécialisée sur le molybdène produite par Roskill en 2010 [4] ;
- le site Internet de l'International Molybdenum Association (www.imoa.info) ;

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

2. Le molybdène, généralités

Le molybdène (Mo) est un métal réfractaire et malléable de couleur blanc argenté. Élément de transition de numéro atomique 42, il appartient au groupe VI du tableau périodique des éléments comme le tungstène et le chrome. Ses propriétés chimiques sont proches de celles du chrome.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	Lan- thi- des	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Acti- nides															
Lan- thi- des :	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
Acti- nides :	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

Figure 1 - Position du molybdène dans le tableau périodique des éléments.

Les principales caractéristiques physico-chimiques du molybdène sont :

Nombre atomique :	42
Masse atomique :	95,94
Point de fusion :	2 625 °C
Point d'ébullition :	4 639 °C
Dureté Brinell (Mpa)	1 500
Densité (g/cm ³) à 20 °C	10,2
Résistivité (ohm m)	5 x 10 ⁻⁸
Abondance dans la croûte terrestre :	1,2 ppm

C'est le 58^{ème} élément par ordre d'abondance dans l'écorce terrestre. Il est moins abondant que le tantale, plus de deux fois moins abondant que l'uranium ou le

béryllium. Il est encore cinquante fois moins abondant que le cuivre, auquel il est souvent associé dans les gisements, mais cinquante fois plus abondant que l'or.

Jusqu'au XVIII^e siècle le principal minerai de molybdène, la molybdénite, ou disulfure de molybdène (MoS_2 , 60 % de molybdène) était confondue avec le graphite et la galène, à cause de son caractère ductile et son aspect brillant, le nom de molybdène est ainsi dérivé du grec ancien *molybdos* signifiant plomb. C'est en 1778 que le chimiste suédois Carl Wilhelm Scheele a identifié la molybdénite en tant que minerai distinct d'un nouvel élément qu'il nomma molybdène. Mais il n'obtint que de l'anhydride molybdique, par attaque nitrique à chaud de la molybdénite. Trois ans plus tard, en 1781, un autre savant suédois a isolé le molybdène, sous forme de poudre métallique en grillant de la molybdénite avec du charbon de bois et de l'huile de lin.

Ce n'est qu'un siècle plus tard, en 1893, que le français Moissan réussit la fusion du molybdène, en utilisant un four électrique dans lequel il avait placé un mélange de dioxyde de molybdène et de charbon de bois, obtenant du molybdène massif, encore impur. En 1894, les usines Schneider du Creusot réalisèrent la première application industrielle du molybdène, en produisant de l'acier au molybdène pour la fabrication de blindages. La production industrielle de molybdène pur sous forme massive a démarré en 1909, suite aux travaux de l'américain Coolidge. Celui-ci a ainsi démontré la possibilité de produire les filaments des lampes à incandescence à partir de poudre de molybdène.

La capacité du molybdène à former des carbures stables, durs, en fait un métal d'alliage indispensable pour la production de fontes, d'aciers, et de superalliages auxquels il apporte de la dureté, de la résistance mécanique, de la résistance à la corrosion et à l'usure ainsi qu'un maintien des performances à hautes températures. Ces propriétés confèrent à ces alliages un très large champ d'applications (voir fig. 2 et 3).

La généralisation de l'usage du molybdène dans les alliages n'est cependant intervenue qu'après la première guerre mondiale en association avec d'autres métaux tels que le chrome, le nickel, le vanadium ou le manganèse et le titane, pour la fabrication d'une gamme aujourd'hui très diversifiée de semi-produits.

3. Les usages

L'utilisation du molybdène s'est largement développée, pour une gamme sans cesse croissante d'usages rendus possibles par :

- sa résistance à des températures élevées (réfractarité) et, par rapport au tungstène avec lequel il partage cette propriété, une relative légèreté ;
- son exceptionnelle incompressibilité ;
- son faible coefficient de dilatation thermique ;
- sa stabilité chimique, qui limite les risques de migration dans l'environnement ;
- sa résistance à la corrosion ;
- son aptitude à la liaison avec d'autres métaux et sa capacité à recevoir des traitements de durcissement ;
- son coefficient élevé de transmission thermique et de conductivité électrique.

Fort de ces propriétés, le molybdène intervient dans les différentes filières industrielles sous les principales formes suivantes:

- l'oxyde technique de molybdène (OTM qui devient TMO pour les anglo-saxons) ;
- les ferro-molybdènes ;
- les déchets de molybdène (neufs-scrap-ou issus du recyclage) ;
- le molybdène pur en poudre, le molybdène métal et ses alliages ;
- pour la chimie, les carbures et oxydes molybdiques et molybdates.

Les statistiques concernant le molybdène correspondent au contenu en métal de ces différents produits.

Les différents groupes de demi-produits ainsi que leurs utilisations sont présentés ci-après.

Oxyde technique de molybdène, ferromolybdène et déchets de molybdène :

- acier inoxydable et acier résistant à la chaleur ;
- acier fortement allié ;
- acier au carbone ;
- acier à haute limite d'élasticité (HLE) ;
- acier pour la fabrication d'outils et acier rapide ;
- superalliages et alliages à hautes performances ;
- fonte ;
- alliages pour la soudure ;
- autres alliages.

Poudres, semi-produits et fils de molybdène et d'alliages à base de molybdène :

- éléments de chauffe et autres composants pour zones chaudes, interrupteurs à mercure, relais téléphoniques et contacteurs spéciaux ;
- électrodes pour la fusion du verre et des émaux ;
- éléments pour semi-conducteurs : fabrication de redresseurs, diodes, thyristors, transistors et microprocesseurs ;
- filaments d'ampoules à incandescence ;
- écrans protecteurs ;
- buses d'extrusion ;
- dépôts superficiels à chaud.

Sulfure / carbures / carbures / disiliciures :

- catalyseurs ;
- lubrifiants émaillage en céramique.

Oxyde molybdique pur et/ou molybdates :

- catalyseurs ;
- pigments et inhibiteurs de corrosion des peintures, production de matières plastiques, de caoutchouc et de céramiques ;
- inhibiteurs de corrosion ;
- supprimeurs de fumée ;
- agriculture et biologie ;
- micronutriment et engrais.

En 2008, la production mondiale de 218 000 t de molybdène (USGS, 2010) [3] a été consommée à hauteur de 80 % par la filière métallurgique (fig. 1). Dans cette filière des alliages métalliques, les deux propriétés principales apportées par le molybdène sont le renforcement des qualités mécaniques à haute température (1 900 °C - 2 000 °C) et la résistance à la corrosion. À titre d'exemple, il entre à des teneurs de 0,1 à quelques pour cent dans les aciers alliés, jusqu'à 10 % dans les aciers rapides, de 2 à 7 % dans la plupart des aciers inox standards, encore plus dans les inox spéciaux comme le C-22 (13 %) et le C-276 (16 %). Outre le secteur de la construction, ces aciers sont incontournables dans la filière énergétique pour le transport (pipelines, gazoduc), mais aussi pour la génération d'énergie : turbines, voire la construction mécanique (aciers rapides).

Dans les alliages haute performances (superalliages), destinés à l'aéronautique ou aux turbines de centrales électriques il entre à hauteur de quelques pour cents jusqu'à 9 %.

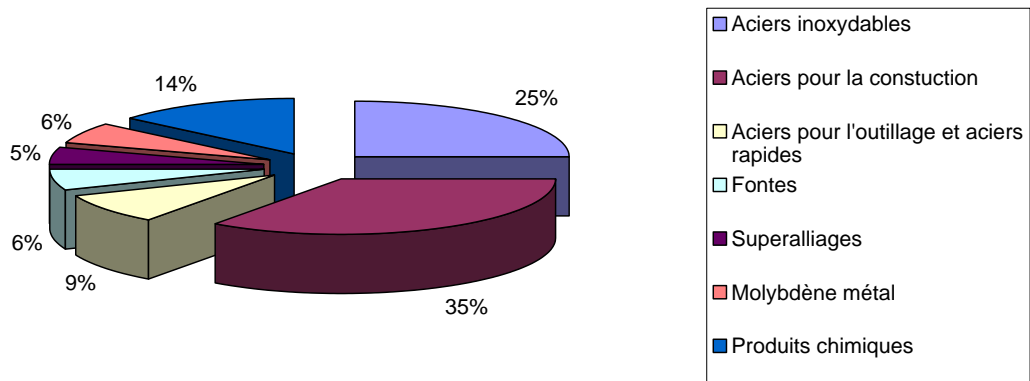


Figure 2 - Répartition de la consommation de molybdène suivant les produits intermédiaires concernés – Source : International Molybdenum Association (IMO).

Sous forme de **composés chimiques (14 % de la consommation totale de Mo)**, il est notamment employé comme catalyseur dans l'industrie du raffinage en association avec le nickel ou le cobalt. Dans l'industrie des pigments et des peintures, il est employé pour limiter la corrosion.

Enfin sous **forme métallique (6 %)**, il est utilisé seul ou allié², dans la filière électronique, les filières des réfractaires ou des verres où son usage est privilégié dans les fours. Son utilisation tend à se développer dans les écrans LCD ou les panneaux solaires. La figure 2 représente la répartition de la consommation de molybdène et de produits dérivés par secteurs finaux :

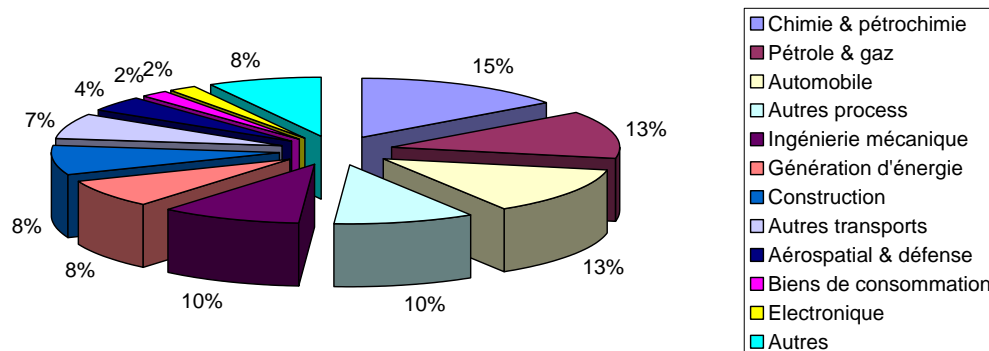


Figure 3 - Répartition de la consommation du molybdène par secteurs finaux – Source : International Molybdenum Association (IMO).

La figure ci-dessus permet d'illustrer le large spectre des emplois du molybdène dans les domaines qui relèvent majoritairement des infrastructures, qu'elles soient énergétiques ou de transport (automobile ou aérien), de l'équipement mécanique ou de la construction. Soulignons de plus le développement de ses usages dans les

² Alliages où il est prédominant.

nouvelles technologies de l'information : semi-conducteurs ou écrans LCD ou les énergies nouvelles : panneaux solaires. Il est de plus apprécié pour sa faible réactivité dans l'environnement³ comparativement à d'autres métaux comme le chrome ; il sera donc préférentiellement utilisé dans « les technologies vertes ». Enfin, notons que la molybdénite (le sulfure de molybdène, principal minerai) après purification constitue un lubrifiant largement utilisé.

3.1. USAGES DU MOLYBDÈNE POUR LA PRODUCTION D'ACIERS

Compte tenu de la prépondérance (80 %) de son utilisation dans les aciers, une brève présentation des classifications de cette filière sera présentée pour souligner la diversité des utilisations et donc son caractère incontournable. L'accent sera mis sur les aciers inoxydables où les acteurs français sont particulièrement représentés, notamment : Eramet (Aubert & Duval), Delachaux, voire Arcelor Mittal.

Le molybdène se lie facilement à l'acier fondu, avec peu de perte, peu importe qu'il soit ajouté sous forme d'oxyde technique de molybdène (OTM), de ferromolybdène ou de déchets de ferromolybdènes. Il est ajouté aux aciers pour :

- minimiser le taux de refroidissement nécessaire pour obtenir une structure martensitique dure, ce qui améliore la solidité, la résistance et la dureté des pièces de grandes sections ;
- réduire la fragilisation lors de la trempe ;
- résister aux effets de l'hydrogène ;
- résister aux craquelures liées au stress sulfuré ;
- améliorer de la résistance aux hautes températures ;
- améliorer de la résistance des aciers inoxydables à la corrosion ;
- améliorer de la capacité de soudure, particulièrement pour le cas des aciers HLE (Haute limite d'Elasticité).

Il existe de nombreux systèmes de classification des différents types d'acier. La classification utilisée dans la suite de ce chapitre est celle la norme européenne NF EN 10027 [8]. Cette norme permet de définir les aciers soit à partir de leurs emplois et de leurs caractéristiques mécaniques ou physiques, soit à partir de leur composition chimique. Il est également fait référence à la norme européenne EN 10020 pour la définition des compositions de certaines catégories d'aciers [9].

Cette classification est basée sur quatre catégories :

- les aciers non-alliés d'usage général ;
- les aciers non-alliés spéciaux ;
- les aciers faiblement alliés, dont les aciers à haute limite d'élasticité (HLE) ;

³ Environmentally friendly

- les aciers fortement alliés comprenant :
 - les aciers inoxydables,
 - les aciers rapides pour la production d'outils à forte vitesse de coupe tels que les forêts.

Les aciers inoxydables

Les aciers inoxydables sont le principal débouché du molybdène. Selon l'International Molybdenum Association (IMOA, www.imoa.info), 25 % du molybdène primaire est utilisé pour la production d'acier inoxydable.

Selon la norme NF EN10020, les aciers inoxydables doivent contenir au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone. La présence du chrome est indispensable à la formation d'une pellicule protectrice d'oxyde de chrome protégeant le fer sous-jacent de l'oxydation, conférant le caractère inoxydable à l'alliage.

En plus du chrome, ils peuvent contenir des quantités variables de nickel, de molybdène et, plus rarement, certains des éléments suivants : aluminium, cérium, cuivre, cobalt, niobium, soufre, titane, tungstène, vanadium. La composition précise de chaque variété d'acier inoxydable, ou nuance, lui confère des propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion dans un environnement déterminé.

Il existe quatre grandes classes d'aciers inoxydables :

- **les aciers inoxydables austénitiques** sont les plus largement utilisés. Ils ont une teneur en nickel au moins égale à 7 %, qui confère une bonne ductilité, une large gamme de température de mise en œuvre, des propriétés amagnétiques, et une bonne adaptation à la soudure. Leurs applications comprennent les équipements de la maison, la production de récipients, la tuyauterie, les réservoirs industriels et la construction ;
- **les aciers inoxydables ferritiques** ont des propriétés similaires à celle de l'acier doux, mais ils offrent une meilleure résistance à la corrosion. Les plus répandus de ces aciers contiennent respectivement 12 et 17 % de chrome, mais très peu de nickel. Les nuances contenant 12 % de chrome sont utilisées dans le domaine de la construction, celles contenant 16 et 17 % de chrome étant utilisées pour la fabrication d'articles ménagers, de chaudières, de machines à laver et pour l'architecture intérieure ;
- **les aciers inoxydables austénitiques-ferritiques (aciers inoxydables duplex)** ont une microstructure composite austénitique et ferritique, d'où le nom d'acier inoxydable duplex. Ces aciers contiennent du nickel pour obtenir une structure de maille partiellement austénitique. La microstructure duplex confère à la fois de la résistance et de la ductilité. Les aciers inoxydables duplex sont généralement utilisés dans les domaines de la pétrochimie, de la production de pulpe de papier et dans les industries navales ;
- **les aciers inoxydables martensitiques** contiennent généralement de 11 à 13 % de chrome, sont à la fois résistants et durs avec une résistance à la corrosion moyenne.

Ce type d'acier inoxydable est largement utilisé pour la fabrication d'aubes de turbines et dans la coutellerie.

L'adjonction de molybdène dans les aciers inoxydables améliore fortement leur résistance à la corrosion, notamment pour prévenir la corrosion des pièces en acier inoxydable par piqûres ou par crevasses dans des solutions chlorurées telles que, par exemple, l'eau de mer.

Les domaines d'application des aciers inoxydables sont représentés par la figure 6.

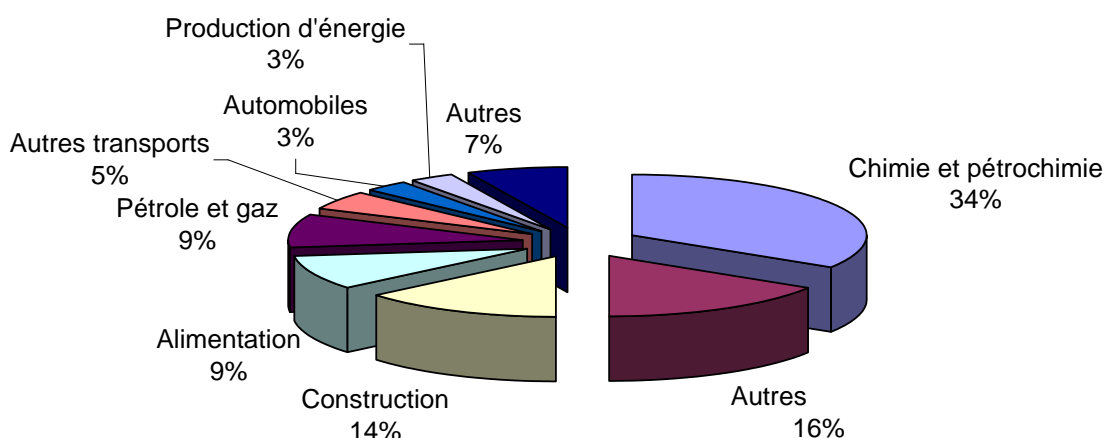


Figure 4 - Domaines d'utilisation des aciers inoxydables, d'après Roskill (2009) [4].

3.2. USAGES DES COMPOSÉS CHIMIQUES DU MOLYBDÈNE POUR LA CATALYSE

L'usage des composés du molybdène pour la catalyse est, après le secteur des aciers, le plus important segment de consommation du molybdène. Avec 17 000 t en 2008, il représentait 8 % de la consommation mondiale. Dans les formulations utilisées, le molybdène est seul ou associé au cuivre ou au nickel. Ces catalyseurs interviennent principalement :

- dans les procédés pétrochimiques par voie aqueuse : hydrotraitement pour supprimer le soufre, l'azote et l'oxygène des hydrocarbures ou l'hydro-crackage ;
- la conversion du charbon en hydrocarbures ;
- la fabrication d'ammoniaque ;
- la production de formaldéhyde à partir d'éthanol ;
- la conversion en alcool du monoxyde de carbone produit dans les centres d'incinération.

Les fabricants de catalyseurs ont recours à des produits intermédiaires différents suivant les procédés de fabrication utilisés et les secteurs d'applications. Les composés chimiques mis en œuvre pour la catalyse sont en général des di-molybdates

d'ammonium ou des hepta-molybdates d'ammonium, plus rarement de l'oxyde pur de molybdène produit à partir des composés précédents ou de la poudre de molybdène.

Dans ces applications, les exigences de haute pureté sont la règle. Dans l'hydrotraitement, les catalyseurs contiennent en moyenne environ 10 % de molybdène. Ce pourcentage est en constante augmentation depuis le développement des gisements de pétrole lourds (en provenance des sables bitumineux notamment) qui nécessitent une activité catalytique accrue.

Un acteur important du secteur est français : Axenscatalysts and Adsorbants, issu en 2001 de la fusion entre Protocatalysts and Absorbants et l'IFP.

3.3. USAGES DU MOLYBDÈNE MÉTAL ET DES ALLIAGES DE MOLYBDÈNE

Le molybdène sous forme métallique, seul ou en alliage est le troisième domaine d'utilisation après les ferro-alliages et les catalyseurs. En 2008, avec environ 15 000 t de molybdène contenu, ce domaine représentait 6 % de la consommation totale, dont près de 60 % pour le secteur des poudres de molybdène (environ 9 000 t).

Le molybdène métallique, seul ou en alliage, est privilégié dans les applications qui exigent le maintien des performances à des températures supérieures à 2 000 °C, dans des environnements corrosifs (forte salinité notamment). Sa résistance à l'abrasion est appréciée quand il se présente sous forme de films minces (panneaux solaires CIGS, dans lesquels une couche mince de molybdène est vaporisée sur du verre formant ainsi le substrat sur lequel la couche-mince de Cu(In,Ga)Se_2 sera déposée, couche qui constitue la partie active du panneau solaire).

Les alliages de molybdène les plus fréquents contiennent du hafnium (1,2 %) du titane (0,5 %), du zirconium (0,08 %) ou du carbone (0,04 % à 0,1 %).

Il convient de noter cependant que le molybdène s'oxyde rapidement à l'air ou dans des environnements oxydants à des températures supérieures à 600 °C. Pour remédier à cette situation, la mise en œuvre de revêtements protecteurs s'impose : il peut s'agir de siliciure de Molybdène.

En raison de sa forte conductivité thermique et de son usinabilité, le molybdène métal est utilisé comme électrode dans les fours verriers, comme anode pour la production de rayons X. Il est enfin mis en œuvre sous des atmosphères spécifiques : sous vide, sous argon, sous hydrogène, voire sous hélium.

Selon un des leaders mondiaux de la fabrication de poudre métallique de molybdène, la société autrichienne Plansee, la répartition de la consommation mondiale de poudre de molybdène, estimée à 8 820 t en 2006, se répartissait de la façon suivante :

Applications	tonnage (t)	évolution du marché à moyen terme
revêtement d'écrans LCD et de panneaux photo-voltaïque	2000	croissance rapide
puces de radio-fréquence, transistors spécialisés (IGBT) dans les véhicules hybrides électriques	350	croissance rapide
éléments d'électrode pour la cathode froide des lampes fluorescentes	100	croissance rapide
anodes, roulements, rotors et éléments de cathode pour les tubes à rayons X	350	croissance lente
composants parties chaudes des fours	300	croissance lente
extrusion de métal, injection de plastiques, injection d'aluminium et de magnésium	20	croissance
forgeage et matrices de formation de tubes	100	stable
semi-conducteurs de forte puissance	400	stagnation
autres	3000	stagnation
lampes halogènes et à décharges	1300	déclin
mélangeurs, électrodes, éléments de réservoirs pour verre	400	déclin
éléments de tuyères	500	déclin rapide

Tableau 1 - Utilisations de la poudre de molybdène et perspectives du marché.
source : société Plansee (2006).

3.4. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DES USAGES

Le molybdène, métal de ferro-alliage continuera de voir ses utilisations se développer en raison de ses performances en conditions extrêmes : hautes températures, forte corrosion, préservation de l'environnement. À ce titre, ses qualités intrinsèques jointes à des conditions d'approvisionnement qui sont restées faciles, en termes de volume aussi bien que de prix, en font un métal qui ne sera pas facilement substituable. Seule une importante mais improbable envolée des prix pourrait amener des substitutions, bien que son prix, dans la plupart des applications, n'intervienne que pour une faible part du prix de revient du produit final.

Dans les domaines de la catalyse et du molybdène métal, le chapitre précédent a montré que des nouveaux développements ne manqueront pas d'apparaître, compte tenu des besoins dans l'industrie énergétique, ce dans tous les segments de la filière : pour la production d'hydrocarbures, depuis l'exploration (forages, équipements de puits) jusqu'à la production (raffinage des pétroles lourds), pour la production

d'électricité à partir de l'énergie solaire (panneaux photovoltaïques de nouvelle génération), voire dans l'industrie électronique.

La section ci-dessous décrit de nouveaux usages déjà identifiés.

- Dans l'industrie nucléaire, le molybdène pourrait intervenir comme stimulant de produits de fission ou la production de nacelles de frittage dans le cycle de fabrication du combustible nucléaire. Sa mise en œuvre comme combustible en association avec l'uranium pourrait être testée par le CEA dans le réacteur expérimental Jules Horowitz à Cadarache. Celui-ci devrait être opérationnel dès 2014 au profit de toute l'Europe nucléaire.
- Dans l'industrie photovoltaïque, les cellules photovoltaïques à couches minces de type CIGS (cuivre-indium-gallium-sélénium) pourraient voir leur utilisation se généraliser en raison de leur conditionnement sous forme de film et donc leur souplesse d'utilisation accrue par rapport au silicium dont la mise en œuvre se limite à des panneaux rigides. Le molybdène est particulièrement apprécié en raison de sa conductivité électrique et thermique, de sa faible expansion thermique, de sa bonne adhésion au verre, de sa bonne tenue au décapage et de sa faible diffusion dans les éléments auxquels il est associé (verre, cuivre ou aluminium). Le silicium dispose encore d'un avantage en terme de performance, mais pour combien de temps ?
- Dans le domaine de la santé, à titre anecdotique, signalons que des chercheurs du CEA associés à des chercheurs de l'Université Pierre et Marie Curie ont démontré le rôle d'inhibiteur joué par un phospho-molybdate de formule : $K_6 [P_2 Mo_{18} O_{62}]$ sur les enzymes à l'origine des cancers des poumons, de la prostate, voire de la leucémie.

3.5. RECYCLAGE

D'après le bureau d'étude Roskill, le tonnage de molybdène contenu dans les ferrailles et ferro-alliages négociés au niveau mondial pourrait atteindre 50 000 t. Ce qui ne signifie pas qu'il soit intégralement valorisé dans les filières de recyclage. Une preuve peut en être donnée par les statistiques douanières des échanges effectués sous les dénominations de « ferrailles de molybdène » et d'« alliages de molybdène » qui, en 2008 ne totalisaient que 9 000 t.

Les ferro-alliages de molybdène, y compris les alliages haute performance, font l'objet d'une collecte et d'un recyclage en l'état par réintégration dans les filières de fabrication des ferro-alliages. Ces déchets peuvent être aussi bien des déchets de « process », les anglo-saxons parlent de « new scrap » que des déchets de fin de vie de pièces contenant ces ferro-alliages, les anglo-saxons parlent de « oldscrap ». Selon l'association internationale de l'acier inoxydable (International Stainless Steel Forum, <http://www.worldstainless.org/ISSF/Files/Recycling08/Flash.html>), 80 à 90 % de l'acier inoxydable en fin de vie est recyclé, sans perte de qualité, en le mélangeant à des déchets et à des métaux primaires. Le contenu moyen en acier inoxydable recyclé des objets actuellement manufacturés atteindrait une moyenne de 60 %. Selon

les estimations citées plus hauts, les tonnages de Mo contenus pourraient représenter près du quart de la production minière.

Le recyclage des catalyseurs utilisés par l'industrie du raffinage pétrolier est devenu un enjeu environnemental dès le début des années 1990, en raison de leur contenu en métaux lourds, dont le plomb.

Deux filières existent : la première privilégie la régénération, la seconde la récupération des différents métaux contenus pour une réutilisation qui ne sera pas obligatoirement dans la filière des catalyseurs.

D'après Roskill, il est possible de régénérer entre 75 et 90 % de l'activité d'un catalyseur pour un coût qui ne représente que 20 % du prix du catalyseur neuf. Compte tenu du déclin de la performance à chaque recyclage, le recyclage est cependant limité à quatre ou cinq fois.

Il est à noter que les trois principales sociétés spécialisées dans la régénération sont européennes, CRI au Luxembourg, Eurecat en France et Tricat en Allemagne.

La société Eurecat est une co-entreprise entre l'américain Albermarle et l'Institut Français du Pétrole (IFP), elle a des unités de traitement aux USA, en Arabie Saoudite, au Japon ainsi qu'en France.

La récupération des différents métaux contenus dans les catalyseurs permet aux sociétés spécialisées, après un traitement associant le plus souvent hydrométallurgie et pyrométallurgie, de procéder à la mise sur le marché de : molybdène, cobalt, nickel et vanadium, ou de fabriquer de nouveaux catalyseurs. D'après l'IMOA, le tonnage total de Mo récupéré en 2008 s'élevait à 6 000 t.

On retrouve dans cette filière du recyclage la société CRI à travers sa filiale américaine CS Metals, la société française Eurecat ainsi que la société Gulf Chemical and Metallurgical Corp (GCMC) implantée au Texas et filiale de la société ERAMET

Soulignons, enfin, qu'il n'existe pas, à notre connaissance, de filière de récupération sélective du molybdène à partir de ses alliages ou des ferro-alliages.

4. La filière industrielle

4.1. STRUCTURE DE LA PRODUCTION ET RÉSERVES

Les données disponibles donnent des résultats divergents que nous allons exposer en tentant d'expliquer ces divergences. Une interprétation va être esquissée à partir d'estimations qui mériteraient d'être complétées par des recherches complémentaires, d'abord pour valider l'analyse et ensuite, se donner les moyens pour des actions qui soient les plus pertinentes possibles.

La compilation par le Metal Economics Group (MEG) des rapports des sociétés productrices le conduisait à estimer la production minière mondiale de molybdène en 2008 (soit avant la crise) à 158 745 t, avec la ventilation suivante : Chine 21 %, États-Unis 34 %, Chili 20 % et Pérou 10 % (voir fig. 4). Pour la même année, l'observatoire de l'USGS estimait cette production à 218 000 t. La différence s'explique par le fait que le MEG ne compile que ce qui est communiqué par les sociétés. Ce qui le conduit par exemple à une production chinoise de 35 kt alors que l'USGS l'estime à 81 kt en 2008 et 77 kt en 2009.

Le molybdène ne fait que très rarement des gisements dont la teneur permet l'exploitation de ce seul métal.

Environ 75 % de sa production ont lieu en tant que sous-produit du cuivre, notamment dans les gisements de cuivre de type porphyrique [2]

Le principal minerai de molybdène est la molybdénite, ou sulfure de molybdène, MoS_2 .

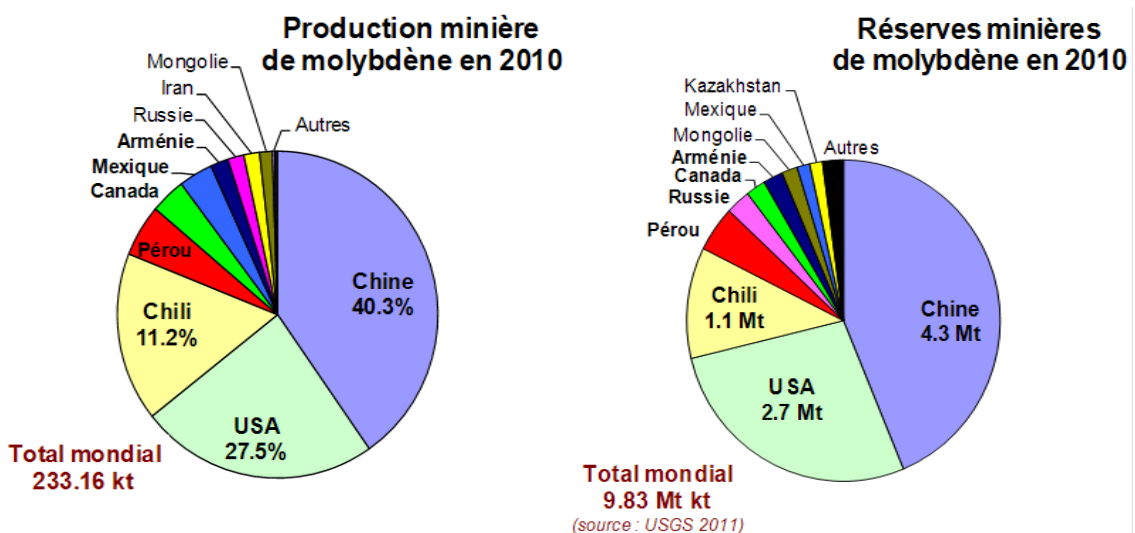


Figure 5 - Répartition de la production mondiale et des réserves minières de molybdène par pays (sources : USGS, BRGM) (mise à jour octobre 2011).

Il convient de relever les disparités existant entre les différentes sources statistiques : ainsi World Mining Data, source statistique publiée par le Ministère autrichien de l'économie, crédite la Chine de 30,49 % de la production mondiale 2008 (estimée à 196 143 tonnes), l'annuaire World Mineral Production publié par le British Geological Survey donnant, lui, une production minière estimée de 81 000 t, pour une production mondiale totale de 223 000 tonnes, soit 37 % de la production mondiale, chiffre proche de celui de l'USGS (218 000 tonnes et 37 %). Il est normal que le Metals Economic Group publie des valeurs de production inférieures aux autres sources statistique, car il ne prend en compte que les données provenant des sociétés minières elles-mêmes, l'essentiel des informations étant celles provenant des sociétés cotées en bourse. Ceci est un exemple, parmi de nombreux autres, des difficultés d'utilisation des statistiques publiées et de l'imprécision relative aux statistiques, notamment chinoises.

À titre de comparaison, nous présentons ci-après les chiffres diffusés pour la même année par l'USGS avec des productions estimées pour les pays suivants : Chine, Iran, Kirghizistan, Russie et Ouzbékistan. La différence constatée entre les deux statistiques pour la même année (158 745 t d'une part et 218 000 t d'autre part) est liée pour l'essentiel aux différences d'appréciation de la production chinoise. Elle est estimée à 35 290 t par MEG Mine Search et à 81 000 t par l'USGS. Un tel différentiel permet de souligner à quel point l'approche statistique est difficile pour la Chine. Les résultats avancés pour ce pays doivent donc être appréhendés avec circonspection et demanderont à être affinés.

Il est à noter à partir de l'estimation de l'USGS (fig. 6) que cinq pays représentent à eux seuls 89 % de la production : la Chine, les États-Unis, le Chili, le Pérou et le Canada. Ces cinq pays sont exportateurs. Seule la Chine a une politique de contingentement de ses exportations, voire de limitation de la production dans la mesure où elle considère le métal comme stratégique pour le développement de son économie (voir chapitres 4-5).

Le tableau 2 ci-après présente une synthèse des caractéristiques des principales exploitations. Les données ne sont pas documentées en totalité pour la Chine, nous l'avons déjà mentionné, mais aussi pour une partie de la production chilienne, nous avons donc repris les estimations de l'USGS.

Les tentatives de recoupement menées dans le cadre de cette étude nous permettent d'estimer que la production non identifiée par Mine Search provient de Chine et correspond, sous réserve d'inventaire à deux districts qui regroupent sept exploitations correspondant à des gisement sédimentaires exhalatifs de shales noirs situés dans le sud de la Chine dans les provinces de Guizhou et Hunan.

Compte tenu de cette remarque, il est permis de rattacher la production totale annuelle de 2008 arrêtée à 218 000 t entre trois types de gisements qui seront détaillés dans le chapitre qui suit. Les gisements où le molybdène est un sous-produit de la mine du cuivre dans les porphyres cuprifères (46 %), ceux où il est le produit principal dans les porphyres (31 %) et enfin ceux où il est le produit principal dans les gisements sédimentaires exhalatifs liés à des shales noirs (23 %).

	Mine	Propriétaires	Métal principal	Teneur Mo %	Réserves et ressources (kt)	Mo contenu (t Mo)	production 2008 par mine (t Mo)	production 2008 par pays (t Mo)
USA	Henderson	Freeport Mc Moran	Mo	0.161	214 000	344 540	18 144	53 414
	Sierrita	Freeport Mc Moran	Cu	0.013	3 651 000	474 630	8 550	
	Bagdad	Freeport Mc Moran	Cu	0.018	1 642 000	295 560	4 000	
	Bingham Canyon	Rio Tinto	Cu	0.065	1 817 000	1 181 050	10 600	
	Thompson Creek	Thompson Creek	Mo	0.063	371 600	234 108	7 620	
	Continental	Montana Resources	Cu	0.03	384 700	115 410	2 500	
	Questa	Molycorp Minerals	Mo	0.3	70 000	210 000	2 000	
Canada	Endako	Thompson Creek 75 % sojitz 25 %	Mo	0.043	492 100	211 603	5 625	7 525
	Highland Valley	Teck Resources 97,5 % Highmont mining 2,5 %	Cu	0.009	625 700	56 313	1 900	
Mexique	La Caridad	Southern Copper (Grupo Mexico)	Cu	0.02	5 496 774	1 099 355	7 300	7 300
Perou	Toquepala	Southern Copper (Grupo Mexico)	Cu	0.014	6 613 430	925 880	4 700	16 539
	Cuajone	Southern Copper (Grupo Mexico)	Cu	0.019	2 484 937	472 138	4 400	
	Antamina	BHP Billiton 33,75 % Xstrata 33,75 % Teck Resources 22,5% Mitsubishi 10 %	Cu	0.02	1 505 000	301 000	6 078	
	Cerro Verde	Freeport Mc Moran 54 % Japanese consortium 21 % Buanaventura 18 % Employees 7 %	Cu	0.013	3 234 000	420 420	1 361	
Chili	Andina division	Codelco	Cu	n.d.	17 098 000	n.d.	2 133	24 453
	El Teniente	Codelco	Cu	n.d.	19 161 000	n.d.	4 580	
	Codelco Norte	Codelco	Cu	n.d.	18 445 000	n.d.	12 940	
	Collahuasi	Xstrata 44 % Anglo-American 44 % Japanese Consortium 12 %	Cu	0.029	4 193 080	1 215 993	2 300	
	Los Bronces	Anglo-American	Cu	n.d.	6 514 100	n.d.	2 500	
Russie	Zhireken	Strikeforce mining	Mo	0.034	130 000	44 200	4 134	4 134
Mongolie	Erdenet Covo	Govt de Mongolie 51 % Govt de Russie 49 %	Cu	0.02	500 000	100 000	2 000	2 000
Chine	Dexing Complex	Jiangxi Copper	Cu	0.011	1 139 130	125 304	1 000	Prod. Chine sur 5 sites (MEG) 33 080
	Sandaozhuang	China Molybdenum	Mo	0.098	2 100 000	2 058 000	15 080	
	Jinduicheng	Jinduichang 60 % Shangxiang 40 %	Mo	0.097	800 000	776 000	13 000	
	Wunugetushan	China national gold	Cu	0.055	275 500	151 525	2 500	Production Chine totale (estimation BGS) 81 000
	Chifeng	Chifeng Chuyuan	Mo	0.098	34 160	33 477	1 500	
	District de Zunyi	n.d.	Mo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
	District de Zhangjiajie	n.d.	Mo	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
Arménie	Zanzegur	Cronimet (60 %) Local interest (40 %)	Cu	0.002	4 305 000	86 100	1 500	1 500
Iran	Sarchesme	Nicico	Cu	0.03	1 200 000	360 000	1 000	1 000
Total des mines documentées							150 945	
Total estimé avec mines non documentées (Chine et autres)								218 000

Tableau 2 - Production mondiale de molybdène en 2008, par pays et par type de ressources (estimations d'après MEG et USGS).

Le total de 218 000 t inclut des estimations pour les gisements non documentés.

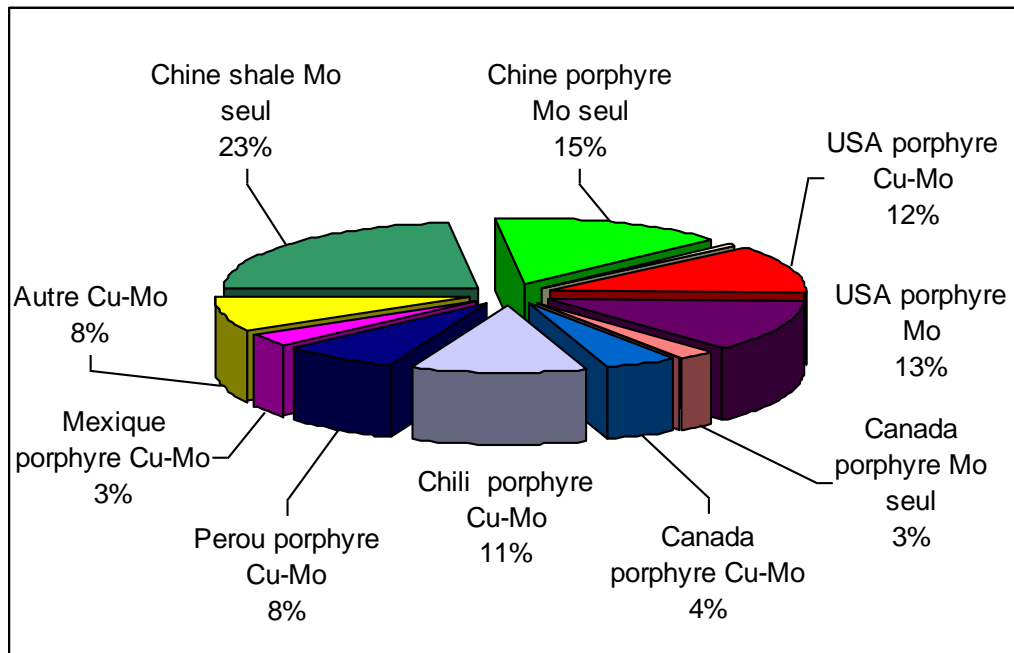


Figure 6 - Répartition de la production mondiale de molybdène par pays et types de gisement en 2008. Source : USGS. Les chiffres retenus pour la Russie et la Chine sont des estimations.

Cette distinction a son importance pour ce qui relève des approvisionnements, dans la mesure où l'émergence d'une mine spécifiquement dédiée au molybdène à hauteur d'environ 54 % des approvisionnements mondiaux implique une plus grande sensibilité aux prix de ce métal pour la filière concernée. La remarque mérite d'autant plus d'être relevée que la Chine ne dépend que de cette dernière catégorie de gisements pour ses approvisionnements comme le montre le tableau 3. En période de prix bas sur le marché mondial, elle aura ainsi tendance à ralentir sa production (aux coûts d'extraction élevés) pour s'approvisionner sur le marché tout en épargnant ses ressources.

En termes de producteurs, la figure 7, si elle montre un nombre limité d'acteurs, met en évidence leur diversité. Cinq producteurs des Amériques représentent près de 42 % de la production mondiale, quatre sont des producteurs de cuivre : Freeport Mc Moran, Kennecot (Rio Tinto), Codelco, Grupo Mexico, alors que Thomson Creek est un producteur de molybdène seul. Ces cinq sociétés ont des niveaux de production supérieurs à 10 000 t de métal soit l'équivalent de plus de 5 % de la production mondiale. En ce qui concerne la Chine, nous avons regroupé tous les acteurs en raison du manque de clarifications sur l'indépendance des différentes sociétés exploitantes vis-à-vis de l'État chinois. Nous assumons donc des comportements de concert. Le pays dispose avec environ 81 000 t de production de près de 37 % de la production mondiale. Il n'est donc pas en situation de monopole et pourra d'autant moins le devenir qu'environ 46 % de la production mondiale a un statut de sous-produit de la mine de cuivre pour des approvisionnements extérieurs à la Chine. La Chine est

d'autant moins en situation de tuer le marché que ses coûts de production sont élevés, notamment pour les gisements de shales noirs, qui, selon nos estimations, pourraient représenter plus de la moitié des approvisionnements chinois.

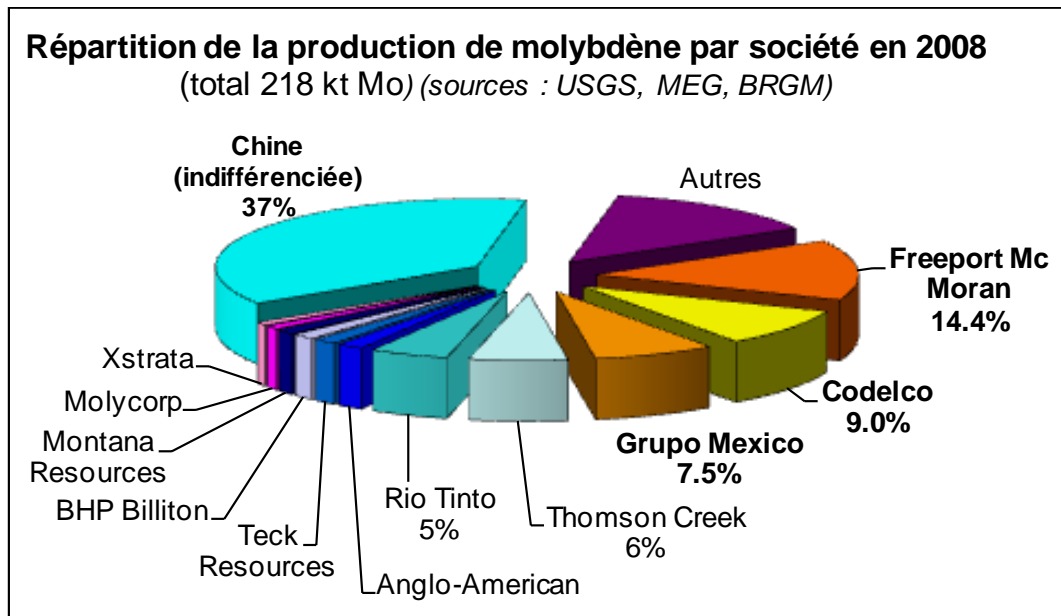


Figure 7 - Répartition de la production minière de molybdène par sociétés en 2008.
Source MEG, USGS, BRGM.

Les groupes miniers majors et diversifiés, quand ils sont présents, le sont pour des tonnages limités : BHP Billiton environ 3 000 t, Xstrata 2 800 t, Anglo-American 3 500 t, Vale est absent. Seul Rio Tinto fait exception avec une production de 10 600 t grâce au seul gisement de porphyre cuprifère de Bingham Canyon aux États-Unis.

L'intégration dans l'amont minier des acteurs des filières consommatrices ne semble le fait que de groupes japonais : au Chili (Collahuasi), au Pérou (Cerro Verde), ou de sociétés allemandes, comme la société Cronimet spécialisée dans les ferro-alliages et qui a pris en 2004 une participation de 60 % dans la société Zanzegur Copper Molybdenum Company (Zanzegur) en Arménie (voir tabl. 2).

4.2. LA RESSOURCE

Dans la nature, le molybdène se rencontre sous forme de sulfure : la molybdénite, de formule MoS_2 , minéral le plus répandu et le seul exploité. Elle contient 60 % de molybdène. Ses autres formes d'occurrence sont en général des molybdates dont le plus fréquent est la wulfénite, molybdate de plomb de formule PbMoO_4 . Signalons également la castaingite, sulfure de cuivre et molybdène de formule CuMoS_2 et la jordisite, forme de molybdénite de basse température.

Les gisements les plus fréquents de molybdène sont des gisements disséminés de type porphyres à cuivre dominant (Bingham aux USA, Cananea au Mexique, Kounrad au Kazakhstan) ou porphyres à molybdène seul (Cimax, Henderson aux USA, La

Corne au Canada, Yangchuling en Chine) qui fournissent l'essentiel de la production économique. Toujours en liaison avec des plutons granitiques, le molybdène est également lié aux gisements de métamorphisme de contact, voire aux systèmes filoniens avec cuivre arséniés.

Enfin, le molybdène peut se rencontrer dans les formations sédimentaires sans relation avec les plutons dans les dépôts de cuivre sédimentaires exhalatifs : type Kupferschiefer comme ceux de Pologne ou dans les filons à uranium, cobalt, cuivre et nickel rencontrés dans les formations carbonatées (Shinkolobwe en RDC).

D'une manière générale, le molybdène a tendance à se concentrer dans les sédiments marins riches en matière organique (sapropels), ce qui explique sa présence dans les schistes riches en produits bitumineux et charbonneux avec notamment des sulfures de vanadium mais aussi dans les sables bitumineux qui constituent les ressources pétrolières du XXI^e siècle et dans lesquels il ne manquera pas d'être récupéré s'il ne l'est pas encore.

4.2.1. Les porphyres

Un porphyre minéralisé est un gisement disséminé à basse teneur associé à un système plutonique de faible profondeur (de 1 à 5 km), avec des roches à texture porphyrique et situé juste sous un volcan. Il est composé de petites intrusions polyphasées emboîtées de roches plutoniques calco-alcalines : diorites, granodiorites, voire andésites, voir Jebrak *et al.* (2008) [6].

Ces gisements sont liés aux zones de subduction, ils sont présents aussi bien dans les arcs insulaires comme Panguna (Ile de Bougainville) que dans les cordillères continentales comme la cordillère des Andes où les gisements existent jusqu'à 100 km des côtes. Dans la mesure où les intrusions superficielles porteuses occupent des zones de distension soumises à une remontée du bâti, elles sont souvent rapidement érodées, ce qui explique que la majorité de ces gisements soient mésozoïques et surtout cénozoïques. On connaît cependant des porphyres à cuivre et molybdène dès le Protérozoïque (Liptako au Niger, Malanjhand en Inde). Le spectre d'éléments récupérés est large, il inclut le plus souvent, outre le cuivre et le molybdène, l'or et l'argent, voire le zinc. Les teneurs moyennes d'exploitation sont faibles : de 0,2 à 1,5 % Cu, de 0,005 % (50 ppm) à 0,03 % (300 ppm) Mo et de 0,004 à 1,5 ppm Au. Par contre et c'est là le paradoxe, les tonnages de minerais sont si monstrueux que les porphyres constituent de gros gisements en terme de ressources avec des volumes minéralisés de l'ordre du km³ et des réserves qui peuvent atteindre dans le cas de Chuquicamata au Chili 65 Mt de cuivre contenu et 1,3 Mt de molybdène [6].

La minéralisation se présente sous forme de stockwerks, de filonnets, de disséminations, de pipes bréchiques, voire de zones de remplacement.

L'intérêt de ces gisements à basse teneur est de pouvoir être exploités à ciel ouvert et donc de bénéficier d'économies d'échelles qui permettent des coûts d'exploitation relativement faibles même si les investissements en capital demeurent élevés.

Les porphyres à molybdène prédominant constituent un type de gisement particulier, plus siliceux, sans cuivre et avec fluorine. Le rôle économique des porphyres à molybdène est fondamental non seulement pour ce métal mais aussi pour le tungstène dont ils représentent les plus grosses réserves mondiales. À noter que le porphyre à molybdène de Mount Pleasant au Nouveau Brunswick contient en outre 25 % des réserves mondiales répertoriées d'indium.

La découverte du gisement de Merlin en Australie constitue une illustration de la diversité et de l'importance pour les approvisionnements des gisements rattachés au type porphyre. Selon l'étude d'orientation publiée en août 2010 par la société d'ingénierie SRK, ce gisement atypique, en l'état actuel des reconnaissances -qui ne sont pas encore terminées- serait d'importance mondiale pour le molybdène avec près de 90 000 t de molybdène contenu à des teneurs proches de 1 %, mais surtout le contenu en rhénium atteindrait 155 t, soit 3 ans de consommation annuelle avec des teneurs proches de 20 ppm. Le gisement est situé dans la province du Queensland au centre nord de l'Australie au sein de la formation géologique de Mount Isa. Les ressources indiquées plus estimées sont présentées dans le tableau 3 ci-après.

Gisement de Merlin, Queensland	Tonnage de minerai	Mo (%)	Re (ppm)	Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Ag (g/t)	Au (g/t)	Co (ppm)	Density
Ressources indiquées	6.5 Mt	1.34	23.3	0.33	0.14	0.02	8.3	0.08	81	2.62
Ressources supposées	0.2 Mt	0.85	15.1	0.44	0.24	0.02	8.2	0.13	91	2.67
Ressources totales	6.7 Mt	1.34	23.2	0.34	0.14	0.02	8.3	0.09	81	2.62
Métal contenu (t)		89 780	155	22 780	9 380	1 340	55.6	0.60	543	

Tableau 3 - Ressource indiquée et estimée du gisement de molybdène et rhénium de Merlin, Queensland, Australie (Ivanhoe mining, source de l'information : <http://www.ivanhoeaustralia.com/s/Merlin.asp>)

4.2.2. Les gisements sédimentaires exhalatifs liés à des schistes noirs

Ces gisements constituent une ressource majeure pour le cuivre dans les gisements de type Kupferschiefer. Dans ces gisements, le molybdène, bien qu'il soit présent à des teneurs significatives, n'est pas récupéré. Par contre, des gisements exhalatifs sédimentaires à molybdène et nickel sont activement exploités en Chine. Nous allons présenter brièvement ces deux types de gisements et les enjeux qu'ils représentent pour la mine du molybdène.

Dans ces gisements, les niveaux minéralisés se caractérisent par leur faible puissance (20 à 60 cm, exceptionnellement 2 m), une continuité sur de grandes étendues et des teneurs élevées, de 1 à 4 % pour le cuivre, de 5 à 7 % pour le molybdène. Ils ont été considérés comme syngénétiques du fait de la conformité et de la grande continuité latérale de la minéralisation et de leur lien avec les facies sédimentaires. Cependant, le caractère hydrothermal de la paragenèse, la liaison avec des failles, le caractère discordant en grand et les âges isotopiques plaident pour un modèle épigénétique

faisant appel à des fluides oxydants venant des bassins et rencontrant des fluides plus réducteurs dans les horizons riches en matières organiques [6].

Les gisements de type Kupferschiefer

L'exemple le plus typique est constitué par les gisements de cuivre de type Kupferschiefer d'Europe centrale qui se caractérisent par un niveau minéralisé puissant d'environ 0,6 m mais connu, à l'échelle du bassin permien du Zechstein, sur plus de 600 000 km², tout en n'étant exploitable que sur 0,2 % de sa superficie, soit sur la bordure méridionale du bassin en Allemagne et en Pologne.

Dans ces deux pays, le Kupferschiefer a produit plus de 68 Mt de cuivre à des teneurs de 1,5 % de Cu. La minéralisation se caractérise par un large spectre d'éléments associés en traces. On a identifié près de 51 éléments contenus en plus des éléments principaux qui sont le cuivre, le plomb et le zinc. Il s'agit notamment des métaux de transition : Ni, Co, V, Mo, mais aussi, le plus souvent en traces, des éléments du groupe du platine, de l'or et de l'uranium. Selon Knitzschke, la teneur moyenne en molybdène de la partie allemande des shales du bassin du Kupferschiefer (région de Mansfeld) est de 0,015 %, soit 150 ppm. Les niveaux exploités pour le cuivre s'étendant en fait non seulement aux niveaux de shales mais aussi aux formations encaissantes, la teneur en molybdène du minerai de cuivre est différente. Pour la Pologne où ces formations sont encore exploitées, il est possible de l'appréhender à travers les statistiques officielles publiées par le ministère de l'environnement polonais. Ainsi, le minerai de cuivre extrait en 2007, soit 30 Mt avait un contenu en molybdène de 1 340 t, ce qui correspond à une teneur moyenne de 54 ppm dans le minerai de cuivre, soit trois fois moins que les shales en raison de la dilution liée à l'encaissant. Il convient de comparer ce chiffre aux teneurs moyennes de récupération dans les porphyres cuprifères à molybdène qui peuvent descendre jusqu'à 20 ppm (mine de Zangezour en Arménie).

À l'échelle des gisements, le molybdène se concentre particulièrement, comme les autres métaux de transition (Ni, Co, V), dans les parties inférieures des shales noirs où les teneurs en Mo peuvent varier entre 200 et 500 ppm (communication orale de J. Gouin, BRGM, et H. Kucha [23]). Le molybdène, auquel est associé le rhénium se présente sous forme de castaingite (CuMoS₂) ou de jordisite (MoS₂) molybdénite de basse température.

À ce jour, il semble cependant qu'il n'existe pas encore de procédé de récupération économiquement viable pour le molybdène en tant que sous-produit des gisements de cuivre de type Kupferschiefer. Cet état de fait est probablement à mettre en relation avec le grain très fin de la minéralisation, de son association avec la matière organique et des teneurs assez basses du minerai, le plus souvent inférieures à 100 ppm, voire proches de 50 ppm.

Compte tenu de l'ancienneté de l'exploitation du cuivre en Pologne et en Allemagne, le contenu en molybdène des résidus d'exploitation et de traitement des minerais de cuivre pourrait se situer entre 90 000 et 180 000 t. Si ces résidus sont encore accessibles et sous réserve d'inventaire, ils pourraient constituer une ressource

secondaire en molybdène non négligeable mais dont la valorisation économique repose sur le développement de nouvelles technologies de traitement.

Les gisements de shales noirs à molybdène et nickel.

Ces gisements ne sont à ce jour exploités qu'en Chine. Aucune concentration économique de molybdène de ce type n'a été identifiée ailleurs à ce jour à notre connaissance.

L'horizon de shale noir concerné est d'âge cambrien inférieur et s'étend sur près de 1 600 km dans le sud de la Chine où il marque la transgression Cambrienne. Des concentrations exploitables ne sont cependant rencontrées que dans les provinces de Guizhou et de Hunan, respectivement dans les districts de Zunyi et de Zhangjiage (gisements de Daping, Sansha, Ganziping et Houping) pour un total de 7 exploitations (Coveney, 2003) [24].

Dans le seul district de Huangjiawan où se rencontrent les niveaux les plus épais, puisqu'ils peuvent atteindre 2 m alors qu'ils ne font couramment que 0,2 m, les réserves seraient de 240 000 t de molybdène et de 150 000 t de Ni avec des teneurs de 5,5 % en Mo, 3,5 % en Ni (localement jusqu'à 15 % de Ni+Mo, selon Zeng Mingguo (1998) [25] et 1 ppm pour les éléments du groupe du platine et l'or ((Shao-Yong Jiang *et al.*, 2007) [26].

Dans les statistiques accessibles, la production des gisements liés aux shales n'est pas différenciée. Nous ne disposons donc pas des capacités de production des exploitations concernées. Une connaissance plus fine de la situation de la Chine dans ce domaine mériterait d'être développée.

Malgré leur niveau de teneur comparativement plus élevé que pour les porphyres, ces gisements doivent le plus souvent être exploités en souterrain, ce qui implique des coûts de production élevés couplés avec des investissements en capital importants. On comprend donc, dans la situation actuelle, l'avantage compétitif certain dont bénéficient les gisements de type porphyre.

4.2.3. Économie des gisements : coûts de production et investissements en capital

L'analyse des coûts de production du molybdène est d'autant plus difficile à obtenir qu'il a, nous l'avons vu, une situation de sous-produit pour près de 46 % de la production mondiale. Dans de nombreux cas, ces coûts sont consolidés avec ceux du cuivre et donc non accessibles. Un autre usage conduit à imputer la valorisation des sous-produits sous forme de crédits qui viennent s'imputer sur les coûts de production du cuivre sans permettre d'individualiser des coûts spécifiques pour ces sous-produits comme le molybdène. À titre indicatif, nous allons cependant donner quelques éléments de cadrage pour mieux montrer la sensibilité aux prix de certains opérateurs.

Dans le cas de mines récentes ou de projets en cours de développements pour des mines où le molybdène est le produit principal, le groupe Roskill cite des coûts de

production qui peuvent varier entre 4,4 \$US/lb Mo pour la mine de Luoyang (China Molybden) jusqu'à 8,1 \$US dans le cas de Ruby Creek Moly (société Adanac au Canada), tandis que la mine de Thomson Creek (USA) a des coûts opératoires de 7 \$US/lb.

Dans le cas des porphyres cuprifères, pour 2009, le groupe Roskill affiche, pour le molybdène, des coûts qui peuvent s'étaler depuis 0,79 \$US/lb pour l'exploitation de Bingham Canyon (Rio Tinto aux USA) jusqu'à 9,66 \$US/lb pour l'opération de retraitement de tailings de Colihue (société Amérigo Resources au Chili). Ces coûts ne sont que de 2,02 \$US/lb à Antamina au Pérou et de 4,17 \$US/lb pour la mine d'El Teniente appartenant au groupe chilien Codelco.

La sensibilité au prix des mines chinoises est d'autant plus grande qu'aucun sous-produit n'est valorisable. Les coûts de la mine de Huludao (province de Liaoning) auraient variés, d'après les chiffres officiels, entre 10 \$US et 12 \$US/lb en 2009 la rendant non économique en prenant en compte les seuls critères de marché.

Un ordre de grandeur des coûts de développement de nouvelles opérations peut être donné par quelques exemples, sans entrer dans le détail des projets.

Le projet de porphyre de Creston au Mexique (molybdène et cuivre subordonné) dispose de 126 000 t de réserves de molybdène (teneur de 0,071 %). Pour le développer, la société Creston Moly a dû investir 576 M\$US pour une capacité de production annuelle prévue de 9 100 t.

Aux USA, le porphyre à molybdène de Mount Hope, qui dispose de 414 000 t de molybdène contenu à une teneur de 0,018 %, aura nécessité des investissements de 852 M\$US pour le développement d'une capacité annuelle de 15 400 t.

4.2.4. Capacités de production et nouveaux projets

La capacité de production, si tant est que les chiffres disponibles soient suffisamment fiables, est un indicateur indispensable pour apprécier l'élasticité d'un marché. Cette capacité de production correspond aux taux de production maximaux que peuvent soutenir les exploitations et leurs unités de traitement qu'elles soient en activité ou temporairement à l'arrêt. Quand les capacités de production sont employées à plus de 85 %, il convient en général de planifier des investissements pour de nouvelles capacités dans des conditions de marché normales. Cette planification est cependant souvent hasardeuse en situation de forte volatilité des prix et d'incertitudes sur l'évolution de l'économie à moyen terme.

Selon Roskill, les capacités de production annuelles disponibles correspondraient respectivement à 142 000 t pour les gisements à molybdène seul et à 156 000 t pour les gisements à cuivre et molybdène subordonné. Avec un total de 298 000 t, il ressort que les capacités de production ne seraient employées qu'à 67 %. Il est donc raisonnable d'estimer que la production primaire de molybdène, tous types confondus offre une certaine souplesse dans un contexte de progression de la consommation à court terme.

	Site	Nature des opérations			Propriétaire	Capacité de production annuelle prévue de Mo (t)	Date de démarrage envisagée en 2009
		Unité de traitement Mo	Mine Mo sous-produit	Mine Mo seul			
Argentine	Baja de la Alumbreira				Minera alumbreira	4 400	attente
	El pachon		Cu-Mo-Ag		Xstrata Copper	3 000	
	Aqua Rica		Cu-Au-Mo		Yamana Gold	6 800	
Arménie	Teghout		Cu-Mo		Armenia Coper program	1 200	JV
Australie	Kalakaroo (SA)		Cu-Mo-Au		Kalkaroo Copper	1 200	2011
	Spinifex Ridge (WA)		M-Cu		Moly Mines	5 400	2011
	Merlin (Qld)		Mo-Re-Cu-Ag		Ivanhoe Australia	n.d.	2011
Canada	Ruby Creek (BC)			Mo	Adanac Molybdenum	5 400	2010
	Kitsault (BC)			Mo	Avanti Mining	11 600	2012
	Mc Leod Lake (Quebec)		Cu-Mo-Ag-Au		Western Troy Capital	6 000	2012
Chili	Escondida				BHP Billiton/Rio Tinto	6 000	suspendu
	Esperanza		Cu-Au-Mo		Antofogasta	n.d.	2015
	Casreones		Cu-Mo		Pan Pacific Copper	3 000	2013
Chine	Chifeng (Mongolie intérieure)			Mo	Chifeng Haozhou Mining	3 500	2011
	Zhuozi (Mongolie intérieure)			Mo	Middle West Mining	3 300	2010
Equateur	Patanza San carlos		Cu-Mo		Corriente Resources	1 200	2013
Groenland	Malmberg			Mo	Quadra Mining	6 500	attente
Coree du Sud	Sangdong		Mo-W		Oriental Minerals	2 100	faisabilité
Mexique	Creston (Sonora)		Mo-Cu		Creston Moly	9 100	2012
Panama	Petaquilla		Cu-Mo		Petaquilla Minerals	3 000	2014
Perou	Toromocho		Cu-Mo-Au		Chinalco	5 400	2014
	Quellaveco		Cu-Mo		Anglo-American	n.d.	attente
	Magistral		Mo-Cu		Inca Pacific / Quadra Mining	2 900	2012
	Rio Blanco		Cu-Mo		Monterrico Metals	1 800	2011
	Galeno		Cu-Au-Mo		Northern Peru Copper	2 300	attente
	Tintaya				Xstrata	1 500	2010
Russie	Chelyabinsk		Cu-Au-Mo		Eureka Mining	n.d.	attente
USA	Mount Hope (Nevada)			Mo	Eureka Moly	15 400	2012
	Pebble (Alaska)		Cu-Au-Mo		Northern Dynasty	14 500	2016
	Climax (Colorado)			Mo	Freeport McMoRan	13 600	en attente

Tableau 4 - Principaux projets molybdène en 2009 : nature, capacités annuelles et échéances.

Cette souplesse est encore accrue par les nouveaux projets en cours de développement ou programmés. Le tableau 4 présente les principaux projets actuellement en attente ou en cours de développement. Soulignons que les plus gros projets sont majoritairement situés aux Amériques, parmi ceux-ci citons les projets de mine en Argentine : Aqua Rica (6 800 t annuelles), au Canada : Kitsault 11 600 t, McLeod Lake 6 000 t et les projets américains qui, à eux seuls, cumulent plus de 45 300 t avec respectivement les nouvelles exploitations de Mount Hope (Nevada), 15 400 t ; Pebble en Alaska, 14 500 t ; sans oublier la réouverture de la mine de Climax par Freeport Mc Moran (13 600 t) toujours suspendue.

4.3. DU MINERAI AU MÉTAL : ÉTAPES DE LA TRANSFORMATION ET FILIÈRES INDUSTRIELLES

Représentée par la figure 8, cette filière comporte :

- l'exploitation minière de la molybdénite (MoS_2) principal minerai exploité ;
- le concassage, le broyage, puis la flottation sélective du minerai, afin d'obtenir un concentré de molybdénite. Une petite partie de cette production est commercialisée pour la production de lubrifiants ;
- le grillage de la molybdénite pour la production d'oxyde technique de molybdène (OTM, essentiellement du trioxyde MoO_3 impur), un produit en partie commercialisé pour la production de fer et d'acier au molybdène, ainsi que pour la production de produits chimiques à base de molybdène ;
- la purification de l'OTM, suivi de la réduction de l'oxyde molybdique pur (MoO_3), dont la majeure partie sert à la production de ferromolybdène, le principal produit dérivé du molybdène, intrant pour la production d'une vaste gamme d'aciers au molybdène. Le reste de l'oxyde pur est réduit pour la production de poudre de molybdène pur qui est commercialisée ;
- le frittage ou l'électrofusion de la poudre de molybdène pour l'obtention de pièces en molybdène pur et les applications du molybdène ultra-pur en électronique.

Organigramme simplifié de la production du molybdène et des produits dérivés à partir de la molybdénite

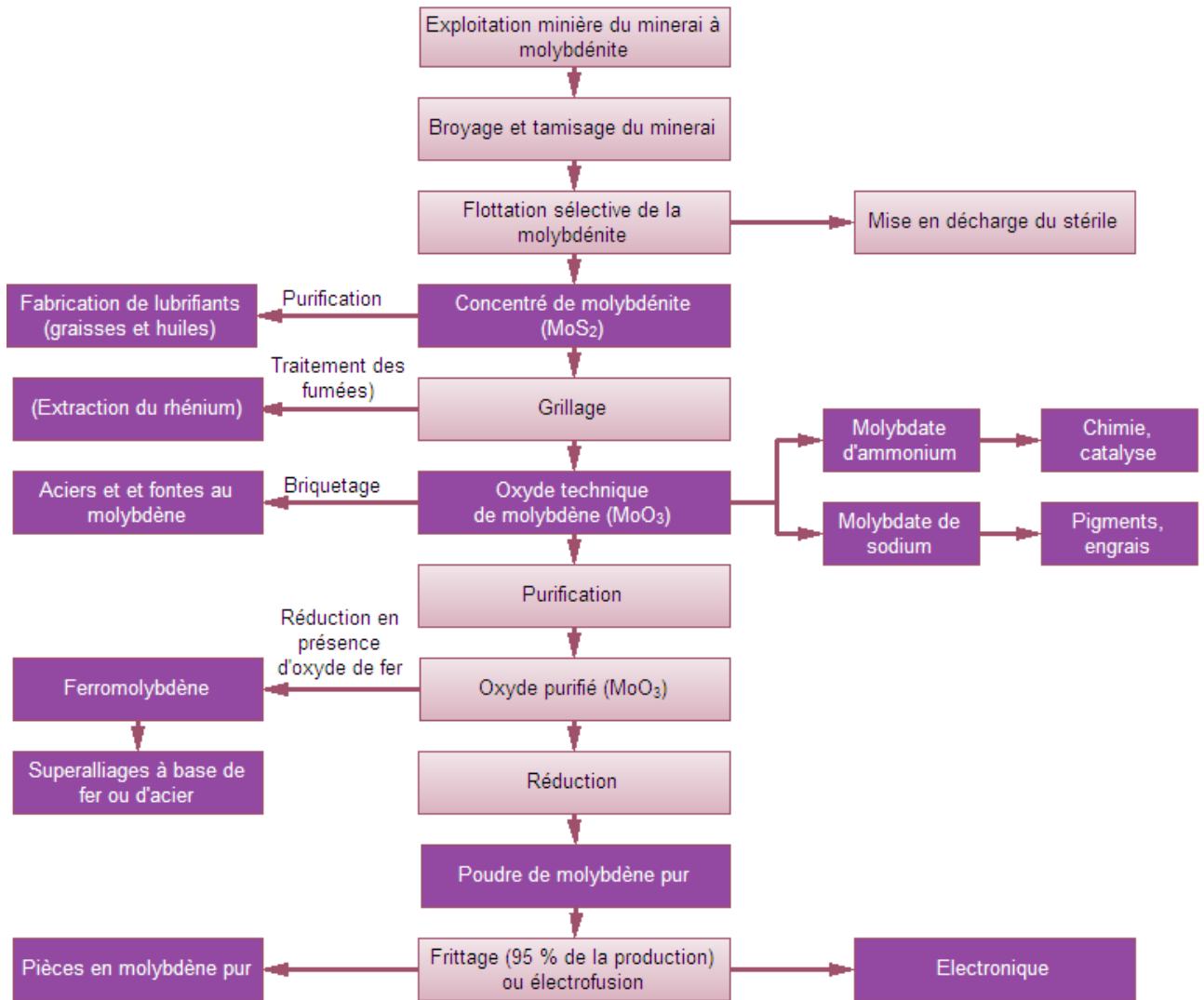


Figure 8 - Schéma de la filière de la production du molybdène à partir de la molybdénite, représentant les étapes de la production (cases roses) et les principaux produits intermédiaires commercialisés (cases violettes).

4.4. ÉVOLUTION RÉCENTE DE LA RELATION OFFRE-DEMANDE EN MOLYBDÈNE ET PERSPECTIVES

4.4.1. L'acier, un marché directeur parce que prépondérant (80 % des tonnages)

Selon Roskill (2009) [4], qui cite Steel Market Research, bureau d'études spécialisé en intelligence économique du domaine de l'acier, environ 177 000 tonnes de molybdène primaire et secondaire ont été utilisées pour la production d'aciers, chiffre à rapprocher de la production mondiale de molybdène primaire de 218 000 tonnes [3].

Le marché de l'acier est donc le marché directeur pour la consommation du molybdène qui est et restera pour longtemps un métal d'alliage. Compte tenu de cette remarque, il paraît pertinent de rappeler l'évolution de la consommation mondiale d'acier depuis 1943, année pour laquelle l'USGS a commencé la publication des statistiques de consommation mondiale d'acier.

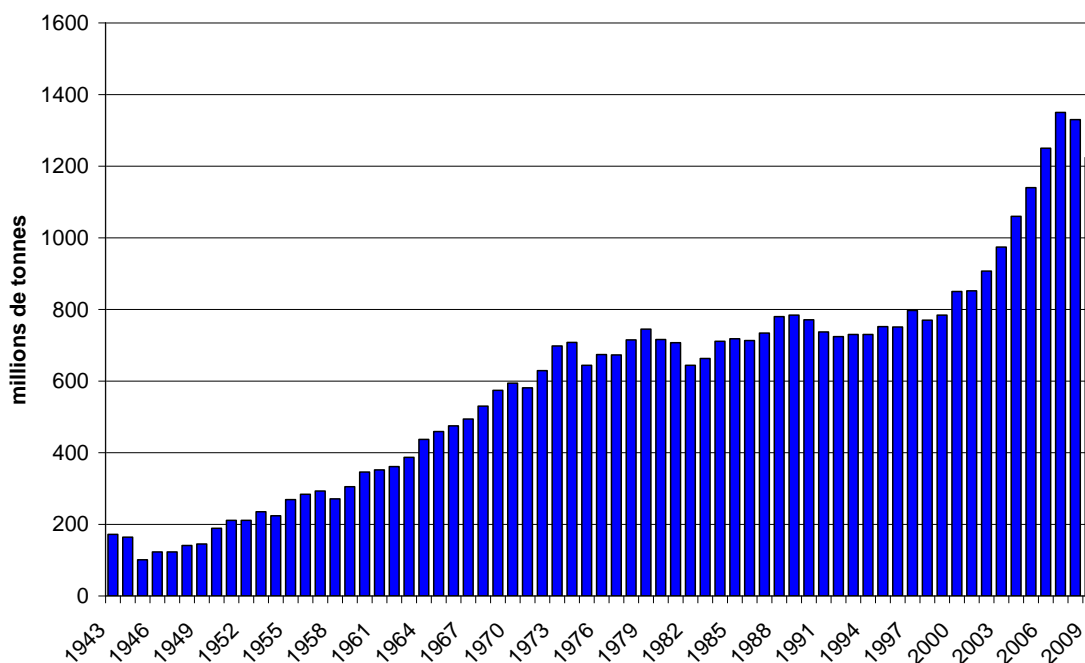


Figure 9 - Consommation mondiale d'acier 1943-2009, en millions de tonnes.
source des données : Maratray (2005) [9], [10, pour les données 2009].

La fin de la seconde guerre mondiale a entraîné une chute de la consommation mondiale d'acier, rapidement compensée par la croissance continue de la consommation d'acier des États-Unis et de l'Europe, quasiment ininterrompue jusqu'en 1974. À cette phase de croissance rapide a succédé une phase de croissance beaucoup plus molle qui a duré jusqu'en 1999, liée à la stabilisation du développement des infrastructures aux États-Unis, en Europe et au Japon, et au développement du recyclage. Depuis 1999, une nouvelle phase de croissance extrêmement rapide de la consommation d'acier a démarré sous l'effet du développement économique rapide de

la Chine. Cette phase de croissance de 9,7 % par an en moyenne, sans précédent dans l'histoire de l'acier au XX^e et XXI^e siècles, a été brutalement interrompue par la crise financière et économique en 2008 et 2009, mais elle devrait reprendre dès 2010.

4.4.2. Un basculement de la polarité géographique de croissance marqué par le développement de la Chine

Ce basculement est bien illustré par le diagramme de la figure 10 qui présente l'évolution de la répartition géographique de la production d'acier entre 1998 et 2008.

Au cours des 10 dernières années, la répartition géographique de la production d'acier a profondément évolué, comme le montre la figure 9, la production d'acier ayant fortement baissé dans les pays développés aux économies matures : Union Européenne, Japon et pays membres de l'accord de libre-échange nord-américain (NAFTA en anglais : Canada, États-Unis et Mexique), alors qu'elle a crû de manière spectaculaire en Chine et, dans une moindre mesure, dans les autres pays asiatiques. Si la production chinoise d'acier constatée en 2008 devait se maintenir au même niveau jusqu'en 2020, alors la Chine aura, pendant la période 2000-2020, produit autant d'acier que les États-Unis entre 1900 et 2020.

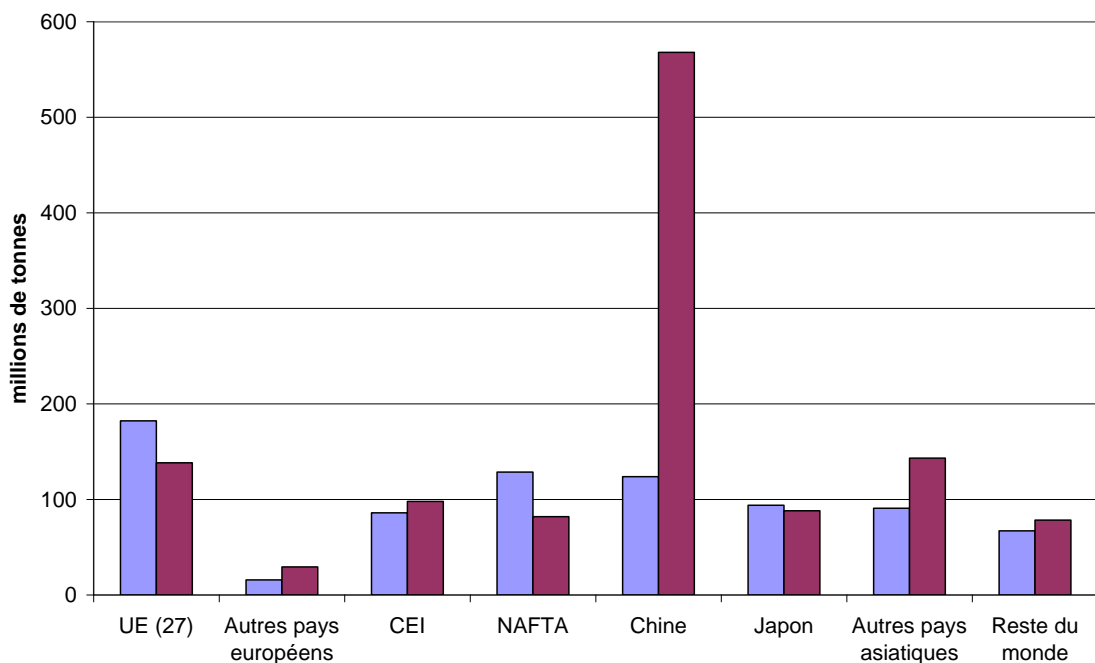


Figure 10 - Évolution de la répartition géographique de la production mondiale d'acier entre 1998 (bleu) et 2008 (violet) - source des données : [10].

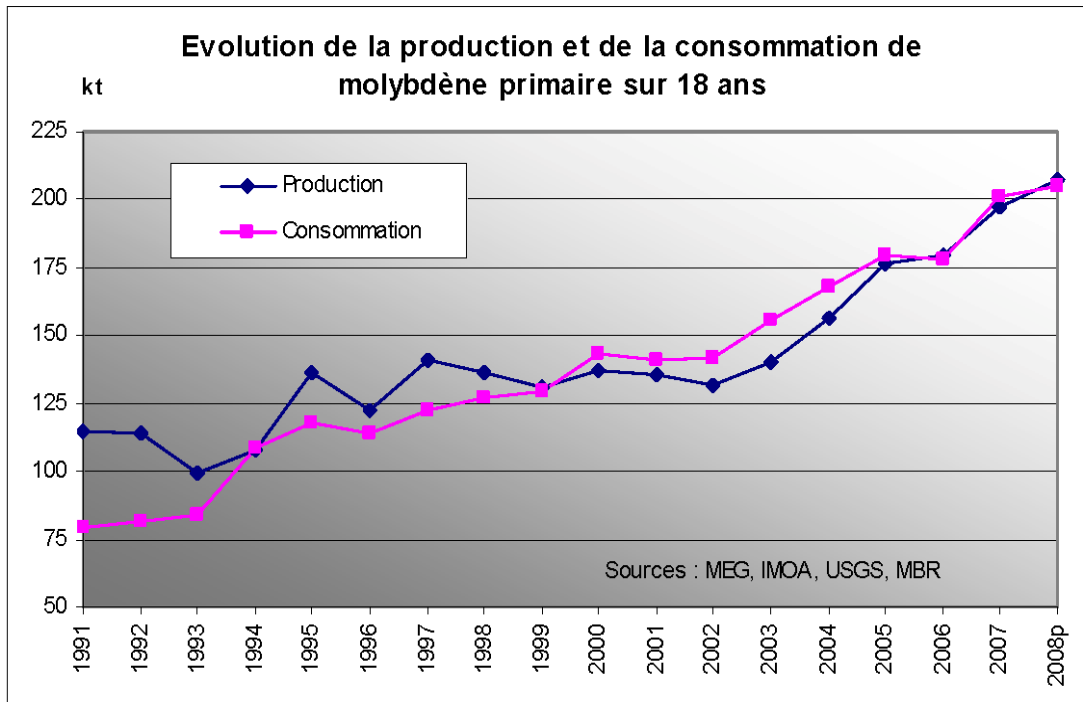


Figure 11 - Évolution de la production et de la consommation de molybdène primaire sur 18 ans.

Au-delà de cet aspect macro-économique, il apparaît que le marché global pour le molybdène primaire (hors recyclage) est passé d'environ 100 000 t en 1990 à environ 218 000 t en 2008, soit un taux de progression annuel supérieur à 4,6 %. Le bureau d'étude Roskill (2009) [4] souligne que, dans le même temps le PNB mondial calculé par le FMI (Fonds Monétaire International) ne progressait lui que de 3,4 %, soit un différentiel de près de 40 %.

À partir de 2007, la progression de la demande s'accélérait encore pour atteindre 5,8 % selon Roskill et si la crise financière n'avait pas mis un coup d'arrêt brutal à cette croissance (baisse entre 7 et 9 % de la demande en volume en 2008 et 2009), il est permis de s'interroger pour savoir si l'offre aurait été en mesure de suivre un tel rythme.

En terme de molybdène contenu, le marché est structurellement à l'équilibre, voire excédentaire, comme l'illustre la figure 11, qui présente la relation entre offre primaire -c'est-à-dire la production minière- et la consommation. L'offre primaire est restée excédentaire jusqu'en 1999 et à partir de 2005 jusqu'à maintenant. Durant la période où l'offre primaire était déficitaire (1999-2005), le différentiel qui représentait moins de 10 % de la consommation totale a pu être comblé sans difficulté par les stocks et le recyclage.

Ceci repose en partie sur la spécificité de l'offre minière présentée dans le chapitre précédent. Celle-ci étant en effet à plus de 47 % un sous-produit de la mine du cuivre (gisements de type porphyre cuprifère et Kupferschiefer), l'offre est contrainte par

l'exploitation du cuivre en forte reprise après la crise financière. De plus, les producteurs majeurs de cuivre dont Codelco, Freeport McMoRan, Grupo Mexico notamment, ont récemment investi pour une meilleure récupération du molybdène dans leurs exploitations.

Les développements miniers en cours -si tous les financements sont assurés- devraient procurer de nouvelles capacités de production minière à hauteur de 46 000 t de Mo contenu par an dès 2013. Les projets concernés sont situés en Australie : Spinifex Ridge (groupe Moly Mines), aux USA : Mount Hope (Eureka Moly), Climax (Freeport Mc Moran) et au Canada : Kitsault (Avanti Mining). Il est donc raisonnable d'envisager un excédent de production à un horizon de 3 à 4 ans en prenant en compte une croissance de celle-ci de 4 à 6 % par an.

Pour le plus long terme, plusieurs éléments permettent d'anticiper une poursuite de cette offre primaire excédentaire, il s'agit notamment :

- du développement de gisements à molybdène en substance principale, qu'ils soient de type porphyre ou shales noirs ;
- du développement de la récupération du molybdène en sous-produit des gisements de cuivre de type Kupferschiefer comme en Pologne qui développe une filière aval incluant l'extraction de rhénium ;
- à plus long terme de la récupération croissante du molybdène, qui accompagnera la montée en puissance de l'exploitation des sables bitumineux (Athabasca au Canada et Orénoque au Venezuela notamment). Les minéraux lourds, auxquels le molybdène est associé, devant impérativement être récupérés pour des raisons environnementales.

4.4.3. Une offre minière structurellement excédentaire

Compte tenu de ces éléments, il est possible de conclure que, macro-économiquement, les relations offre-demande sont équilibrées en termes de métal contenu et devraient le rester même en contexte de croissance soutenue de la demande globale (entre 4 et 6 %/an) à moyen terme (cinq prochaines années).

4.4.4. Un marché durablement fluide malgré le poids de la Chine

Au niveau des échanges, cette situation ne devrait pas fondamentalement être remise en cause par la rétention de molybdène mise en œuvre par la Chine, qui a mis en œuvre le contingentement -durablement prévisible- de ses exportations.

4.4.5. Des goulots d'étranglement en aval de la production minière

Soulignons que, en raison de la segmentation de la filière, une augmentation de la production minière par ouverture d'une nouvelle exploitation, par l'augmentation de capacité ou par l'optimisation de la récupération, ne se répercute pas obligatoirement rapidement aux secteurs consommateurs, compte tenu des goulots d'étranglement situés en aval. L'un d'entre eux est notamment constitué par les capacités de grillage

des concentrés (production d'oxyde technique molybdique -OTM-). Dans ce domaine, le seul accroissement de capacité prévu à court terme est celui de Molymet à Mejillones (Chili), opérationnel depuis 2010 pour une capacité de 15 000 t/an. Il est à noter, nous l'avons vu dans le chapitre précédent, que cette société est une des seules sociétés non minières spécialisée spécifiquement dans l'élaboration de l'oxyde technique molybdique, produit intermédiaire clé de la filière. La société Molymet dispose par ailleurs de capacités non utilisées en Belgique, à travers la société Sadaci acquise en 2002 auprès de la société française Eramet. Par ailleurs, le bon fonctionnement de la filière dépend de l'existence de métallurgies hautement spécialisées (Eramet / Aubert & Duval).

Cette situation n'est cependant pas irrémédiable dans la mesure où les capacités de production peuvent être mises en place relativement rapidement.

4.4.6. Nécessité d'une analyse par filières et par produits

Une analyse plus fine par filière et donc par produits intermédiaires amène à nuancer l'analyse. Les principales spécificités de chaque filière en termes d'approvisionnement sont les suivantes :

- D'emblée, il apparaît que l'approvisionnement en molybdène du secteur des ferro-alliages est d'autant moins problématique que l'importance du recyclage accroît l'élasticité de l'offre et que la filière d'élaboration est courte entre la mine et le métallurgiste. Le nombre d'intermédiaires est en effet limité (cas de la société chilienne Molymet), quand il existe, puisque de nombreuses sociétés minières procèdent elles-mêmes au grillage et mettent sur le marché l'oxyde technique de molybdène qui sera en général mis en œuvre par les sidérurgistes spécialisés.
- Pour la filière des catalyseurs, nous l'avons vu, l'importance de la régénération et du recyclage permet une visibilité assez grande dans l'éventualité de rupture d'approvisionnements en amont.
- En revanche, dans la filière du molybdène métal, en l'absence de filières de recyclage dédiées et compte-tenu du caractère « long » de la filière caractérisée par la multiplication des niveaux intermédiaires, la problématique d'approvisionnement doit se poser. D'abord parce que la visibilité des consommateurs finaux se limite au fournisseur de rang immédiatement précédent et que les spécificités (en terme de teneurs -très hautes puretés- mais aussi de conditionnements) sont telles que la substitution de fournisseurs est très difficile, voire impossible. Dans ce domaine, l'illusion que les volumes demandés étant faibles, l'approvisionnement se fera toujours, ne doit en aucune façon rassurer quant à la sécurité de ces approvisionnements. Compte tenu de l'étroitesse du marché et de ses spécificités, il est illusoire de penser que le marché pourvoira dans des délais brefs, si seulement il est possible qu'il y pourvoie.

Le tableau 2 montre que l'analyse doit à la fois prendre en compte l'évolution de marchés de niches, c'est-à-dire avec des volumes faibles, mais le plus souvent une forte valeur ajoutée compte tenu du contenu technologique, ainsi que l'évolution prévisible des différents marchés. Ce tableau montre que la multiplicité des secteurs finaux d'utilisation nécessite une analyse très fine et que certains marchés peuvent

avoir des croissances très rapides, dans des volumes significatifs : c'est, par exemple, le cas de la filière des couches minces de molybdène dans la filière photovoltaïque (consommation identifiée de 2 000 t qui pourrait doubler à un horizon de 4 ans, si la **recherche ne met pas en avant des solutions alternatives en terme de fonctionnalité et de rapport qualité/prix**).

Ce constat amène à recommander une veille technologique spécifique aux produits de la filière molybdène pur et de ses alliages en termes de spécifications, d'évolution des techniques, d'acteurs, et d'évolution de la demande.

4.5. LES PRIX DU MOLYBDÈNE : STRUCTURE ET SPÉCIFICITÉS

Les concentrés de molybdénite ainsi que les OTM (Oxyde Technique Molybdique) sont échangés soit sur la base de contrats d'enlèvement de long terme, dont les conditions ne sont pas publiées, soit sur le marché spot. Pour les principaux consommateurs, la relation se fait directement sans intermédiaires, du producteur minier au transformateur de rang 1 ; pour les autres, des courtiers et intermédiaires assurent en général les transactions. Parmi les traders et intermédiaires sur le marché européen citons : Scandinavian Steel (Suède), Inter Alloy (Autriche), Metal Trading (Royaume Uni), Hogen (Royaume Uni). Aucun de ces intermédiaires n'est français à notre connaissance. De nombreux intermédiaires existent pour les différentes filières, leur identification dépasse l'objet de l'étude.

Le port de Rotterdam constitue une plaque tournante pour le négoce de ces produits intermédiaires qui peuvent transiter pour des périodes importantes dans les entrepôts de ce port.

Sur le marché européen, les prix sont enregistrés en US\$/lb de molybdène contenu pour l'oxyde molybdique et en US\$/kg de molybdène contenu pour le ferro-molybdène. Sur le marché américain, les prix de ces deux produits intermédiaires sont exprimés en US\$/lb de molybdène contenu.

Les concentrés de molybdénite bruts ou grillés ne sont plus cotés en tant que tels. Leur prix est évalué en équivalent d'oxyde molybdique contenu avec des pénalités suivant les éléments indésirables contenus.

Le différentiel entre prix spot et les prix des contrats d'enlèvement à long terme qui, s'ils ne sont pas publics, peuvent être appréhendés à travers les valeurs déclarées en douane, reflètent en général les tensions sur le marché entre offre et demande.

La plateforme de cotation des métaux du London Metal Exchange (LME) a lancé le 22 février 2010 un contrat sur deux métaux dits mineurs, le cobalt et le molybdène. Pour le molybdène, les contrats à terme vont être proposés sur des lots de 6 t d'oxyde de molybdène (OTM) correspondants à des concentrés de molybdénite grillés.

La figure 11 illustre le comportement des prix du molybdène, à la fois en contexte de tension sur l'offre de février 2004 à mi-2005, avec un quadruplement des prix, de

moins de 35 \$/kg avant février 2004 à plus de 80 \$ en mai 2005, suivi d'une baisse aussi rapide fin 2005 dès le ré-équilibrage entre offre et demande. Ce cycle a été suivi, à partir de février 2006 par une croissance régulière des prix sans qu'ils atteignent à nouveau les sommets de 2005, jusqu'à la chute brutale, comme les prix de pratiquement toutes les autres matières premières, avec la crise économique et financière de l'automne 2008. Depuis mi-2009, les prix ont légèrement remonté, sans toutefois atteindre les niveaux de la période 2005 - mi-2008, ni la même vigueur de hausse que les prix de certaines autres substances comme le cuivre.

Le prix du molybdène contenu dans l'oxyde technique molybdique est ainsi repassé de 20,3 \$/kg en moyenne sur 6 mois de décembre 2008 à mai 2009 à 37,2 \$/kg de novembre 2010 à avril 2011, soit une progression de 83 % sur environ deux ans.

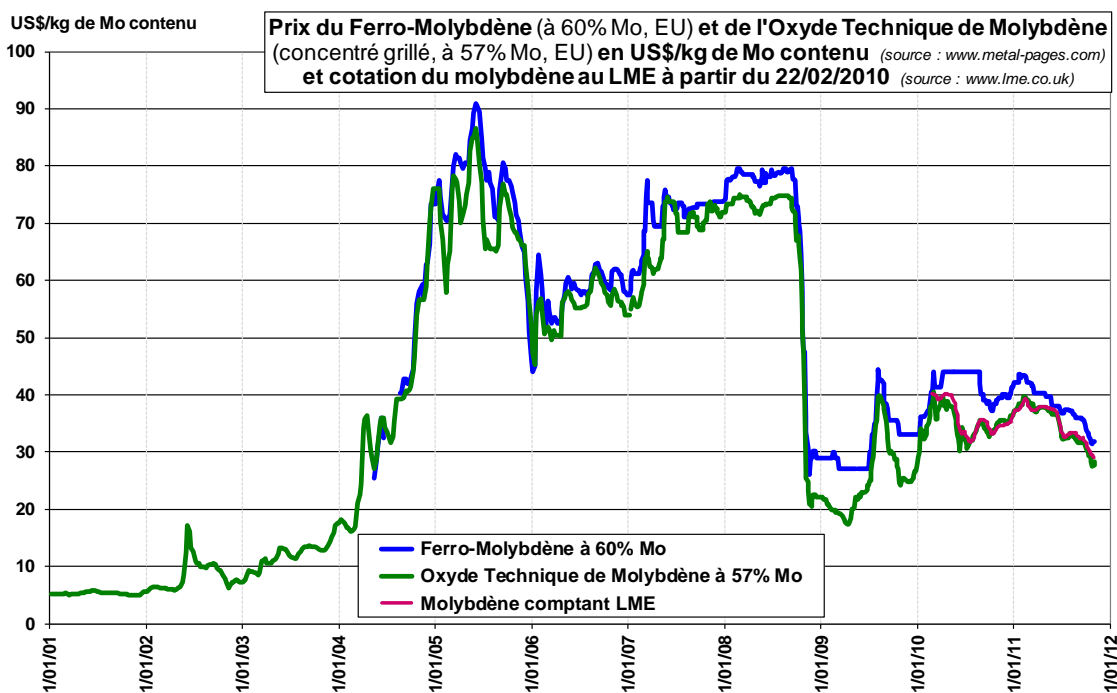


Figure 12 - Évolution du prix du ferromolybdène Mo 60 % du⁴, de l'oxyde technique de molybdène, et du molybdène au LME⁵ depuis février 2010 (mis à jour octobre 2011).

Dans un contexte de reprise économique qui semble se confirmer, les prévisionnistes divergent sur les anticipations d'évolution des prix. Un des éléments déterminants pour l'équilibre du marché, et donc la fermeté des prix sera l'attitude de la Chine : va-t-elle exporter sur le marché mondial au cours des prochaines années et, si oui, pour quels tonnages ? Une première indication semble être donnée par les dernières prises de position des dirigeants de ce pays :

- mise en place de quotas d'exportation ;

⁴ du = "Duty Unpaid" = Taxes d'exportation non payées

⁵ LME = London Metal Exchange

- taxes de 15 à 20 % à l'exportation ;
- classement du molybdène parmi les substances stratégiques à partir de 2011. À ce titre, l'exploitation pourrait en être contingentée sur le sol chinois.

Face à ces décisions politiques et compte tenu du contingentement de la production électrique qui devrait encore perdurer, il est peu probable à court terme (2 à 3 ans) que la Chine redevienne un exportateur net de molybdène comme elle l'était redevue fin 2009.

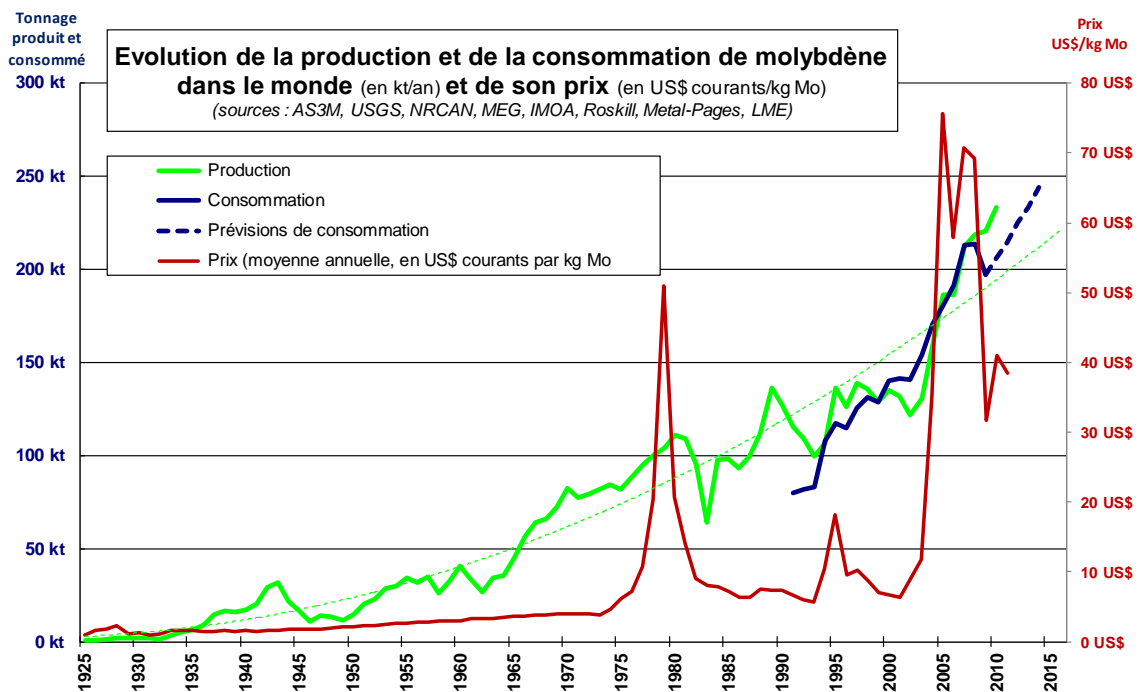


Figure 13 - Relation offre-demande-prix du molybdène entre 1999-2009.

La figure 13 montre clairement l'élasticité de l'offre minière face à l'explosion de la demande, mais aussi, son inertie en cas de reflux brutal de la consommation et des prix. Ceux-ci, outre les phénomènes de spéculation qui ne manqueront pas d'être amplifiés par la mise en place des marchés à terme, seront également conditionnés par la gestion des stocks. La Chine a en effet profité des prix bas et de l'abondance des matières pour amasser des stocks dont l'importance est difficile à cerner. D'après les informations recueillies au cours d'une conférence organisée par Metal Bulletin en mars 2010 à Hong Kong, ils pourraient atteindre 45 000 t, soit l'équivalent de 21 % de la consommation globale.

Compte tenu de tous ces éléments, une fermeté des prix à moyen terme (5 ans) peut être raisonnablement envisagée.

5. Conclusions

5.1. SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

Le tableau ci-après décompose la criticité du molybdène. L'offre primaire, c'est-à-dire en provenance de la mine, est peu critique pour le moyen terme.

RISQUES PESANT SUR LES APPROVISIONNEMENTS					IMPACTS ÉCONOMIQUES EN CAS DE TENSIONS SUR LES APPROVIS.
Quantités et concentration géographique des ressources et réserves	Concentration des exploitations minières et des raffineries	Restrictions au libre commerce de la matière première	Existence de problèmes environnementaux spécifiques à la filière	Concentration de la métallurgie	Criticité économique de la filière
2	2	3	1	3	4
<p>L'offre minière est diversifiée tant géographiquement qu'en termes d'acteurs.</p> <p>Le 1^{er} producteur mondial, l'américain Freeport McMoRan représente 14 % de la production mondiale. L'offre des autres producteurs varie entre 1 et 8 % de la production mondiale.</p> <p>Les deux Amériques cumulent plus de 80 % des réserves, estimées à plus de 50 ans de consommation</p>	<p>Le molybdène est à 46% un sous-produit des porphyres cuprifères. Cette qualité de sous-produit est un élément stabilisateur pour l'offre et sa diversification.</p> <p>Il existe un seul raffineur indépendant des sociétés minières, Molymet (Chili) auquel Eramet a vendu ses raffineries européennes</p>	<p>La Chine qui représente près de 37 % de la capacité de production mondiale est handicapée par des gisements à fort coût d'extraction.</p> <p>Elle a mis des restrictions à ses exportations et devra donc s'approvisionner sur le marché mondial. Sur lequel elle ne manquera pas de peser</p>	<p>La stabilité environnementale du molybdène en fait un métal éco-compatible appelé à être privilégié dans les applications en conditions extrêmes</p>	<p>La filière des ferro-alliages qui représente plus de 80 % des utilisations est diversifiée en terme d'acteurs.</p> <p>En revanche la filière du molybdène métal comporte moins de 3 acteurs (Autriche)</p>	<p>En cas de tension économique, les filières des catalyseurs et du molybdène métal sont les plus sensibles. Surtout la seconde pour laquelle il n'existe pas de filière de recyclage dédiée.</p> <p>Dans les deux domaines les acteurs sont principalement européens</p>

Tableau 5 - Composantes de la criticité du molybdène.

Cette criticité est schématisée en figure 14 ci-après.

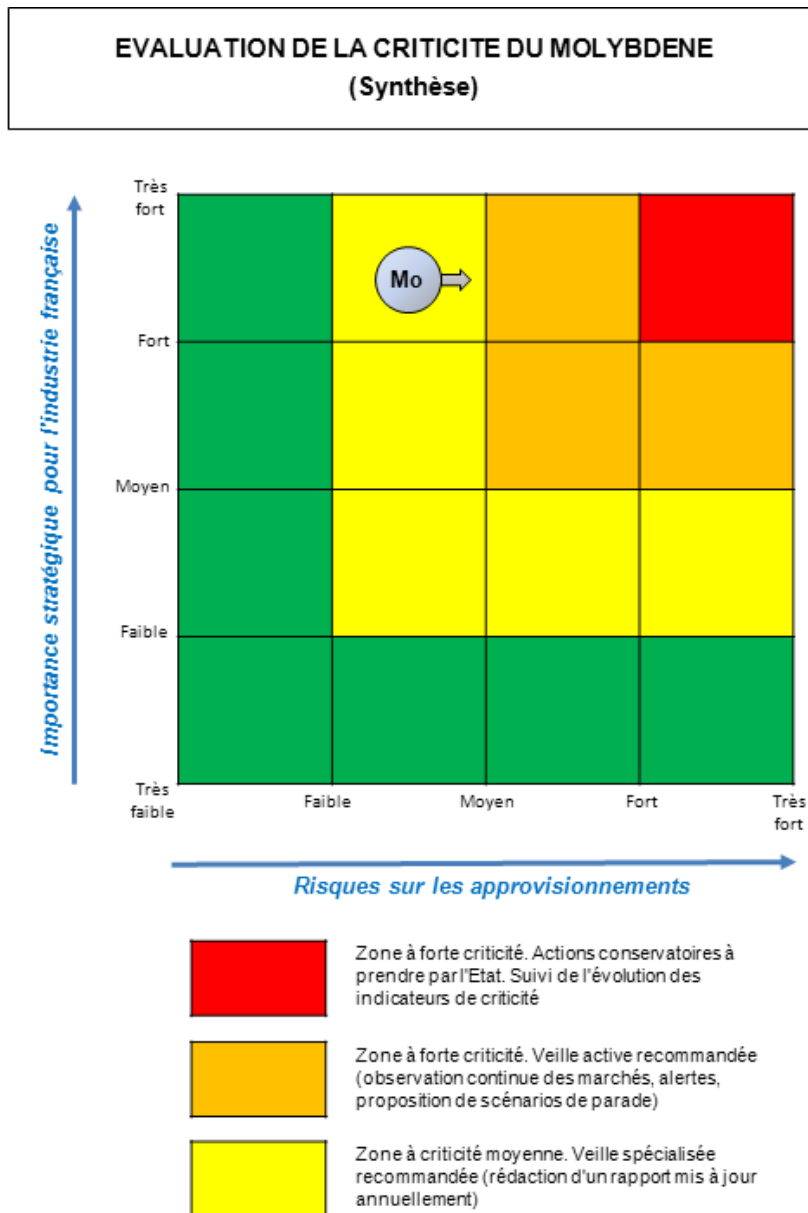


Figure 14 - Synthèse de la criticité du molybdène.

5.2. PARTICULARITÉS DE LA FILIÈRE MOLYBDÈNE

5.2.1. Une offre minière structurellement excédentaire et diversifiée

La progression de la demande de molybdène devrait rester soutenue et diversifiée, notamment dans les domaines de l'énergie (pétrole, photovoltaïque) ainsi que de l'électronique. Cette progression est attendue de un à deux points supérieure à la croissance mondiale pour le moyen terme, d'autant plus que ses performances en conditions extrêmes rendent le molybdène difficilement substituable.

Dans ce contexte, l'offre minière devrait rester excédentaire et les prix fermes pour le moyen terme. Cette offre minière est diversifiée, aussi bien géographiquement qu'en termes d'acteurs. Pour une production minière estimée à 218 000 t en 2008, il apparaît qu'un seul acteur assure plus de 10 % de l'offre : le groupe Freeport McMoRan avec 14 % des tonnages. Les autres sociétés ont des parts de marché qui varient entre 1 et 8 %. Le statut du molybdène étant celui d'un sous-produit de l'exploitation minière du cuivre pour près de 46 % de la production mondiale est un élément stabilisateur pour la filière, d'autant plus que la majorité de cette offre en terme de capacité minière aussi bien que de nouveaux projets est située dans les Amériques.

La stratégie de la Chine, exposée ci-après, ne devrait pas modifier cet équilibre.

5.2.2. Stratégie de la Chine

La Chine assure 37 % à 40 % de l'offre primaire, ce qui est important mais ne la place pas en situation de contrôler ou tuer le marché comme cela a pu être le cas pour d'autres substances.

En 2009, la Chine est devenue le plus gros consommateur mondial de molybdène. La consommation apparente a atteint 26 % de la demande mondiale en 2010 selon Platts. Elle a annoncé le classement du molybdène en substance stratégique à partir de 2011. Elle a instauré des quotas de production et d'exportation et des taxes à l'exportation, aussi bien pour l'oxyde molybdique que le ferromolybdène. Ces mesures ont même conduit les États-Unis à introduire une plainte à l'OMC contre la restriction des exportations de molybdène par la Chine.

Elle cherche à épargner ses ressources et à s'approvisionner à meilleur coût, ses exploitations ayant en effet globalement des coûts de production élevés comparativement aux exploitations des Amériques. Alors que le molybdène est pour une large part un sous-produit de l'exploitation minière du cuivre, essentiellement à travers les porphyres cuprifères, la production chinoise de molybdène est une production minière où le molybdène est la substance principale. Elle est donc beaucoup plus sensible aux variations du coût de production. Ainsi, lors de la crise de fin 2008 début 2009, le prix de molybdène a chuté à 8,75 \$/lb, c'est-à-dire bien en deçà du coût de production moyen des mines chinoises, estimé à 11 \$/lb (2011), contraignant à la fermeture de nombreuses mines de la région de Huludao.

Selon l'IMOA, la demande mondiale en molybdène sur la période 2009-2019 devrait croître de 4,5 % par an. Toutefois, la mise en production de nombreux porphyres à cuivre-molybdène à partir de 2014 devrait augmenter considérablement la production de molybdène en sous-produit. De plus, aux États-Unis en particulier, plusieurs gisements très importants de molybdène joueront dans l'avenir le rôle de producteurs d'ajustement (« swing producer ») : Henderson, Thomson Creek, Climax, Mont Hope, Bingham Canyon, etc., avec pour conséquence un lissage des cours par écrêtage. Contenu de ces évolutions, la Chine devrait devenir de plus en plus importatrice nette de molybdène à moyen et long termes.

La Chine a commencé à prendre des positions à l'étranger : Chinalco, notamment détient le projet de Toromocho au Pérou (porphyre à Cu, Mo, Au, capacité de production prévue de 5 400 t/an).

5.2.3. Spécificité de la filière molybdène métal

L'analyse réalisée a permis de préciser la criticité en sériant les enjeux suivant les trois sous-filières concernées : les ferro-alliages, les catalyseurs et le molybdène métal et ses alliages. Pour les deux premières filières, les tonnages concernés, ainsi que la diversité des acteurs et l'existence de filières de recyclage, semblent un gage pour limiter la criticité des approvisionnements en demi-produits. Ce n'est pas le cas dans la filière du molybdène métal et de ses alliages.

Cette filière aval caractérisée par les produits les plus élaborés et donc à forte valeur ajoutée correspond à des demandes en volume faibles, de quelques centaines de tonnes en général, voire beaucoup moins, mais pour des spécifications très strictes en terme de pureté ou de conditionnement des produits intermédiaires. Cette situation amène à présenter une stratégie d'action pour cette filière du molybdène métal.

5.3. RECOMMANDATIONS

Face à la criticité spécifique de la sous-filière du molybdène métal et de ses alliages, nous allons brièvement présenter les stratégies qu'il est possible de mettre en œuvre.

5.3.1. La constitution de stocks

Cette stratégie a historiquement fait l'objet d'une politique active de la part des États-Unis durant la guerre froide. La D.L.A. (Defense Logistic Agency) a donc amassé et géré des stocks pour un grand nombre de substances. La fin de la guerre froide et l'idéologie du tout marché ont amené un revirement complet au cours duquel la D.L.A. a écoulé sur les marchés internationaux une part importante des différents stocks.

En l'absence prévisible de tension sur l'offre primaire, de tels stocks pour le molybdène devraient concerner des produits intermédiaires : barres, lingots ou poudres. Une des difficultés de l'opération réside dans la valeur ainsi immobilisée et donc, dans le mode de financement de ces stocks.

La mise en œuvre d'une telle stratégie suppose une analyse fine de la sous-filière concernée, ainsi qu'une large concertation des acteurs impliqués, professionnels ou institutionnels. Il est en effet impératif d'identifier les produits et les spécifications concernées.

5.3.2. Le développement du recyclage

Cette stratégie est déjà largement développée pour les deux sous filières des ferro-alliages et de la catalyse. Par contre, elle semble peu développée, à notre connaissance, dans la filière qui présente le plus d'enjeux, celle du molybdène métal.

La mise en place de circuits courts pour à la fois récupérer et valoriser d'abord les déchets neufs et ensuite les déchets de produits en fin de vie semble un axe à privilégier en concertation avec les professionnels de la filière.

5.3.3. La recherche pour le développement de produits alternatifs

La mise en place de travaux de recherche pour le développement de produits alternatifs moins consommateurs de molybdène devra être soutenue dans le cadre d'une politique industrielle maîtrisée.

Les orientations prises doivent reposer sur une analyse fine de la sous-filière. Les actions de recherche doivent concerner les domaines existants ou de nouveaux secteurs de développement (photovoltaïque, par exemple).

Il importe de noter que la France, mais aussi l'Europe, disposent dans l'aval des trois sous-filières présentées des avancées technologiques encore importantes, comparativement aux nouveaux pays en forte croissance. Le maintien de cette avance constitue un enjeu stratégique qui conditionne la pérennité de ces filières et la maîtrise de nouveaux développements. Le maintien de la recherche dans ces différents domaines est vital pour le maintien de notre compétitivité.

5.3.4. Le développement d'un réseau d'informations partagé par les entreprises

Le développement d'un réseau d'informations doit d'abord valider les informations accessibles qui devront être partagées par les acteurs. La chose devrait être facilitée par le fait qu'il n'existe pas de concurrence entre les différents acteurs français.

La forme que pourrait prendre cette veille économique mutualisée reste à définir.

5.3.5. L'intégration vers l'amont de la filière

Cette stratégie d'intégration vers l'amont a toujours été l'apanage des grands groupes industriels ou des États ayant une politique de développement industriel. C'est traditionnellement le cas d'États comme le Japon ou l'Allemagne voire, plus récemment, de la Corée du Sud qui a un ministère chargé de la sécurisation des approvisionnements. L'objectif affiché par ce pays est la pérennisation des filières nationales en maintenant leur compétitivité. Soulignons que pour la Corée, huit métaux sont considérés comme stratégiques : le bismuth, le cobalt, le germanium, l'indium, le manganèse, le molybdène, le niobium et le vanadium.

La Chine semble activement mettre en œuvre une stratégie comparable à travers le groupe Chinalco. La Chine pourrait avoir des stocks importants, un peu supérieurs à 20 % de la production mondiale (source : China Molybdenum), ce qui conférerait à la Chine un pouvoir accru d'interférer avec le fonctionnement des marchés.

La France dispose d'un opérateur industriel intégré dans l'amont des filières manganèse et nickel, le groupe Eramet. Ce groupe possédait jusqu'en 2002 la société

Sadaci implantée en Belgique. Cette société rachetée par le groupe chilien Molymet était spécialisée dans le grillage des concentrés de molybdénite et, comme nous l'avons exposé précédemment, fabriquait des produits intermédiaires : oxyde molybdique et ferro-molybdène.

Les conditions d'une intégration pertinente vers l'amont de la filière du molybdène métal méritent d'être posées. Le degré d'intégration ainsi que la façon de procéder restent à débattre. L'intégration vers l'amont de la filière autour d'un grand groupe minier français et ou européen, groupe qui n'existe pas à ce jour, et d'un instrument comparable au dispositif « joint Basic Exploration Scheme de la Japan Oil, Gas and Metals Corporation » devrait être étudiée par les autorités françaises ou européennes.

Bibliographie

- [1] **European Commission** (2010) - Critical raw materials for the EU - Commission Européenne, DG Entreprises (Bruxelles, Belgique) – Document téléchargeable ici : http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report_en.pdf
- [2] **Folk B.** (2005) - Molybdenum – Mining Journal
- [3] **USGS** (2010) – Mineral Commodity Summaries 2010 - United States Geological Survey - Reston., Virginia – USA – disponible en ligne : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2010/mcs2010.pdf>
- [4] **Roskill** (2009) - Molybdenum market outlook to 2014 – Tenth edition – Roskill (Londres, Royaume-Uni)
- [6] **Jébrack M. et Marcoux E.** (2008) - Géologie des ressources minérales. 667 p. Société de l'Industrie Minérale.
- [7] **Routhier P.** (1963) - Les gisements métallifères. Géologie et principes de recherches. Masson et Cie. 1282 p.
- [8] **RMD** - Raw Material Data - <http://www.rmg.se>
- [9] **Maratray F.** (2005) - Molybdène et alliages- Techniques de l'ingénieur (Paris, France).
- [10] **Christie T., Bradwaithe B.** (2009) - Mineral Commodity Report 9 — Molybdenum - Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd – (Lower Hutt, Nouvelle-Zélande) – Document téléchargeable ici : http://www.crownminerals.govt.nz/cms/pdf-library/minerals/minerals-overview-pdfs-1/report9_molybdenum.pdf
- [11] **Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier** (2010) - Connaissances de base de l'acier : classifications - service disponible uniquement en ligne : <http://www.otua.org/FABACIER/DefClassification/IntroClassification.html>
- [12] **Kelly T. D., Matos les G. R.** (2010) – Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States - U.S. Geological Survey - Data Series 140 - United States Geological Survey - Reston., Virginia – USA – disponible en ligne : <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/#data>
- [13] **World Steel Association** (2010) - World Steel in figures 2010 - World Steel Association (Bruxelles, Belgique) - disponible en ligne : <http://www.worldsteel.org/pictures/publicationfiles/WSIF2010.pdf>
- [14] **Polyak D. E.** (2010) - 2008 Mineral Yearbook – Molybdenum - United States Geological Survey - Reston., Virginia – USA – disponible en ligne :

<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/molybdenum/myb1-2008-molyb.pdf>

- [15] **Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles** (2009) - Le molybdène, métal discret mais dangereux – Disponible en ligne : [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/INRS-FR/\\$FILE/fset.html](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/INRS-FR/$FILE/fset.html)
- [16] **Savary B., Vincent R., Peltier A.** (2003) - Le molybdène, définition, prévention et réglementation - Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS, Paris, France) - Document téléchargeable ici : [http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_ts_pointsur_view/5D246D987D71ACAEC1256D500049D33A/\\$File/ed5020.pdf](http://www.inrs.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/inrs01_ts_pointsur_view/5D246D987D71ACAEC1256D500049D33A/$File/ed5020.pdf)
- [17] Brush Engineered Materials - Annual Report 2009.
- [19] **Department of Defense of the United States of America** (2010) - Operations under the Strategic and Critical Materials Stock Piling Act during the Period October 2008 through September 2009 – Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique – Disponible en ligne : <https://www.dnsc.dla.mil/Uploads/Materials/2009OpsReport.pdf>
- [20] **Comité Industriel ITER** (2010) - Fiche ATMOSTAT (membre du comité industriel ITER – Disponible en ligne : <https://mioga.minefi.gouv.fr/ITER/public/C2I/documents/fiches/atmostat.pdf>
- [21] **United States Geological Survey** - date de publication non spécifiée - Metal Prices in the United States through 1998 - United States Geological Survey - Reston., Virginia – USA – disponible en ligne : http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/metal_prices/
- [22] **Angerer G, Erdmann L., Marscheider-Weidemann F., Scharp M., Lüllmann A., Handke V., Marwede M.** (2009) - Rohstoffe für Zukunftstechnologien - Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage - Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (Germany)
- [23] **Kucha H.** (1990) - Geochemistry of the Kupferschiefer, Poland. *Geologische Rundschau* 79/2 pp 387-399 Stuttgart 1990.
- [24] **Coveney Jr, R.M.** (2003) - Re Os dating of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Lower Cambrian black shales of South China and its geological significance- a discussion. *Economic geology* 98, 661-662.
- [25] **Zeng Mingguo** (1998) - Geological Feature of the Huangjiawan Ni-Mo Deposit in Zunyi of Guizhou and its Prospect for Development – Guizhou geology, 1998-04 - Institute of Geology, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development (Guiyang, Guizhou 550004, Chine).

- [26] **Shao-Yong Jiang, Jing-Hong Yang, Hong-Fei Ling, Yong-Quan Chen, Hong-Zhen Feng, Kui-Dong Zhao, Pei Ni.** (2007) - Extreme enrichment of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au in lower Cambrian black shales of south China: an Os isotope and PGE geochemical investigation. Dans : *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 254 (2007) p. 217-228.
- [27] **Olivier Zajec, Mathieu Anquez** (2010) - Stratégies de sécurisation des approvisionnements en matériaux critiques. Audit de perception industrielle : Béryllium, Molybdène, Rhénium, Sélénium, Tellure - 2010. p. 95.



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

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