



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



MINISTÈRE DU REDRESSEMENT
PRODUCTIF



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE LA DÉFENSE



Enjeux économiques des métaux stratégiques pour les filières automobile et aéronautique

Analyses prospectives par métal

Date de parution : mars 2013

Couverture : Hélène Alias-Denis, Brigitte Baroin
Édition : Nicole Merle-Lamoot, Gilles Pannetier

Enjeux économiques des métaux stratégiques pour les filières automobile et aéronautique

Analyses prospectives par métal



Le pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (Pipame) a pour objectif d'apporter, en coordonnant l'action des départements ministériels, un éclairage de l'évolution des principaux acteurs et secteurs économiques en mutation, en s'attachant à faire ressortir les menaces et les opportunités pour les entreprises, l'emploi et les territoires.

Des changements majeurs, issus de la mondialisation de l'économie et des préoccupations montantes comme celles liées au développement durable, déterminent pour le long terme la compétitivité et l'emploi, et affectent en profondeur le comportement des entreprises. Face à ces changements, dont certains sont porteurs d'inflexions fortes ou de ruptures, il est nécessaire de renforcer les capacités de veille et d'anticipation des différents acteurs de ces changements : l'État, notamment au niveau interministériel, les acteurs socio-économiques et le tissu d'entreprises, notamment les PME. Dans ce contexte, le Pipame favorise les convergences entre les éléments microéconomiques et les modalités d'action de l'État. C'est exactement là que se situe en premier l'action du Pipame : offrir des diagnostics, des outils d'animation et de création de valeur aux acteurs économiques, grandes entreprises et réseaux de PME/PMI, avec pour objectif principal le développement d'emplois à haute valeur ajoutée sur le territoire national.

Le secrétariat général du Pipame est assuré par la sous-direction de la Prospective, des Études économiques et de l'Évaluation (P3E) de la direction générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services (DGCIS).

Les départements ministériels participant au Pipame sont :

- le ministère du Redressement productif/Direction générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services ;
- le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie ;
- le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt ;
- le ministère de la Défense/Direction générale de l'Armement/Délégation aux Affaires stratégiques ;
- le ministère du Travail, de l'Emploi, de la Formation professionnelle et du Dialogue social/Délégation générale à l'Emploi et à la Formation professionnelle ;
- le ministère des Affaires sociales et de la Santé/Direction générale de la Santé ;
- le ministère de la Culture et de la Communication/Département des Études, de la Prospective et des Statistiques ;
- le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche ;
- la délégation interministérielle à l'Aménagement du Territoire et à l'Attractivité régionale (DATAR), rattachée au Premier ministre ;
- le centre d'Analyse stratégique (CAS), rattaché au Premier ministre.

Avertissement

La méthodologie utilisée dans cette étude ainsi que les résultats obtenus sont de la seule responsabilité du prestataire ayant réalisé cette étude (Sofred Consultants) et n'engagent ni le Pipame, ni le ministère du Redressement productif, ni le ministère de la Défense qui ont commandé cette étude. Les parties intéressées sont invitées, le cas échéant, à faire part de leurs commentaires à la Direction générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services (DGCIS), à Direction générale de l'Armement (DGA) et à la Délégation aux Affaires stratégiques (DAS).

Membres du comité de pilotage restreint

Noël Le Scouarnec	DGCIS, bureau de la Prospective et de l'Évaluation économiques
Ange Mucchielli	DGCIS, bureau de la Prospective et de l'Évaluation économiques
Christian Calzada	DGCIS, bureau des Diagnostics économiques sectoriels
Nolwenn Cezilly	DGCIS, bureau des Matériaux du Futur et nouveaux Procédés
Marc Rohfritsch	DGCIS, bureau des Matériaux du Futur et nouveaux Procédés
Jean-Christophe Maho	Ministère de la Défense, Direction générale de l'Armement
Éric Lafontaine	Ministère de la Défense, Direction générale de l'Armement
Yveline Clain	Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature - Bureau des ressources minérales
Rémi Galin	Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, Direction générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature - Bureau des ressources minérales

et un représentant de la Délégation aux Affaires stratégiques, Ministère de la Défense

Membres du comité de pilotage élargi

Le comité de pilotage élargi est composé des membres du comité de pilotage restreint susmentionnés et des représentants des organisations ou fédérations professionnelles suivantes :

- CCFA : Comité des Constructeurs Français d'Automobiles
- FEDEM : Fédération des Minerais, Minéraux industriels et Métaux non ferreux
- FEDEREC : Fédération des Entreprises du Recyclage
- FIEV : Fédération des Industries des Équipements pour Véhicules
- FIM : Fédération des Industries Mécaniques
- GIFAS : Groupements des Industries Françaises Aéronautiques et Spatiales

La conduite des entretiens et la rédaction du présent rapport ont été réalisées par le cabinet de conseil :

SOFRED CONSULTANTS
114, avenue Charles de Gaulle
92200 Neuilly-sur-Seine Cedex
Tél. : 01 79 62 02 00
Fax : 01 79 62 02 10
www.sofred.fr

Représenté par :

Laurent Bastian, manager de mission

Martin Fougerolle, consultant

Jean Martinon, consultant

L'objectif des analyses prospectives de l'étude est d'élaborer des scénarios d'évolution à 10 ans de la situation du marché pour chacun des métaux identifiés et sélectionnés au cours de la mission, afin de déterminer si des risques élevés de pénurie ou d'augmentations importantes de prix existent dans la chaîne de production.

Les métaux retenus sont :

- Pour la filière automobile :
 - o Néodyme
 - o Dysprosium
 - o Platine
 - o Palladium
 - o Lithium (application batteries)

- Pour la filière aéronautique :
 - o Chrome métal (application superalliages)
 - o Molybdène
 - o Niobium
 - o Vanadium
 - o Lithium (application alliages aluminium-lithium)

Méthodologie :

Pour chacun des métaux retenus, dans la mesure où c'est pertinent, l'analyse prospective comporte les étapes suivantes :

- Scénarios d'évolution sur 10 ans de la demande globale ;
- Scénarios d'évolution sur 10 ans de l'offre globale ;
- Scénarios de la balance offre-demande globale ;
- Analyse de ces scénarios, hypothèses sur le jeu des acteurs ;
- Premières préconisations relatives au métal considéré.

Pour chaque étude, avant d'aborder la prospective à proprement parler, il est nécessaire d'étudier la situation du marché : chaîne de production, demande, offre, ressources, évolutions prévisibles, recyclage, etc.

Le plan des études sera donc organisé de la façon suivante, sachant que des particularités propres à chaque métal peuvent amener à s'en écarter un peu :

Résumé

1. Demande : produits et utilisations
 - 1.1. Produits intermédiaires
 - 1.2. Utilisations finales
 - 1.3. Données sur l'utilisation dans la (les) filière(s) considérée (s)
2. Offre mondiale
 - 2.1. Production primaire
 - 2.2. Répartition géographique de la production
 - 2.3. Trois principaux producteurs
 - 2.4. Recyclage
 - 2.5. Substitution
 - 2.6. Prix
3. Contraintes sur l'offre et projets de développement
 - 3.1. Réserves et ressources mondiales, répartition
 - 3.2. Projets d'extension de producteurs existants
 - 3.3. Nouveaux projets
4. Analyse de quelques facteurs de criticité
 - 4.1. Rareté relative des ressources minières
 - 4.2. Concentration dans la chaîne de production
 - 4.3. Importance pour la (les) filière(s) considérée(s)
5. Scénarios prospectifs à 10 ans
 - 5.1. Scénario(s) d'évolution de la demande
 - 5.2. Scénario(s) d'évolution de l'offre
 - 5.3. Évolution du bilan offre-demande
 - 5.4. Autres considérations
 - 5.5. Analyse des scénarios et jeu des acteurs
 - 5.6. Pistes pour anticiper les risques de pénurie / tension sur les prix

Bibliographie

Annexes

-0-0-0-0-0-0-

Quelques remarques préliminaires s'appliquant à ces études sont nécessaires :

Les études par métal visent à fournir des éléments de réponse dans le cadre des objectifs de cette phase 3 ; elles ne sont donc pas exhaustives et ne doivent pas être utilisées hors de ce contexte.

Les métaux considérés ne font en général pas l'objet d'un marché organisé et très structuré ; les statistiques sont souvent incertaines, et les chiffres obtenus peuvent différer sensiblement selon les sources. Les prix ne font pas toujours l'objet d'une cotation officielle (à l'exception notable de métaux comme le platine), les données disponibles sont la plupart du temps relatives à des achats « spot » et les prix de contrats négociés entre acteurs du marché restent confidentiels.

Les scénarios proposés ne sont pas des prévisions, encore moins des prédictions : ils sont destinés à décrire des types de situations qui pourraient se présenter et les conséquences en résultant. Lorsque des informations plus précises ne sont pas disponibles, les scénarios relatifs à la demande sont exprimés en tendance ; des fluctuations ne peuvent que se produire autour de ces tendances. Le court terme ne peut être représenté par de tels scénarios.

Des abréviations sont utilisés, dont nous rappelons les principales :

t = tonne ; 1 t = 1 000 kg

kt = kilotonne ; 1 kt = 1 000 t

Mt = mégatonne ; 1 Mt = 1 000 000 t

TR = Terres rares

RSA = République sud-africaine

USA = États-Unis d'Amérique

\$ = dollar US (US\$) sauf indication contraire

Les métaux peuvent être désignés par leur symbole chimique, par exemple V pour vanadium, Nb pour niobium, etc.

-0-0-0-0-0-0-

Sommaire

NÉODYME (Nd) et DYSPROSIUM (Dy)	15
PLATINE (Pt).....	55
PALLADIUM (Pd).....	83
LITHIUM (Li).....	105
CHROME MÉTAL (Cr)	147
MOLYBDÈNE (Mo)	167
NIOBIUM (Nb) et ferroniobium	193
VANADIUM (V).....	225
TABLE DES FIGURES	247

NÉODYME (Nd) et DYSPROSIUM (Dy)

17 Août 2012

Avertissement : la présente note est rédigée dans le cadre d'une étude précise, elle ne prétend donc en aucun cas à l'exhaustivité.

Résumé :

Le **néodyme** est une terre rare légère, dont la consommation actuelle se situe entre 21 et 25 000 t par an ; il est principalement utilisé dans les aimants permanents à hautes performances néodyme-fer-bore, utilisés dans toutes sortes de moteurs, alternateurs, capteurs, en particulier dans les véhicules automobiles, les éoliennes, les équipements informatiques (disques durs, lecteurs de DVD, CD, ...), les téléphones mobiles et baladeurs, ...

Lorsque les conditions d'utilisation amènent l'aimant néodyme-fer-bore (NdFeB) à dépasser une température de 80°C, le matériau doit être dopé au **dysprosium**. Le dysprosium est une terre rare lourde dont la consommation actuelle se situe aux environs de 1 400 t/an.

Comme pour toutes les terres rares, la Chine est le producteur principal de ces deux métaux et sa position de quasi-monopole, jointe à sa volonté d'utiliser ses ressources naturelles pour développer sa propre industrie, a conduit à des restrictions d'exportation mettant les utilisateurs non chinois sous pression.

La croissance de la demande en aimants NdFeB devrait être vigoureuse, tirée en particulier par la croissance de la construction automobile et au sein de celle-ci par le développement des véhicules hybrides et électriques, les ventes de deux-roues électriques en Asie, la croissance de l'installation d'éoliennes et hydroliennes, le développement des biens de consommation à contenu technologique (ordinateurs, téléphones mobiles, lecteurs de DVD, etc.).

En réaction aux risques d'approvisionnement en terres rares, de nombreux projets miniers ont été lancés, stimulés par le niveau atteint par les prix de ces métaux. La répartition des terres rares dans les gisements est généralement en faveur des terres rares légères, et les projets qui devraient démarrer hors de Chine dans les quatre années à venir devraient soulager la pression sur le néodyme, mais sans fournir un supplément significatif de dysprosium. Pour ce dernier métal la probabilité d'un déficit jusqu'en 2016 est forte.

Au-delà de cinq ans, les incertitudes sur la consommation d'aimants sont importantes, en particulier sur le rythme de pénétration des véhicules hybrides et électriques et le taux de croissance des installations d'éoliennes ; de plus, face aux risques de pénurie de dysprosium, des recherches et développements sont en cours pour trouver des solutions réduisant le besoin en dysprosium, soit en évitant les élévations de température lors de l'utilisation, soit en utilisant des technologies sans aimant permanent.

Dans le cas d'un développement soutenu des véhicules à traction électrique et des éoliennes, en l'absence de rupture technologique, l'offre de dysprosium pourrait être insuffisante sur l'ensemble de la période de 10 ans considérée. Par contre l'offre globale de néodyme devrait être capable de répondre à la demande.

Il convient donc d'encourager les recherches et développements sur les solutions technologiques consommant moins de dysprosium.

Le recyclage des aimants NdFeB, bien que difficile techniquement, doit également être développé, mais il ne pourra dans le meilleur des cas représenter qu'un appoint intéressant mais mineur de dysprosium, en raison du taux de croissance de la demande et de la durée de vie des plus gros équipements contenant des aimants.

Devant les risques de pénurie, les acteurs français et européens devraient s'assurer que chez eux ou dans la chaîne de leurs fournisseurs existent des contrats d'approvisionnement solides couvrant leurs besoins futurs en néodyme et dysprosium, ainsi que des stocks de produits sensibles incorporant du dysprosium suffisants pour passer les périodes d'approvisionnement difficiles.

De nombreux projets d'ouverture de mines de terres rares lourdes hors de Chine sont encore en phase de recherche de financement. Des opportunités existent donc pour bâtir par exemple des partenariats associant mineur de terres rares lourdes, spécialiste de la séparation des terres rares comme Rhodia, et fabricant d'aimants, dans le but de sécuriser les approvisionnements en dysprosium (et éventuellement en autres terres rares).

On désigne par « **terres rares** » 17 métaux qui sont les 15 lanthanides : Lanthane, Cérium, Praséodyme, Néodyme, Prométhium, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium, Lutécium, auxquels on ajoute l'Yttrium et le Scandium car leurs propriétés physiques et chimiques sont voisines. On distingue habituellement deux sous-groupes :

- au début de la série des lanthanides, les **terres rares légères** ou cériques : lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, prométhium¹, samarium, europium, gadolinium²,
- et les **terres rares lourdes** ou yttriques : terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, lutécium, auxquelles on adjoint le plus souvent l'yttrium et le scandium.

Les deux terres rares qui nous intéressent plus particulièrement sont : une terre rare légère, le **néodyme**, et une terre rare lourde, le **dysprosium**. Ce sont deux composants essentiels des aimants permanents à haute performance du type néodyme-fer-bore.

¹ Le prométhium n'ayant pas d'isotope stable, on ne le trouve qu'à l'état de traces dans la nature.

² On distingue parfois au sein des terres rares légères une catégorie de terres rares intermédiaires : samarium, europium, gadolinium. Par ailleurs, l'euporium et le gadolinium sont parfois classés comme des TR lourdes.

1- Demande : produits et utilisations

1.1 Procédés de production et produits intermédiaires

On connaît plus de 200 minéraux contenant des terres rares (TR). Dans tout minéral contenant des terres rares, la plupart d'entre elles, sinon toutes, sont présentes à des teneurs variées, mais il y a souvent une tendance plutôt vers les terres rares lourdes ou plutôt vers les terres rares légères. La séparation intervient à l'aval de l'exploitation minière.

Les principaux minerais exploités sont :

- Pour les terres rares légères :
 - la monazite, minéral phosphaté (orthophosphate de terres rares et de thorium), qui est le minéral à terres rares le plus abondant ; les concentrés de monazite contiennent 55 à 60 % d'oxydes de terres rares, 3 à 10 % de thorium, ce qui pose un problème de radioactivité, un peu d'yttrium et d'uranium ; le problème du thorium a conduit à l'arrêt de la plupart des exploitations de monazite ;
 - la bastnaésite (fluorocarbonate), qui contient beaucoup moins de thorium ;
 - les argiles à terres rares (sans radioactivité associée), minerais ioniques du sud de la Chine ;
 - la loparite (niobiotitanate) exploitée en Russie.
- Pour les terres rares lourdes :
 - le xénotime (orthophosphate) ;
 - les argiles à terres rares qui sont la principale source de terres rares lourdes en Chine.

La figure 1 donne la proportion des différentes terres rares dans deux types de minerais chinois.

Figure 1 : Composition des deux principaux minerais chinois de terres rares (source : [1])

Composition des deux principaux minerais mondiaux de terres rares				
Terre rare	Catégorie	Oxyde	Bastnaesite de Bayan Obo (Chine)	Argile d'adsorption ionique de Longnan (Chine)
Lanthane	Légère	La ₂ O ₃	23	1.8
Cérium	Légère	CeO ₂	50	0.4
Praséodyme	Légère	Pr ₆ O ₁₁	6.2	0.7
Néodyme	Légère	Nd ₂ O ₃	18.5	3.0
Prométhium	Radioactif - courte durée de vie	Pm ₂ O ₃		
Samarium	Légère	Sm ₂ O ₃	0.8	2.8
Europium	Légère	Eu ₂ O ₃	0.2	0.1
Gadolinium	Lourde	Gd ₂ O ₃	0.7	6.9
Terbium	Lourde	Tb ₄ O ₇	0.1	1.3
Dysprosium	Lourde	Dy ₂ O ₃	0.1	6.7
Holmium	Lourde	Ho ₂ O ₃	Traces	1.6
Erbium	Lourde	Er ₂ O ₃	Traces	4.9
Thulium	Lourde	Tm ₂ O ₃	Traces	0.7
Ytterbium	Lourde	Yb ₂ O ₃	Traces	2.5
Lutécium	Lourde	Lu ₂ O ₃	Traces	0.4
Scandium	Lourde	Sc ₂ O ₃		
Yttrium	Lourde	Y ₂ O ₃	Traces	65.0

Dans cet exemple, les principales terres rares de la bastnaésite sont des terres rares légères : le cérium (50 %), le lanthane (23 %), le néodyme (18,5 %) et le praséodyme (6,2 %). Dans l'argile de Longnan, ce sont les terres rares lourdes qui dominent : yttrium (65 %), gadolinium (6,9 %), dysprosium (6,7 %), mais des terres rares légères sont présentes dans des proportions supérieures à 1 % (néodyme : 3 %).

Les terres rares peuvent aussi être associées à du niobium : c'est le cas par exemple du gisement de Bayan Obo [2], du gisement de niobium de CBMM au Brésil (les terres rares ne sont pas exploitées pour l'instant), du projet d'Eramet à Mabounié (Gabon).

La première étape industrielle après l'extraction du minerai est la concentration pour éliminer les minéraux ne contenant pas de terres rares ; les procédés diffèrent selon le gisement. Trois exemples [1] :

- Pour les minerais à bastnaésite de Mongolie Intérieure, sous-produits de la production de fer, après broyage la concentration se fait par flottation et gravimétrie et conduit à deux types de concentrés : riche en terres rares (68 % d'oxydes de TR) et pauvre en terres rares (36 %). Un lessivage à l'acide chlorhydrique et une calcination permettent d'augmenter la concentration en terres rares pour obtenir le concentré à 70-75 % d'oxydes vendable aux unités de séparation des terres rares.

- Pour les argiles, la technique d'extraction est une lixiviation in situ par du sulfate d'ammonium injecté dans le gisement ; une première précipitation au carbonate d'ammonium laisse les terres rares en solution, et elles sont ensuite précipitées à l'acide oxalique ; les oxalates obtenus sont calcinés pour donner des oxydes, et le concentré final contient jusqu'à 90 % d'oxydes de terres rares.
- Pour la monazite issue des sables de plage, on utilise des procédés gravitaires, électrostatiques et magnétiques destinés à la séparer du zircon, du quartz, de la magnétite, etc. présents dans le sable.

Les terres rares peuvent être utilisées sans séparation préalable ; c'est le cas d'applications utilisant les propriétés chimiques des terres rares, du fait qu'elles ont des propriétés chimiques voisines. Différents sels sont obtenus par attaque à l'acide ou à la soude du concentré marchand ; l'oxyde est produit par calcination de sels ; le mélange de métaux (mischmétal) est obtenu par électrolyse de chlorures en bain de sels fondus. Les compositions de ces produits dépendent de celle du concentré. Les applications sont la catalyse (craquage des produits pétroliers), la métallurgie de la fonte et des aciers : désoxydation, désulfuration, sphéroïdisation des graphites ; les pierres à briquet (alliage de mischmétal avec 25-30 % de fer). 75 à 80 % du tonnage de terres rares seraient utilisés sous une forme non séparée [7].

Les applications des terres rares séparées font le plus souvent appel à leurs propriétés physiques (optiques, magnétiques, etc.). Pour réaliser cette séparation, le concentré est traité soit par les sociétés minières si elles ont leur propre usine, soit par des sociétés spécialisées dans la séparation (Rhodia par exemple) ; compte tenu des propriétés chimiques et physiques voisines de ces métaux, la séparation est difficile.

La méthode de séparation la plus couramment utilisée est l'extraction liquide-liquide, à l'aide de solvants ; d'autres méthodes sont également utilisées, telles que l'échange d'ions (sur résines), les séparations liquide-solide, les techniques de cristallisation et précipitation fractionnée. L'échange d'ions produit des terres rares d'une grande pureté mais sa productivité est faible. La séparation des terres rares légères par extraction liquide-liquide est plus aisée que celle des terres lourdes. Les produits de la séparation sont des oxydes ou des sels de terres rares individuelles.

Ces procédés industriels peuvent poser des problèmes environnementaux :

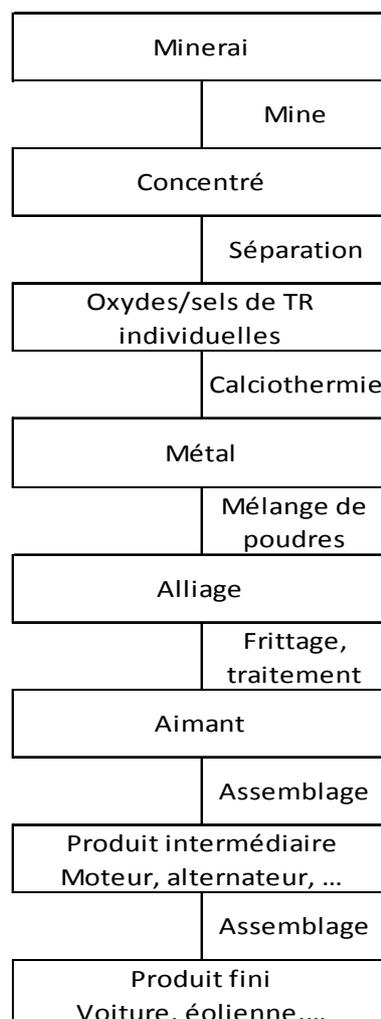
- Gestion des stériles radioactifs : c'est l'origine des difficultés que connaît actuellement Lynas pour le démarrage de son usine de séparation en Malaisie, qui se heurte à une forte opposition ;
- Injection de réactifs dans les gisements et effets à long terme ;
- Utilisation de divers produits chimiques dans les procédés de concentration et de séparation, qui nécessitent une gestion rigoureuse ;
- Utilisation de grandes quantités d'énergie.

Un certain nombre de sociétés chinoises ont eu des pratiques dommageables pour l'environnement ; le gouvernement chinois réagit, ferme des sites, et c'est un argument pour limiter les exportations.

Pour produire des aimants, il faut réduire l'oxyde ou le sel de terre rare en métal. Molycorp Metals and Alloys par exemple opère par calciothermie : réduction par le calcium de fluorures de terres rares dans un four à induction sous vide, dans des creusets en tantale ; certaines terres rares peuvent être contaminées par le tantale et une distillation ou une sublimation est nécessaire pour l'éliminer.

Les aimants sont ensuite obtenus par frittage des poudres métalliques. Ils sont recouverts d'un revêtement protecteur (zinc ou nickel) pour les protéger de la corrosion.

Figure 2 : Résumé de la chaîne de valeur simplifiée de la production d'aimants frittés Néodyme-Fer-Bore (NdFeB)



Un autre procédé de fabrication d'aimants (utilisé par exemple par Magnequench) part des poudres d'alliage, qui sont ensuite liées par un polymère (« bonded magnets »).

1.2 Utilisations finales

Les applications des terres rares sont extrêmement variées, car leurs propriétés exceptionnelles ont conduit à leur développement rapide au cours des dernières années, en particulier dans les TIC, les énergies nouvelles (éoliennes), les automobiles.

Voici quelques exemples d'applications :

Dans l'industrie du verre et des céramiques :

- Polissage des verres optiques et des écrans par de l'oxyde de cérium ; consommation 2010 : 23 500 t [8] ;
- Décoloration du verre par oxydation de l'oxyde de fer : oxyde de cérium, puis ajout d'oxyde de néodyme ou d'erbium pour supprimer la teinte jaune résultant du premier traitement ;
- Agent antibrunissement du verre : oxyde de cérium ;
- Absorption des UV pour les verres de lunette : oxyde de cérium ;
- Coloration des verres : en violet avec de l'oxyde de néodyme (2 à 6 %), en vert clair avec de l'oxyde de praséodyme (2 à 6 %), en rose pâle avec l'oxyde d'erbium (2 à 5 %) ; en jaune clair à orange avec de l'oxyde de cérium (1 à 3 %) associé à l'oxyde de titane (2 à 6 %) ;
- Amélioration des performances des verres pour optiques de précision (objectifs photographiques, lentilles de microscopes ou télescopes) : l'oxyde de lanthane (5 à 40 %) accroît l'indice de réfraction et diminue la dispersion de la lumière ;
- Émaux et céramiques : opacifiant des émaux : oxyde de cérium (en concurrence avec TiO_2) ; pigment rose : l'oxyde d'erbium.

Dans l'industrie des plastiques, peintures, encres :

- Pigment rouge pour plastiques à base de sulfure de cérium, remplaçant les colorants au sulfure de cadmium ;
- Photostockage : l'euprium est utilisé dans des encres, des peintures, des plastiques, pour émettre de la lumière pendant plusieurs heures après une illumination.

Dans l'échappement automobile :

- Dans les pots catalytiques l'oxyde de cérium, grâce à ses deux états d'oxydation, joue le rôle de régulateur de la teneur en oxygène ; consommation 2010 : 5 960 t [7] ;
- L'ajout au carburant diesel d'un additif contenant 6 % de cérium permet de réduire les fumées noires en facilitant la combustion des particules fines ;
- Dopage de la zircone à l'oxyde d'yttrium pour les sondes à oxygène.

Luminophores (le terme anglais est « phosphors ») pour la fabrication des écrans de télévision ou d'ordinateurs, qu'ils soient cathodiques, LCD ou plasma : la couleur rouge est obtenue par une composition contenant de l'euporium et de l'yttrium, ainsi qu'éventuellement du gadolinium. Dans les écrans LCD et plasma, le bleu utilise de l'euporium et le vert du terbium. Consommation 2010 : 7 512 t [8].

Dans le domaine de l'équipement médical (radiographie) : les terres rares terbium et thulium, dans des matrices incorporant du gadolinium ou de l'yttrium, sont utilisées pour renforcer l'effet du rayonnement X.

Éclairage :

- Lampes fluo-compactes : le revêtement luminophore contient des oxydes d'yttrium, de cérium, de lanthane, d'euporium et de terbium. Consommation 2010 : 3 779 t [7] ;
- Lampes fluorescentes à vapeur de mercure basse pression : euporium, cérium, terbium, yttrium ;
- Laser : néodyme et yttrium ;
- Manchons incandescents pour lampes de camping au gaz : nitrates de thorium (99 %) et de cérium (1%) ; historiquement, l'éclairage au gaz est la première application industrielle de la monazite.

Aimants permanents : Il existe 4 types principaux d'aimants permanents : ferrite ou céramique ; aluminium-nickel-cobalt ; samarium-cobalt ; néodyme-fer-bore. Les terres rares permettent de réaliser des aimants puissants et conservant leurs propriétés à des températures élevées, permettant la miniaturisation des moteurs électriques :

- Aimants samarium-cobalt (SmCo_5 ou $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$), dont le point de Curie³ est supérieur à 700 °C (production mondiale d'aimants : environ 300 t/an) ;
- Aimants néodyme-fer-bore ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), les plus puissants, utilisés à température plus basse (point de Curie à 310 °C) que les aimants Sm-Co ; ils sont classés selon la température maximale d'utilisation : 80 °C pour la classe N, 100 °C pour la classe M, etc. jusqu'à 200 °C pour la classe EH. Pour des fonctionnements au-delà de 80 °C, ils sont dopés au dysprosium afin de réduire la dégradation de leur performance lorsque la température augmente.

Les aimants permanents NdFeB sont les plus importants en termes de chiffre d'affaires, devant les ferrites qui représentent le tonnage le plus important mais dont le prix est inférieur, et leur croissance est très rapide.

Métallurgie : amélioration de la tenue aux chocs thermiques des aciers pour pipelines par l'yttrium.

³ Le point de Curie est la température à laquelle le matériau perd son aimantation

Batteries rechargeables nickel-hydrure de métal (NiMH) : l'électrode négative est un alliage de lanthane et de nickel $LaNi_5$, le nickel pouvant être substitué partiellement par d'autres métaux (Mn, Al, Co) et le lanthane par d'autres terres rares. La teneur en terres rares (La, Ce, Nd, Pr) est de l'ordre de 7 % de la masse de la batterie. Dans un véhicule hybride, le poids de TR dans la batterie est de l'ordre de 12 à 15 kg ; on en trouve aussi dans les aimants permanents des moteurs électriques, alternateurs, systèmes de récupération de l'énergie de freinage. Consommation 2010 d'oxydes de terres rares pour ce type de batteries : 27 300 t [7].

Chimie : Catalyse du craquage des produits pétroliers : lanthane et cérium (voir aussi ci-dessus : utilisation des terres rares non séparées).

La référence [7] donne un tableau des pourcentages d'utilisation des différentes terres rares dans chaque application.

Figure 3 : Terres rares utilisées pour chaque domaine d'application, en pourcentage [7]

Application	Lanthane	Cérium	Praséodyme	Néodyme	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Yttrium	Autres	Total
Aimants		23,4	69,4				2,0	0,2	5,0			100
Alliage pour batterie	50,0	33,4	3,3	10,0	3,3							100
Autres alliages	26,0	52,0	5,5	16,5								100
Catalyseur automobile	5,0	90,0	2,0	3,0								100
Catalyseur raffinage pétrolier	90,0	10,0										100
Polissage du verre	31,5	65,0	3,5									100
Additif du verre	24,0	66,0	1,0	3,0						2,0	4,0	100
Luminophores	8,5	11,0				4,9	1,8	4,6		69,2		100
Céramiques	17,0	12,0	6,0	12,0						53,0		100
Autres	19,0	39,0	4,0	15,0	2,0		1,0			19,0		99

La société IMCOA [9] estime la demande 2010 à environ 125 000 t, avec la décomposition suivante par application et par zone géographique :

Figure 4 : Décomposition de la consommation mondiale de terres rares 2010 [9]

Consommation 2010 (t d'oxydes)	Chine	Japon et Asie du NE	USA	Autres	Total	% demande totale
Catalyseurs	9 000	3 000	9 000	3 500	24 500	19,6%
Verre	7 000	1 500	1 000	1 500	11 000	8,8%
Polissage	9 500	7 000	1 000	1 500	19 000	15,2%
Alliages métalliques	14 500	5 500	1 000	1 000	22 000	17,6%
Aimants	20 500	4 000	500	1 000	26 000	20,8%
Luminophores	5 500	2 000	500	500	8 500	6,8%
Céramiques	2 500	2 500	1 500	500	7 000	5,6%
Autres	4 000	2 000	500	500	7 000	5,6%
TOTAL	72 500	27 500	15 000	10 000	125 000	100,0%
% demande totale	58,0%	22,0%	12,0%	8,0%	100,0%	-

Les aimants permanents étaient le premier poste, devant les catalyseurs et les alliages métalliques (essentiellement pour batteries NiMH). L'industrie chinoise était le

principal utilisateur de terres rares, avec 72 500 t d'oxydes consommées, le reste du monde ayant consommé 52 500 t.

Il est important de noter que, pour toute la partie amont de la chaîne de valeur, **les tonnages sont traditionnellement exprimés en tonnes d'oxydes de terres rares** (Rare Earth Oxides = REO en anglais). Pour passer aux tonnes de métal, il faut appliquer un taux de conversion : par exemple pour le dysprosium le métal représente 87,1 % de l'oxyde Dy₂O₃ et pour le néodyme 85,7 %.

Selon la même société, la demande 2011 aurait été en retrait à 105 000 t, et 2012 serait attendu au niveau de 2010.

Figure 5 : Demande 2011 par secteur (source : [18])

Consommation 2011 (t d'oxydes)	Chine	Japon et Asie du NE	USA	Autres	Total	% demande totale
Catalyseurs	11 000	2 000	5 000	2 000	20 000	19,0%
Verre	5 500	1 000	750	750	8 000	7,6%
Polissage	10 500	2 000	750	750	14 000	13,3%
Alliages métalliques	15 000	4 000	1 000	1 000	21 000	20,0%
Aimants	16 500	3 500	500	500	21 000	20,0%
Luminophores	5 000	2 000	500	500	8 000	7,6%
Céramiques	3 000	2 000	1 500	500	7 000	6,7%
Autres	3 500	1 500	500	500	6 000	5,7%
TOTAL	70 000	18 000	10 500	6 500	105 000	100,0%
% demande totale	66,7%	17,1%	10,0%	6,2%	100,0%	-

En 2011, la consommation a reculé dans toutes les zones géographiques ; la consommation hors Chine a représenté 35 000 t, soit une diminution de 33 % ; la consommation chinoise n'a reculé que de 3,4 %, et la part de marché de la Chine a augmenté. Les aimants sont restés le premier poste, à égalité avec les alliages métalliques, et l'on peut noter que 79 % des aimants ont été produits en Chine.

Roskill [22] estime la demande 2012 en oxydes de TR pour les aimants permanents à environ 25 500 t, dont 98 % pour les aimants NdFeB.

Arnold Magnetic Technologies [17] indique la répartition de l'utilisation des aimants NdFeB par secteur d'application, ainsi que la teneur moyenne en dysprosium. Leur estimation de la consommation d'aimants NdFeB en 2010 est de 56 640 t avec une teneur moyenne en dysprosium (métal) de 1,75 %.

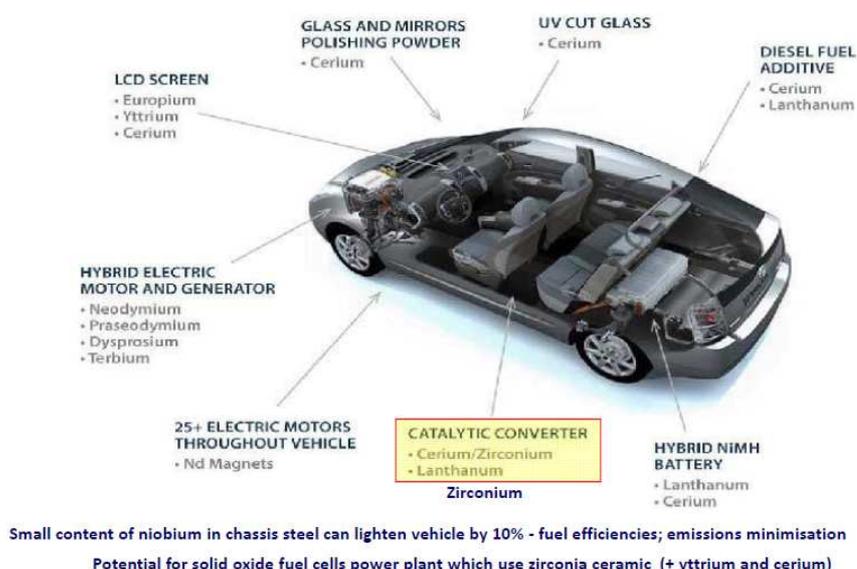
Figure 6 : Parts des différents secteurs d'application des aimants NdFeB et teneur en dysprosium [17]

Applications	Typical Dy%	yr 2008 % of mix	yr 2014 % of mix
Motors, industrial, general auto, etc	4.1	26.0%	23.0%
HDD, CD, DVD	0.0	14.8%	18.0%
Electric Bicycles	4.1	9.2%	11.4%
Transducers, Loudspeakers	0.0	9.0%	6.0%
Unidentified and All Other	1.4	7.2%	6.0%
Magnetic Separation	2.8	5.0%	3.5%
MRI	1.4	4.0%	1.5%
Torque-coupled drives	4.1	3.0%	2.5%
Sensors	1.4	3.0%	1.5%
Hybrid & Electric Traction Drive	8.7	3.0%	6.1%
Hysteresis Clutch	2.8	2.5%	1.5%
Generators	6.4	2.5%	1.0%
Energy Storage Systems	4.1	2.0%	2.5%
Gauges	2.8	1.5%	0.8%
Magnetic Braking	4.1	1.5%	0.8%
Relays and Switches	4.1	1.2%	0.2%
Pipe Inspection Systems	4.1	1.0%	1.0%
Wave Guides: TWT, Undulators, Wigglers	6.4	1.0%	1.0%
Magnetically Levitated transportation	4.1	1.0%	1.0%
Reprographics	4.1	0.7%	0.5%
Wind Power Generators	4.1	0.5%	9.6%
Magnetic Refrigeration	1.4	0.3%	0.5%
Advertising	0.0	0.1%	0.0%

1.3 Utilisation du néodyme et du dysprosium dans la filière automobile

Alkane Resources [13] présente un schéma de l'utilisation des terres rares (ainsi que du niobium et du zirconium) dans un véhicule automobile.

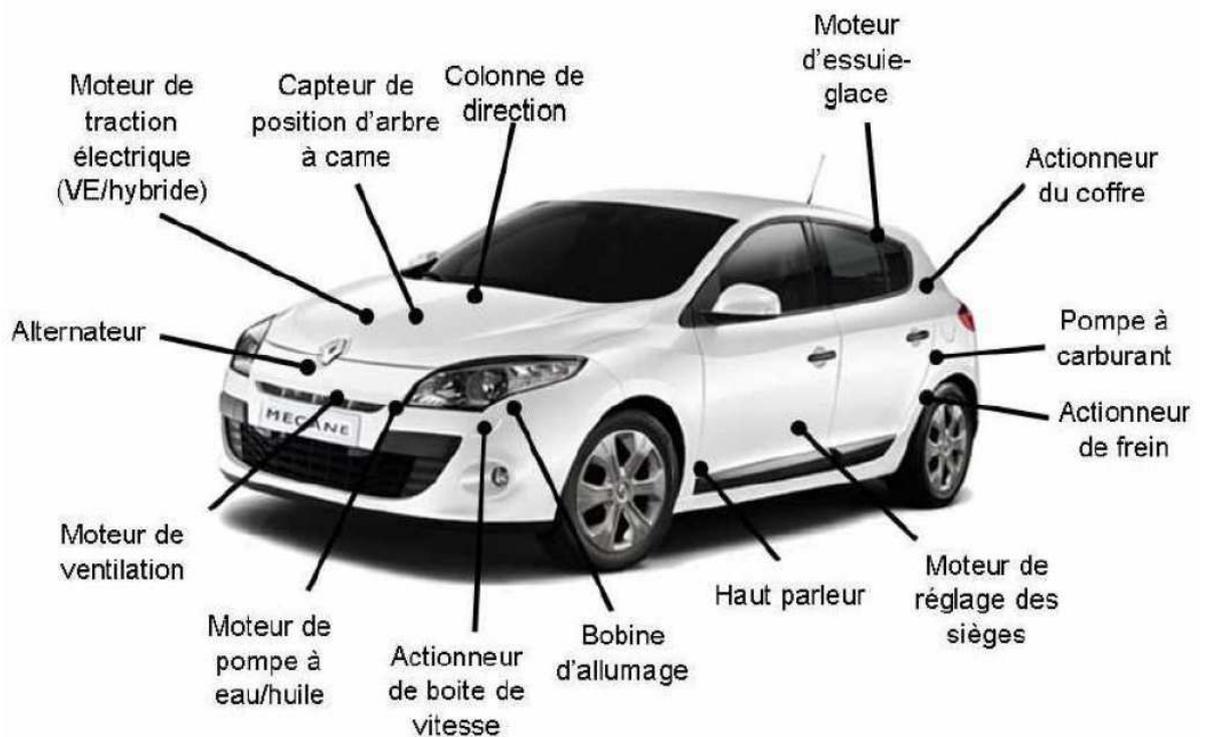
Figure 7 : Utilisations des terres rares dans un véhicule automobile (source : [13])



Néodyme et dysprosium sont utilisés dans les aimants permanents, nécessaires pour tous les moteurs électriques embarqués à bord d'un véhicule. Ces aimants sont produits à partir d'un alliage de néodyme, de fer et de bore ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}^4$). Le champ coercitif⁵ de ce matériau diminue quand la température augmente, ce qui rend son utilisation en l'état impossible dans des moteurs qui fonctionnent au-delà de 80 °C. Ce défaut peut être corrigé par l'introduction de dysprosium, jusqu'à hauteur de 40 % de la quantité de néodyme⁶.

Une automobile peut employer plus de 50 aimants : moteurs, capteurs, interrupteurs, leur nombre étant en constante augmentation au fur et à mesure que des fonctions plus nombreuses sont automatisées et motorisées. Les caractéristiques des aimants et leur composition dépendent de leur utilisation précise.

Figure 8 : Utilisation d'aimants à bord d'une automobile (source : Renault)

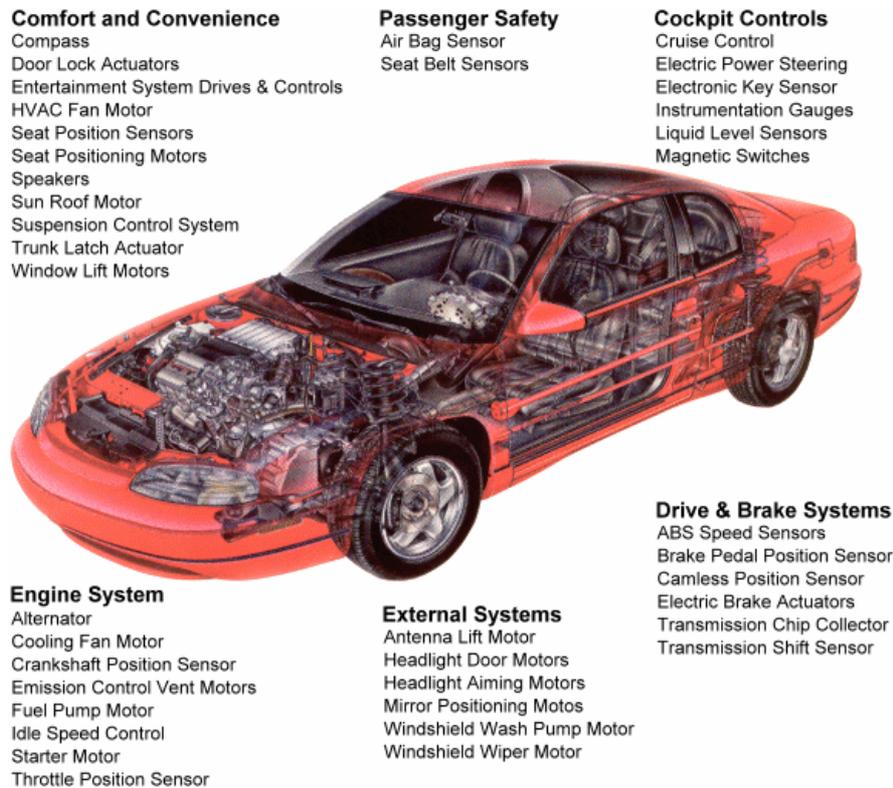


⁴ Le néodyme représente donc 26,7 % en masse de cette formule stœchiométrique.

⁵ Le champ coercitif est l'intensité du champ magnétique à appliquer pour annuler l'aimantation à saturation d'un matériau. Un matériau ayant un champ coercitif élevé est un bon candidat pour la fabrication d'aimants permanents.

⁶ Source : <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/64399.htm>

Figure 9 : Utilisation d'aimants à bord d'une automobile (source : site du fabricant d'aimants Arnold Magnetic Technologies <http://www.arnoldmagnetics.com>)



Les véhicules hybrides et électriques utilisent des moteurs électriques et des générateurs pour la traction, l'alimentation de la batterie, la récupération d'énergie au freinage. Ces aimants sont soumis à des contraintes plus élevées que la plupart des autres aimants : selon [23], les aimants des moteurs destinés à la traction contiennent de 8,5 % à 11 % de dysprosium, contre 4,2 % en moyenne pour les autres moteurs embarqués.

Un véhicule essence ou diesel peut contenir 300 à 400 g d'aimants NdFeB, un véhicule hybride autour de 2 kg. Les quantités exactes diffèrent selon les marques et les modèles.

Le néodyme est aussi employé dans les alliages utilisés pour les électrodes des batteries nickel-hydrure de métal (NiMH) des véhicules hybrides. Toutefois le développement des batteries Li-ion pourrait réduire cet emploi du néodyme.

2- Offre mondiale

2.1 Volume de production primaire

Les statistiques montrent quelques variations selon les sources, mais la production mondiale de terres rares se situe entre 130 000 et 140 000 t par an (tonnes d'oxydes de terres rares).

Le BRGM [1] indique que la production mondiale stagne autour de 140 000 t ; le BGS [2] situe la production mondiale autour de 122 500 t, le pic de production a été atteint en 2006 avec 137 000 t. L'USGS [3] donne des chiffres de l'ordre de 133 000 t par an.

En ce qui concerne les deux éléments qui nous intéressent, selon [6] :

- La production annuelle d'oxyde de néodyme serait de l'ordre de 21-25 kt⁷ dont environ 90 % provenant de Chine, et le reste de Molycorp ;
- La production annuelle d'oxyde de dysprosium serait au plus de 1,4 kt.

2.2 Répartition géographique de la production

La Chine (Mongolie Intérieure, Sichuan, Jiangxi en particulier) est de très loin le principal producteur minier de terres rares, avec 97 % de la production. Elle impose des quotas miniers, des quotas sur la transformation, et des taxes et des quotas à l'exportation sur les oxydes de terres rares. Cependant, actuellement une part importante des exportations de terres rares chinoises se fait illégalement. Le gouvernement a pris récemment la décision de constituer des stocks d'oxydes de TR stratégiques, dont le dysprosium. À terme, la Chine n'exporterait plus de terres rares lourdes.

Figure 10 : Estimation des productions chinoises par province (source : Innovation Metals Corp : www.innovationmetals.com)

Province / Région	2007	2008	2009	2010	2011
Fujian	220	320	720	1,500	2,000
Guangdong	700	1,000	1,500	2,000	2,200
Guangxi	200	200	200	2,000	2,500
Hunan	100	300	800	1,500	2,000
Mongolie intérieure	46,000	46,000	46,000	50,000	50,000
Jiangxi	7,400	7,400	7,400	8,500	9,000
Shandong	1,200	1,200	1,500	1,500	1,500
Sichuan	31,000	31,000	24,000	22,000	24,400
Yunnan	200	200	200	200	200
Quota de production	87,020	87,620	82,320	89,200	93,800
Production officielle	120,800	124,500	129,400	118,900	-

⁷ Abréviation : 1kt = 1 000 t.

Figure 11 : Production minière 2006-2010 d'oxydes de terres rares (données BGS [4])

Production, t d'oxydes de T.R.	2006	2007	2008	2009	2010
Chine	133 000	120 800	124 500	129 400	118 900
Russie	2 935	2 711	2 470	2 500	2 500
Brésil	620	760	540	200	200
Malaisie	580	440	150	20	480
Inde	45	32	22	20	20
Autres pays	ND	ND	ND	ND	ND

ND : non disponible.

Les données de l'USGS sont légèrement différentes de celles du BGS, mais du même ordre :

Figure 12 : Production minière 2010-2011 d'oxydes de terres rares et réserves (données USGS [3])

t d'oxydes de T.R.	Production		% production 2011	Réserves
	2010	2011		
Chine	130 000	130 000	97,7%	55 000 000
Inde	2 800	3 000	2,3%	3 100 000
CEI	ND	ND		19 000 000
Brésil	550	550	0,4%	48 000
Malaisie	30	30	0,02%	30 000
USA	-	-		13 000 000
Australie	-	-		1 600 000
Autres pays	ND	ND		22 000 000
Total mondial (arrondi)	133 000	133 000	100,00%	110 000 000

ND : non disponible

CEI : Communauté des Etats Indépendants

Dans les autres pays, on peut citer une petite production (moins de 100 t/an) en Thaïlande.

Il n'y a pas de production minière de terres rares en France, et selon le BRGM [1] le niveau de connaissance du potentiel français est très faible.

En Europe, les seuls gisements de TR actuellement exploités se trouvent en Russie, dans la péninsule de Kola. La production est faible devant celle de la Chine et devant la demande mondiale.

Plus des deux tiers des terres rares sont extraites en tant que sous-produit, le produit principal pouvant être le fer (Chine), le niobium-tantale (Brésil), le titane (Inde, Afrique australe), l'étain (Malaisie, Thaïlande).

2.3 Les principaux producteurs miniers

Les principaux producteurs actuels sont bien entendu situés en Chine ; nous citerons trois grands groupes, mais on trouvera dans [15] la liste de 41 sociétés auxquelles ont été attribués des quotas d'exportation pour 2012.

- **Baotou Steel** ou **Baogang Group** produit environ 50 % de l'offre mondiale ; les oxydes de TR sont un sous-produit du minerai de fer de la mine de Bayan Obo (Mongolie intérieure). La teneur en TR du minerai extrait pourrait baisser à l'avenir.
- **Chalco Rare Earths** a consolidé plus de 30 000 t de capacité de production dans le Jiangsu.
- **China Minmetals Corporation.**

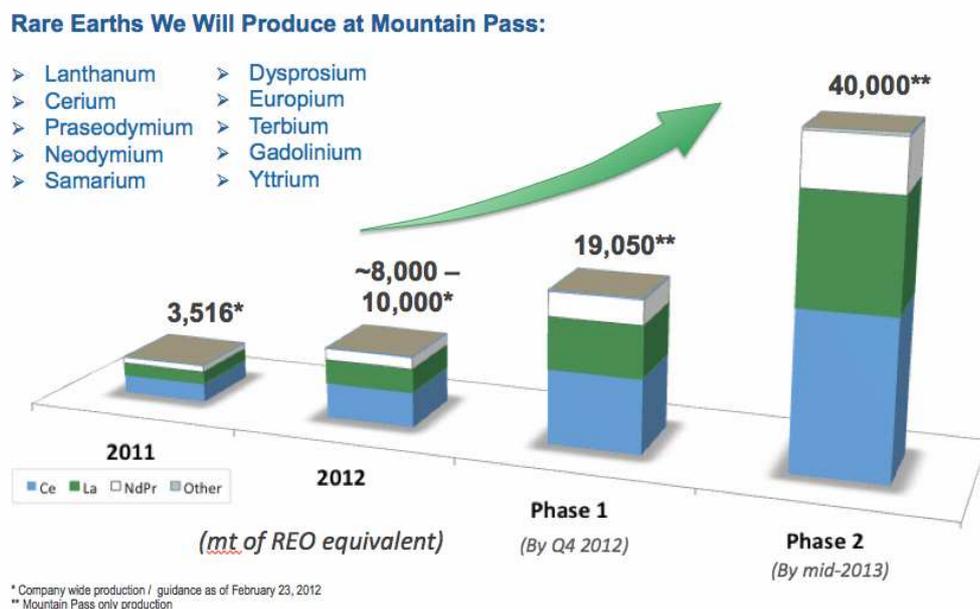
En Russie, la société **Lovozerkaia** exploite la loparite (niobiotitanate de terres rares) de la péninsule de Kola.

En Inde, **Indian Rare Earths** exploite du sable de plage pour en extraire les minéraux titanifères (ilménite, rutile), le zircon, le thorium ; un partenariat avec le japonais Toyota Tsusho a été mis en place pour extraire les terres rares du résidu de monazite. La capacité au démarrage (2012) serait de 4 000 t d'oxydes de terres rares par an.

Aux USA, **Molycorp** est en train de démarrer une modernisation/extension de son site de Mountain Pass, en Californie (projet Phoenix). Ce site était autrefois le principal fournisseur de terres rares, mais a dû fermer en 2002 sous la pression des prix chinois. Après avoir produit 2 500 t d'oxydes de terres rares en 2011, principalement cérium et lanthane, Molycorp compte atteindre une capacité de production de 19 050 t/an fin 2012, puis 40 000 t/an courant 2013 ; il s'agira essentiellement de terres rares légères, cérium, lanthane, néodyme et praséodyme ; la répartition entre TR au sein du gisement serait à peu près la suivante :

- Cérium 50 %
- Lanthane 34 %
- Néodyme 11 %
- Praséodyme 4 %
- Samarium 0,5 %
- Autres 0,5 %

Figure 13 : Programme de production de Molycorp (source : site www.molycorp.com)



Molycorp est en voie d'intégration vers l'aval (stratégie « Mine to magnet », de la mine à l'aimant), avec l'acquisition de Neo Materials en 2012, et possède des sites :

- de séparation des terres rares à Mountain Pass, Sillamäe (Estonie), Jiangsu et Shangdong (Chine) ;
- de production de poudres et alliages à base de terres rares à Tolleson (Arizona, anciennement Santoku America Inc), Sillamäe, à Tianjin (Chine) et Korat (Thaïlande), poudres de NdFeB en particulier ;
- de production d'aimants NdFeB dans Magnequench et dans l'entreprise commune avec Daido Steel et Mitsubishi, Intermetallics Japan (démarrage en 2013).

Très récemment, la société a indiqué qu'elle allait devoir rechercher un financement complémentaire pour terminer les investissements de Mountain Pass (d'un montant total de 895 M\$), car son cash-flow est inférieur aux prévisions en raison de la baisse des prix des oxydes de TR.

2.4 Séparation des terres rares

Les usines de séparation des terres rares opérationnelles sont situées en Chine (dont l'usine Rhodia de Liyang, dans le Jiangsu), en France (Rhodia à La Rochelle), en Estonie (Molycorp), aux USA (Molycorp, en redémarrage), au Japon (Shin-Etsu), au Kazakhstan (Irtys Rare Earths Company).

La société Innovation Metals Corp (IMC) projette de construire des usines de séparation sans ressources minières propres, en formant un consortium réunissant producteurs, clients, traders. Le premier site choisi est à Becancour (Québec).

2.5 Fabricants d'aimants

80 % des aimants NdFeB sont produits en Chine, la majeure partie du reste en Asie, notamment au Japon.

Quelques fabricants d'aimants NdFeB : San Huan Nd-Fe-B Magnetics Co. (Chine), Zhaobao (Chine), Daido Electronics (Japon), Hitachi Metals (Japon), Tridus Magnetics (USA) (JV avec San Huan), Arnold Magnetic Technologies (USA), Neo Materials Technology (Canada, maintenant dans le groupe Molycorp) ...

2.6 Recyclage

Globalement, la proportion de terres rares recyclées serait inférieure à 1 % (site de la société Molycorp). La difficulté est la faible quantité et la dispersion des TR dans les équipements les utilisant : à titre d'exemple les aimants des haut-parleurs et des vibreurs des téléphones mobiles sont de très petite taille, et leur récupération est coûteuse. Les aimants de moteurs sont de plus grande taille. Techniquement, le recyclage d'aimants aussi puissants est difficile.

Rhodia a lancé trois projets de recyclage des terres rares :

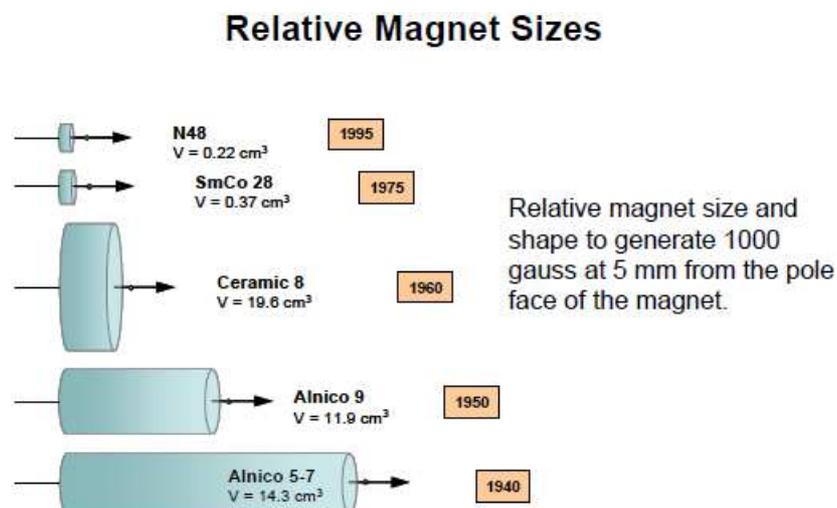
- Ampoules fluorescentes,
- Batteries NiMH (en partenariat avec Umicore),
- Aimants.

2.7 Substitution

La principale application qui nous intéresse est la production d'aimants permanents NdFeB. Nous avons vu qu'il y a quatre grandes sortes d'aimants permanents, la plus importante en volume étant les ferrites, aimants bon marché.

On peut remplacer les aimants NdFeB par des ferrites, mais les performances sont inférieures, en particulier le volume de l'aimant pour un même champ magnétique (figure ci-après) ; ceci peut être rédhibitoire pour certaines applications.

Figure 14 : Volumes comparés des différents types d'aimants permanents, à champ magnétique identique (source : [17])



On peut également utiliser des aimants samarium cobalt, mais le samarium est encore moins représenté dans les gisements que le néodyme.

Le praséodyme peut substituer partiellement le néodyme dans les aimants NdFeB, mais en faible quantité (moins de 5 % pour les aimants destinés aux véhicules et aux éoliennes) [21]. Il peut également substituer partiellement le samarium dans les aimants Sm-Co.

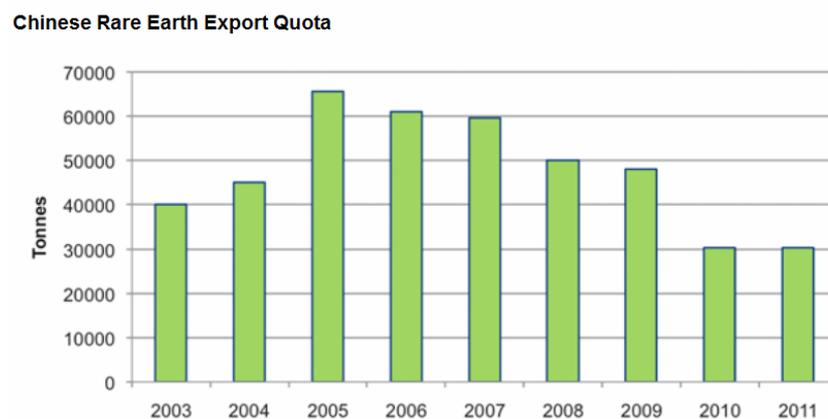
En ce qui concerne le dysprosium, dont la disponibilité peut être problématique, le seul substitut est le terbium, encore moins disponible ; des recherches sont en cours, soit pour trouver des solutions techniques évitant la montée en température pendant le fonctionnement (Boulder Wind selon [21]), soit pour réduire la proportion de Dy nécessaire pour conserver les performances en température (réduction de la taille des grains des poudres magnétiques, diffusion du dysprosium dans l'aimant).

Enfin, des technologies utilisant l'induction (moteurs de traction, éoliennes) ou les supraconducteurs (pour les éoliennes de grande puissance) pourraient se substituer aux technologies utilisant des aimants permanents.

2.8 Évolution des prix

Les prix des terres rares ont été marqués par une forte volatilité, en raison des décisions chinoises sur les taxes et les quotas à l'exportation et la fermeture de certaines mines.

Figure 15 : Évolution 2003-2011 des quotas globaux d'exportation chinois (source : <http://www.frontierrareearths.com/industry-data/china>)



Les quotas d'exportation chinois ont fortement baissé ; en 2012, ils distinguent entre terres rares légères et lourdes.

Figure 16 : Prix des oxydes de terres rares exportés de Chine (prix FOB Chine en \$/kg, moyenne pour la période considérée ; information www.lynascorp.com)

Oxydes de terres rares (prix FOB Chine en \$/kg)	Informations données par Lynas sur son site www.lynascorp.com									
	2008	2009	2010	1er trimestre 2011	2ème trimestre 2011	3ème trimestre 2011	4ème trimestre 2011	2011	1er trimestre 2012	30 juillet 2012
Lanthane	8,71	4,88	22,40	75,87	135,02	117,68	66,46	104,10	42,31	20,00
Cérium	4,56	3,88	21,60	77,52	138,29	118,65	59,31	102,00	37,92	21,00
Néodyme	31,90	19,12	49,50	130,23	256,15	338,85	244,23	234,40	177,31	105,00
Praséodyme	29,48	18,03	48,00	119,65	220,08	244,73	209,62	197,30	163,08	110,00
Samarium	5,20	3,40	14,40	72,75	125,60	129,45	95,31	103,40	73,85	70,00
Dysprosium	118,49	115,67	231,60	412,90	921,20	2 262,31	2 032,31	1 449,80	1 366,15	1 000,00
Europium	481,92	492,92	559,80	719,20	1 830,00	4 900,00	3 800,00	2 842,90	3 623,08	2 020,00
Terbium	720,77	361,67	557,80	717,60	1 659,20	3 761,54	2 973,85	2 334,20	2 658,46	2 000,00

Les prix reflètent la tension offre-demande sur le marché hors Chine selon les différentes terres rares. Tous les prix se sont envolés jusqu'à un maximum au troisième trimestre 2011, puis sont redescendus mais sont encore très supérieurs à leur niveau d'il y a trois ou quatre ans. Il s'agit des prix sur le marché spot, les prix négociés dans le cadre de contrats d'approvisionnement sont moins volatils mais ne sont pas publiés.

Le prix de l'oxyde de néodyme, de l'ordre de 20-30 \$/kg en 2008-2009, est monté à 339 \$/kg en moyenne trimestrielle eu 3^{ème} trimestre 2011, et est redescendu à 105 \$/kg.

L'oxyde de dysprosium, de 115-120 \$/kg en 2008-2009, est monté jusqu'à 2 262 \$/kg au 3^{ème} trimestre 2011, et est redescendu à 1 000 \$/kg.

Les prix sur le marché domestique chinois sont nettement inférieurs :

Figure 17 : Prix des oxydes de terres rares sur le marché domestique chinois (\$/kg information www.lynascorp.com)

Oxydes. Prix marché domestique Chine en \$/kg	2009	2010	2011	4ème trimestre 2011	1er trimestre 2012	30 juillet 2012
Lanthane	3,06	4,23	16,26	18,28	15,13	11,29
Cérium	2,13	3,55	19,58	20,65	15,99	11,29
Néodyme	11,66	29,28	132,06	122,77	90,80	67,40
Praséodyme	11,38	27,60	104,60	106,95	79,33	65,83
Samarium	2,05	2,47	11,85	14,49	12,69	9,87
Dysprosium	80,24	166,48	994,33	1 085,35	776,79	595,61
Europium	351,75	410,42	2 025,00	2 228,39	1 598,80	1 018,81
Terbium	253,60	388,80	1 596,82	1 765,10	1 257,07	962,07

3- Contraintes sur l'offre et projets de développement

3.1 Réserves et ressources mondiales, répartition

Selon le BRGM [1], « Par ordre d'abondance dans l'écorce terrestre beaucoup de terres rares ne sont pas si rares que cela : le néodyme est presque aussi abondant que le cuivre, et toutes les terres rares sont plus abondantes que l'argent ou l'antimoine. Cependant les concentrations économiquement exploitables de terres rares sont beaucoup moins fréquentes que ce que pourrait laisser supposer leur relative abondance dans l'écorce terrestre. »

L'USGS estime les réserves à 110 000 000 tonnes, ce qui représente de nombreuses années de consommation, même si cette dernière croît rapidement.

Figure 18 : Réserves estimées par l'USGS [3]

t d'oxydes de T.R.	Réserves	% réserves mondiales
Chine	55 000 000	50,0%
Inde	3 100 000	2,8%
CEI	19 000 000	17,3%
Brésil	48 000	0,0%
Malaisie	30 000	0,0%
USA	13 000 000	11,8%
Australie	1 600 000	1,5%
Autres pays	22 000 000	20,0%
Total mondial (arrondi)	110 000 000	100,0%

La Chine représente 50 % des réserves mondiales, mais les réserves existant dans d'autres pays, si elles sont mises en exploitation, permettraient de desserrer l'étau du monopole chinois actuel.

Au-delà de la ressource globale en terres rares, il faut aussi prendre en considération la répartition des différentes terres rares dans les gisements ; le plus souvent la ressource en terres légères est plus importante qu'en terres lourdes. Les gisements sont donc d'autant mieux valorisés que la proportion de terres lourdes y est plus élevée.

Les quotas à l'exportation chinois distinguent les terres rares légères et les terres rares lourdes et intermédiaires ; la première allocation 2012, sur un total de 25 150 t allouées à 41 sociétés, en affecte 22 096 aux terres rares légères.

La Corée du Nord pourrait disposer de réserves importantes de terres rares.

3.2 Projets miniers

Rare Earths Elements Letter International [5] donne une liste de 10 projets miniers hors Chine :

Figure 19 : 10 projets miniers hors Chine avec les capacités annuelles visées [5]

Société	Nom du projet	Pays	Capacité visée (t d'oxydes)	Date de démarrage	Capacité phase 2 (t/an)
Molycorp	Mountain Pass	USA	19 000	2012	40 000 (en 2014)
Lynas	Mt Weld	Australie	11 000	2012	22 000 (en 2013)
Great Western Minerals	Steenkampskraal	RSA	5 000	2013	
Alkane Resources	Dubbo	Australie	10 000	2014	
Rare Element Resources	Bear Lodge	USA	10 000	2016	
Greenland Minerals & Energy	Kvanefjeld	Groenland	44 000	2016	
Frontier Rare Earths	Zandkopsdrift	RSA	20 000	2016	
Avalon Rare Metals	Nechalacho	Canada	10 000	2017	
Quest Rare Minerals	Strange Lake	Canada	12 550	2017	
Arafura Resources	Nolans Bore	Australie	20 000	2017	

On y trouve surtout des pays miniers traditionnels : USA, Canada, Australie, Afrique du Sud.

D'autres projets sont également à l'étude (liste non exhaustive) :

- Ucore Rare Metals à Bokan Mountain (Alaska)
- Tasman Metals à Norra Kärr (Suède)
- Lynas à Duncan (extension du site de Mt Weld, Australie) et au Malawi
- Dong Pao au Vietnam
- Summit Atom Rare Earth Company (SARECO), au Kazakhstan, en partenariat avec Sumitomo ; le projet d'une capacité de 1 500 t d'oxydes (sous forme de concentré) démarrerait fin 2012
- Stans Energy au Kirghizistan, qui a repris l'ancienne mine de Kutessai II (où les terres rares lourdes représentent 46 % du total, avec 6 % de dysprosium) et l'usine de séparation de Kashka associée
- CBMM, le leader mondial du niobium, dont le gisement contient aussi des terres rares (Brésil)
- Medallion Resources (recherche de sources de monazite comme sous-produit de l'exploitation des sables lourds, et projet de terres rares lourdes du gisement de Red Wine au Canada)
- Montero Mining and Exploration (Wigu Hill, Tanzanie)
- Matamec Exploration Inc. (gisement de Kipawa au Québec)
- Hastings Rare Metals (gisement de terres lourdes de Hastings, Australie)
- Northern Minerals (gisement de terres lourdes de Browns Range, Australie)
- Tantalus Rare Earths (Madagascar, 21 % de terres lourdes dans le total des TR).

Chaque gisement a ses propres caractéristiques, et nécessite un procédé de traitement spécifique, qui doit être mis au point en laboratoire puis optimisé en atelier pilote avant le démarrage de l'exploitation. L'impact sur l'environnement est étudié de près par les gouvernements concernés et les populations locales (crainte des déchets radioactifs). Les investissements nécessaires sont élevés (plus de 50 \$ par kg de

capacité annuelle en oxydes de terres rares [18]). Il peut s'écouler entre 5 et 12 ans entre l'identification des ressources et la décision de lancement.

Détails sur quelques-uns des projets les plus avancés hors Chine :

Le développement de **Molycorp** avec le redémarrage de **Mountain Pass** et le partenariat d'**Indian Rare Earths** avec Toyota Tsusho ont été traités au paragraphe 2.3.

Lynas Corporation développe la mine de Mount Weld, en Australie, au sein du gisement CLD (Central Lanthanide Deposit) qui représente 1,5 Mt⁸ de ressources en oxydes de terres rares ; il s'agit surtout de terres rares légères : le lanthane et le cérium représentent 71,4 % du total, le néodyme 18,13 %, le praséodyme 5,16 %, le dysprosium seulement 0,25 %. L'usine de concentration est sur le site et en cours de démarrage. Une usine de séparation est en cours de construction en Malaisie, avec une capacité de 11 000 t/an de produits qui comprendront 2 700 t d'oxyde de néodyme et praséodyme et 480 t de terres rares lourdes ; une seconde phase de 11 000 t est prévue ; cette usine se heurte à une forte opposition locale. Lynas étudie le gisement de Duncan, adjacent au CLD, dont les ressources sont actuellement estimées à 432 kt d'oxydes, et qui serait un peu plus riche que le CLD en dysprosium (1,27 % du total des oxydes de terres rares) et yttrium (5,17 % à comparer à 0,76 %). Lynas et Siemens envisagent la création d'une entreprise commune pour la production d'aimants NdFeB. Lynas a noué un partenariat avec Rhodia pour la séparation des TR.

Great Western Minerals Group, dont la filiale LCM (Less Common Metals) produit en particulier des alliages pour aimants permanents (NdFeB et SmCo), étudie le redémarrage par sa filiale Rareco de l'ancienne mine (de thorium, le minerai étant de la monazite) de Steenkampskraal (RSA), avec sur le site la concentration et la production de 12 000 t/an d'une solution de chlorures de terres rares ; une usine de séparation sera construite à proximité par une JV 75/25 avec un partenaire chinois⁹, de capacité 5 000 t/an dont 890 t/an de néodyme et 50 t/an de dysprosium ; l'intégralité de la production de Nd et Dy sera transformée en alliages pour aimants dans la filiale LCM. Le démarrage est prévu pour mi-2013.

Alkane Resources développe le projet Dubbo (Australie) : zirconium, niobium-tantale, terres rares. La production démarrerait début 2015 [13]. La proportion de terres rares est encore en faveur des légères qui sont à hauteur de 76,7 % du total des terres rares dans le gisement. La capacité de production visée serait de 4 170 t/an d'oxydes de TR dont 650 t de néodyme et 95 t de dysprosium [12], sous forme d'un concentré de terres légères et d'un concentré de terres lourdes. Alkane vendrait sa production à Shin-Etsu, qui dispose d'une usine de séparation au Japon.

⁸ Abréviation : 1 Mt = 1 000 000 t.

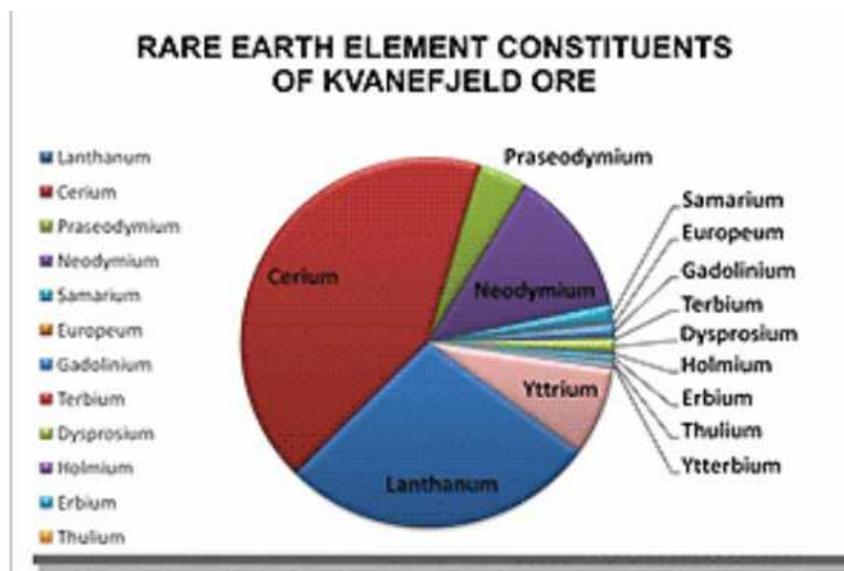
⁹ Ganzhou Qiandong Rare Earth Group.

On peut noter que ces quatre projets : Molycorp, Lynas, Great Western, Alkane, qui semblent devoir être les premiers à passer au stade de la production, sont pauvres en terres rares lourdes ; leur production de dysprosium sera donc faible.

Quelques détails sur deux projets situés sur le territoire de l'Union européenne :

Greenland Minerals and Energy Ltd. (GMEL) (Groenland) développe le projet polymétallique de **Kvanefjeld**, sur un important gisement d'uranium, de zinc et de terres rares ; la ressource, réévaluée début juin 2012, serait de 10,3 Mt d'oxydes de terres rares, majoritairement des terres légères, avec 0,370 Mt d'oxydes de terres rares lourdes et 0,840 Mt d'oxyde d'yttrium.

Figure 20 : Répartition des terres rares dans les ressources du projet Kvanefjeld (source : site de la société, www.ggg.gl)



L'étude de pré faisabilité de Kvanfjeld conduit à un coût inférieur à 8 \$/kg d'oxyde de terres rares, pour une capacité de l'ordre de 40 000 t/an d'oxydes de TR, sous forme d'une combinaison de trois produits :

- Oxyde de terres rares lourdes (4 200 t/an)
- Carbonate de terres rares mixtes (10 400 t/an)
- Carbonate de terres rares légères (26 200 t/an).

En recoupant des informations diffusées par GMEL, la proportion de néodyme dans les terres rares serait de l'ordre de 13 % et celle du dysprosium de 1,1 %.

Le démarrage de la production ne se ferait pas avant 2016.

Tasman Metals développe le projet **Norra Kärr, en Suède** : la proportion des terres rares dans le gisement est de 49,7 % légères dont 11,3 % de néodyme, et 50,3 % de lourdes dont 34,6 % d'yttrium et 4,3 % de dysprosium ; la capacité visée serait de 6 600 t/an d'oxydes de TR sous forme d'un concentré de carbonates de terres lourdes

et d'un de terres légères, et pour les terres rares nous intéressant 755 t d'oxyde de néodyme et 283 t d'oxyde de dysprosium. La production démarrerait en 2016.

La question de la répartition entre terres rares légères et lourdes est importante, car il y a une distorsion entre la demande et l'offre telle qu'elle résulte des projets engagés.

Un classement de 16 projets actuellement annoncés en fonction de la proportion de terres rares lourdes dans leur gisement a été effectué [11].

Figure 21 : Pourcentage de terres rares lourdes dans le total des terres rares pour 16 projets (source [11])

Projet	% terres rares lourdes
Molycorp	0,25
Great Western (non-monazite)	1,93
Rare Element	2,17
Arafura Resources	2,34
Lynas Corp	3,83
Great Western (monazite)	6,11
Frontier Rare Earths	6,37
Greenland Minerals & Energy	10,7
Avalon Rare Metals	12,36
Alkane Resources	21,11
Ucore Rare Metals	34,84
Quest Rare Minerals	36,38
Stans Corp	39,26
Tasman Metals	49,35
TUC Resources	84,4
Northern Minerals	84,52 (dont Y 62 %)

Le projet de Hastings Rare Metals en Australie [20], non cité dans cette liste, présente une proportion de 85,8 % de terres lourdes.

3.3 Projets d'usines de séparation des terres rares

Les projets miniers ne comportent pas tous d'usine de séparation ; parmi ceux qui ont annoncé la construction d'une usine de séparation, on trouve :

- Molycorp
- Lynas
- Great Western Minerals
- Frontier Rare Earth
- Avalon Rare Metals
- Stans Energy (redémarrage de l'usine de Kashka).

IMC (voir ci-dessus) projette de construire une usine de séparation au Québec.

4- Analyse de quelques facteurs de criticité

4.1 Rareté relative des ressources minières

Les ressources minières en terres rares existent globalement, par contre l'équilibre entre TR est délicat. Le dysprosium, terre rare lourde, est l'objet d'une demande proportionnellement plus importante que les autres TR si on la rapporte à sa proportion dans les gisements faisant l'objet de projets d'exploitation. La ressource réellement exploitée en dysprosium peut être un facteur limitant.

4.2 Concentration dans la chaîne de production

La production minière de terres rares, de même que l'étape aval de séparation des TR, est concentrée en Chine. Les exploitants non chinois ont été amenés à fermer, à quelques exceptions près, par le développement de la production et des exportations chinoises. Maintenant la Chine développe son industrie et consomme elle-même une grande partie de sa production, ce qui met sous pression les industriels non chinois à l'aval de la chaîne de valeur.

Des projets de mines et d'usines de séparation sont en cours de réalisation hors de Chine, ce qui devrait permettre de soulager cette pression pour le néodyme. Par contre les projets non chinois apportant un supplément notable de dysprosium ne commenceront à produire que dans quelques années, la Chine va donc rester en position de quasi-monopole sur ce métal.

La Chine concentre environ 80 % de la fabrication d'aimants NdFeB.

4.3 Importance pour la filière automobile

Le néodyme et le dysprosium sont des constituants des aimants permanents NdFeB des moteurs électriques, et le développement des moteurs de traction pour automobiles hybrides et électriques va nécessiter des quantités rapidement croissantes ; dans un secteur voisin, les deux-roues électriques vont également demander des quantités importantes d'aimants NdFeB.

Le néodyme est également utilisé dans les batteries nickel-hydrure de métal des véhicules hybrides, qui pourraient à terme céder la place aux batteries Li-ion.

Les enjeux en termes de coût d'achat de la matière première (oxyde) ne sont pas négligeables : pour produire 2 kg d'aimants par véhicule hybride il faut au départ de la chaîne¹⁰ :

- environ 1 kg d'oxyde de néodyme dont l'achat coûte, au prix actuel de 115 \$/kg, 93 euros ; au prix du troisième trimestre 2011, 339 \$/kg, le coût serait de 276 euros soit un renchérissement de 161 euros par véhicule ;

¹⁰ Et compte tenu des rendements de transformation le long de cette chaîne.

- environ 320 g d'oxyde de dysprosium, dont le coût d'achat actuel est de 260 euros, et deviendrait 589 euros au prix du 3^e trimestre 2011, le surcoût étant alors de 329 euros.

Si les prix retrouvaient leur niveau du 3^e trimestre 2011 le surcoût par véhicule, en supposant inchangé le coût de toutes les autres étapes, représenterait 490 euros.

5- Scénarios¹¹ prospectifs à 10 ans

5.1 Scénario d'évolution de la demande

En combinant les pourcentages de terres rares utilisées dans les différentes applications (figure 2) et la consommation de TR de chaque application (figure 3), on peut obtenir des chiffres approximatifs de consommation des deux TR qui nous intéressent :

Figure 22 : Consommation 2010 d'oxydes de néodyme et de dysprosium par secteur d'application, en tonnes (approximatif, calculé à partir des figures 2 et 3)

Consommation 2010 (t d'oxydes)	Total TR	Nd en % des TR	Nd Consommé	Dy en % des TR	Dy consommé
Catalyseurs	24 500	3%	735		
Verre	11 000	3%	330		
Polissage	19 000		0		
Alliages métalliques	22 000	10%	2 200		
Aimants	26 000	69,4%	18 044	5%	1 300
Luminophores	8 500		0		
Céramiques	7 000	12%	840		
Autres	7 000	15%	1 050		
TOTAL	125 000		23 199		1 300

La principale utilisation du néodyme, et pratiquement la seule pour le dysprosium, est dans la production d'aimants permanents néodyme-fer-bore (NdFeB).

En 2010 la demande en aimants permanents NdFeB aurait représenté 56 640 t, avec une teneur moyenne en dysprosium de 1,75 %, soit 991 t de dysprosium métal contenu dans le produit final ; compte tenu des pertes du procédé (rendement d'environ 77,6 %) cela correspond à un besoin de 1 277 t de métal ; compte tenu du facteur de conversion entre oxyde et métal et du rendement de transformation, cela demanderait une quantité d'oxyde de l'ordre de 1 600 t [17] ; on note l'écart aux 1 300 t de la figure précédente. Lifton [6] évalue la consommation de Dy à environ 1 400 t d'oxyde.

Trois secteurs de la demande sont appelés à croître rapidement [16] :

¹¹ Rappelons qu'un scénario n'est pas une prédiction.

- TIC : disques durs, CD, DVD, ... ; la quantité par dispositif est faible, mais le nombre d'unités produites est important, de sorte que la masse d'aimants NdFeB vendus pour cette activité représente autour de 14 000 t en 2012. Ces aimants ne contiennent pas de dysprosium, ou très peu.
- Les moteurs pour propulser les deux-roues électriques (essentiellement en Asie), et les automobiles hybrides et électriques ; un véhicule hybride contient environ 2 kg d'aimants, avec des taux élevés de dysprosium : environ 9 % pour les moteurs de traction ; un deux-roues électrique entre 60 et 350 g à 4,1 % de Dy.
- Les éoliennes : 11 540 t d'aimants NdFeB auraient été utilisées en 2010 par ce secteur, dont 93 % en Chine ; le néodyme représente 27,5 % de la masse d'aimants et le dysprosium 4,1 %. La technologie des générations actuelles d'éoliennes (entraînement direct) nécessite près de 600 kg d'aimants par MW, soit 165 kg de néodyme par MW et 24,6 kg de dysprosium par MW. La technologie en cours d'industrialisation (entraînement hybride) ne nécessite que 165 à 250 kg d'aimants et pourrait équiper la moitié des turbines installées en 2020 ; la demande 2020 de ce secteur pourrait alors représenter 16 830 t d'aimants, soit 4 638 t de néodyme et 690 t de dysprosium. Les hydroliennes représenteraient une demande complémentaire.

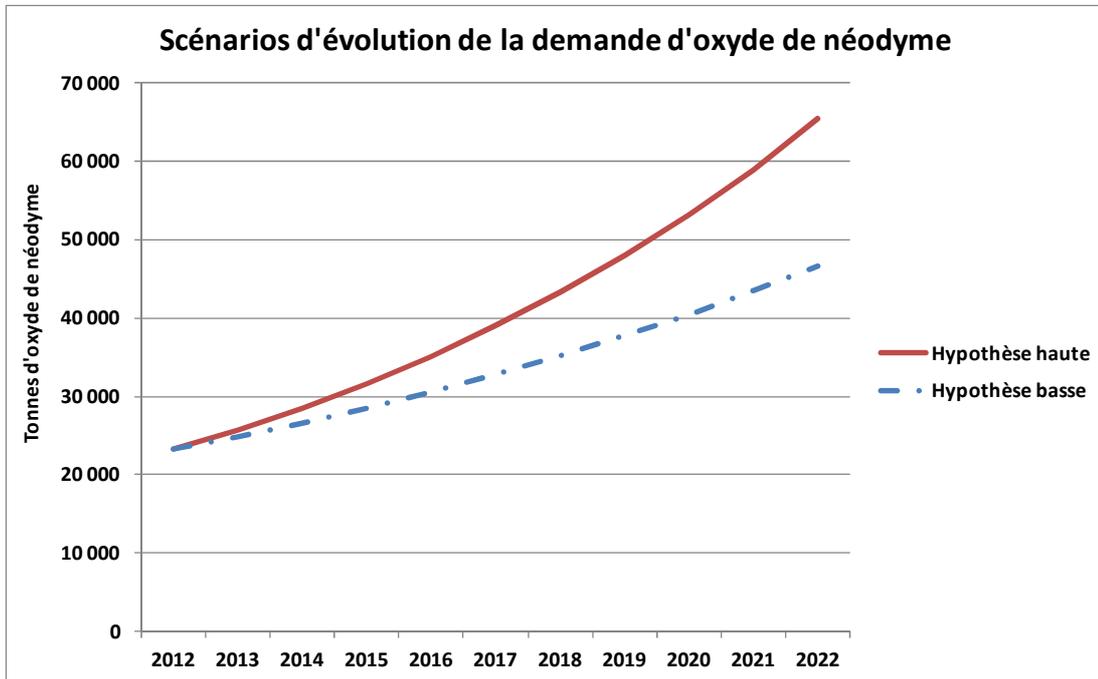
L'évolution de la demande en néodyme et dysprosium dépend de beaucoup de facteurs, en particulier de la vitesse de développement des véhicules à traction électrique et des éoliennes et hydroliennes, des évolutions technologiques résultant des recherches visant à utiliser moins de terres rares dans les aimants, du déplacement des batteries NiMH par les batteries au lithium, etc. ; en conséquence nous bâtissons deux scénarios de croissance : une hypothèse basse et une hypothèse haute.

En ce qui concerne le secteur des aimants permanents NdFeB, le TMCA résultant de nos hypothèses serait de 8 % dans l'hypothèse basse et de 12 % dans l'hypothèse haute ; un facteur majeur d'incertitude est la pénétration des véhicules à traction électrique (à titre d'illustration l'étude [21] du DoE utilise deux hypothèses extrêmes à l'horizon 2025 : 4,2 millions de véhicules vendus dans une hypothèse de faible pénétration, et 36,9 millions dans une hypothèse de pénétration forte).

Par comparaison, Roskill [22] projette un taux de croissance de la demande en aimants NdFeB de l'ordre de 9 % par an sur 2012-2020 : 6 à 8 % par an d'ici 2016, et une accélération à partir de 2016. La Chine resterait de loin le principal producteur de ces aimants.

Scénarios pour le néodyme :

Figure 23 : Scénarios d'évolution de la demande mondiale en oxyde de néodyme



La demande en 2022 se situerait entre 46 et 65 000 t d'oxyde de néodyme. Le taux Moyen de Croissance Annuel (TMCA) résultant serait de 7,2 % pour l'hypothèse basse et de 10,9 % pour l'hypothèse haute.

À titre de comparaison, [6] évoque un taux de croissance de la demande de néodyme de 8 à 9 % par an. L'étude économique préliminaire du projet Bear Lodge [19] prévoit une demande de 73 500 t en 2020, plus élevée que notre hypothèse haute.

Scénarios pour le dysprosium :

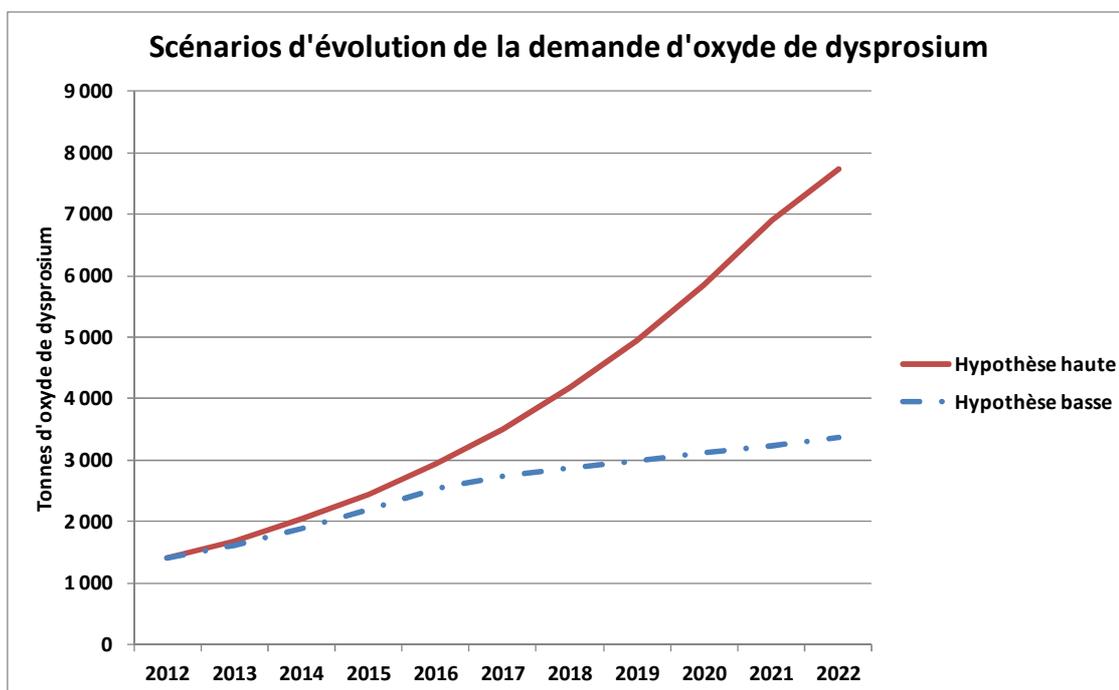
La proportion d'aimants incorporant du dysprosium à des teneurs plus élevées va croître sous l'effet du développement des éoliennes et des moteurs électriques de traction pour deux-roues et automobiles. Il va en résulter une augmentation de la teneur moyenne en dysprosium des aimants NdFeB, qui passerait de 1,75 % en 2010 à 3 % en 2015 selon [17].

Notre scénario hypothèse haute reprend une croissance du secteur des aimants NdFeB de 12 %, avec un taux moyen de dysprosium atteignant 4 % en 2021-2022 ; le scénario hypothèse basse repose sur une croissance de la demande en aimants NdFeB de 8 %, et un taux moyen de dysprosium atteignant 3 % en 2016, mais baissant ensuite lentement sous l'effet de la mise en place de solutions technologiques permettant de réduire ce taux.

Nous n'avons pas voulu multiplier les scénarios, mais on pourrait imaginer (par exemple) que l'incitation à réduire le taux de dysprosium serait plus forte dans le cas

de demande élevée pour les aimants NdFeB. Les deux scénarios retenus encadrent ce type d'évolution.

Figure 24 : Scénarios d'évolution de la demande mondiale en oxyde de dysprosium



La demande en dysprosium augmenterait beaucoup plus vite que la demande en néodyme : le TMCA 2012-2022 serait de 9,1 % dans l'hypothèse basse et 18,6 % dans l'hypothèse haute. La demande 2022 en oxyde de dysprosium atteindrait 3 400 t dans l'hypothèse basse et 7 700 t dans l'hypothèse haute.

À titre de comparaison, [17] prévoit un besoin de 8 155 t en 2020, plus élevé que notre hypothèse haute. L'étude économique préliminaire du projet Bear Lodge [19] prévoit une demande de 5 060 t en 2020, à l'intérieur de notre fourchette. Les présentations des projets de Hastings [20], Northern Minerals et TUC Resources utilisent les mêmes projections qui aboutissent à une demande de 3 447 t en 2020, ce qui est un peu plus élevé que notre hypothèse basse.

5.2 Scénario d'évolution de l'offre

L'évolution de la politique chinoise est difficile à prévoir. La production de terres rares en Chine est une chose, les exportations en sont une autre. La Chine peut choisir de réserver sa production à sa propre consommation, voire de freiner sa production pour ménager ses réserves et importer des terres rares pour alimenter son industrie. En un premier temps, nous raisonnerons à production chinoise constante.

Hors Chine, de nombreux projets miniers concernant les terres rares sont à l'étude. Beaucoup en sont à leurs premières phases et n'ont pas encore publié d'évaluation préliminaire de faisabilité avec indication des tonnages de production visés.

Nous prendrons en compte les capacités annoncées par les projets suivants, avec la date de démarrage plausible résultant de la dernière mise à jour, en supposant que la production de la première année est à 50 % de la capacité annoncée :

Figure 25 : Projets miniers identifiés par capacité et date de démarrage

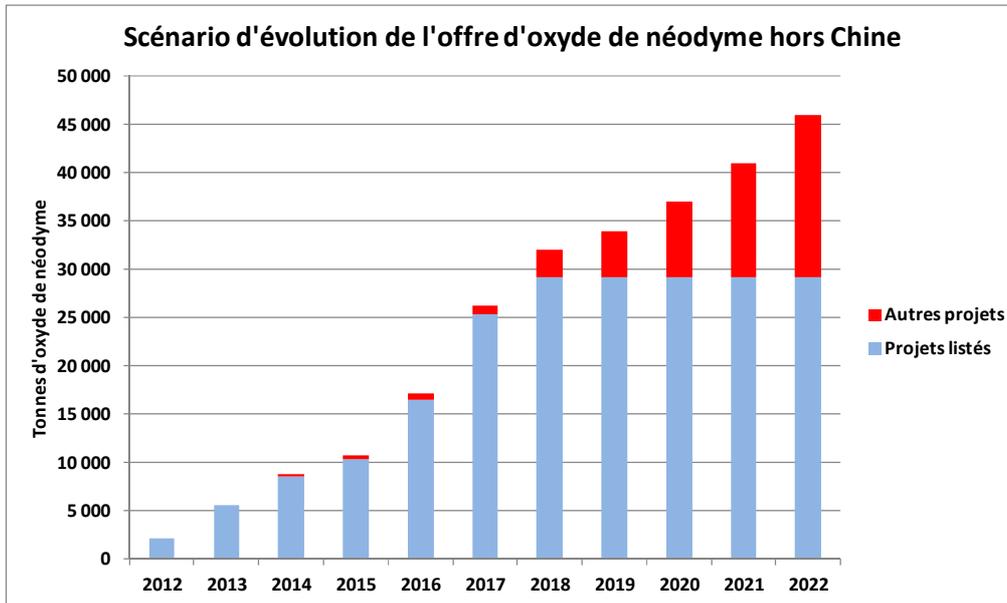
Projet	Date démarrage	Capacité de production (t d'oxydes de TR)
Molycorp Mountain Pass (USA)	2012	19 000
avec Phase 2	2014	40 000
Lynas Mt Weld (Australie)	2012	11 000
avec Phase 2	2013	22 000
Great Western Minerals (RSA)	2013	5 000
Alkane Resources, Dubbo (Australie)	2015	4 170
Tasman Metals, Norra Kär (Suède)	2016	6 637
Greenland Minerals and Energy Ltd	2016	43 729
Frontier Rare Earths (RSA)	2016	20 000
Rare Element Resources, Bear Lodge (USA)	2017	10 400
Avalon Rare Metals, Nechalacho (Canada)	2017	10 000
Quest Rare Minerals, Strange Lake (Canada)	2016	12 100
Arafura Resources, Nolans (Australie)	2017	20 000
Hastings Rare Metals, Hastings (Australie)	2017	10 000

À côté de ces projets, nous prenons en compte sur les années 2012-2017 de petites capacités correspondant à des projets comme Indian Rare Earths, ou des extensions de capacité.

À partir de 2018, nous considérons que de nouveaux projets viennent à maturité, et qu'en moyenne leur rapport terres rares lourdes/légères est plus élevé ; c'est le cas de projets comme ceux de Northern Minerals (Browns Range, Australie) et de TUC Resources (Stromberg, Australie) qui sont actuellement annoncés comme devant démarrer d'ici 2017, mais dont la capacité de production n'est pas encore connue.

Offre de néodyme :

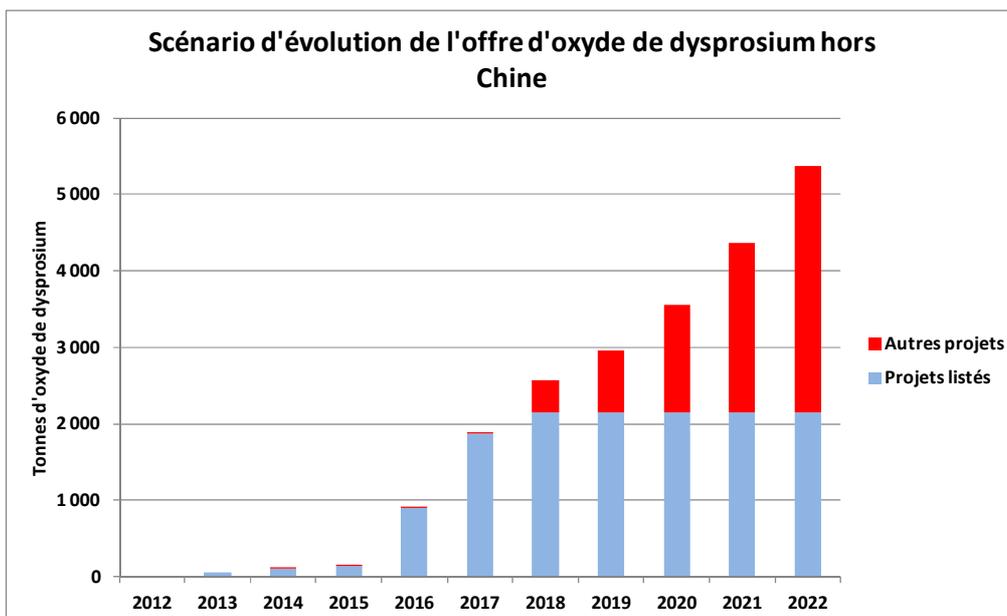
Figure 26 : Scénario d'évolution de l'offre d'oxyde de néodyme hors Chine



L'offre non chinoise d'oxyde de néodyme des projets listés (figure 25) croîtrait régulièrement pour atteindre 29 100 t en 2018. À cette échéance, et à production chinoise constante, la production mondiale actuelle serait plus que doublée. Selon nos hypothèses, à l'échéance 2022, les projets non chinois permettraient d'atteindre un volume d'offre triple de l'offre 2012.

Offre de dysprosium :

Figure 27 : Scénario d'évolution de l'offre d'oxyde de dysprosium hors Chine

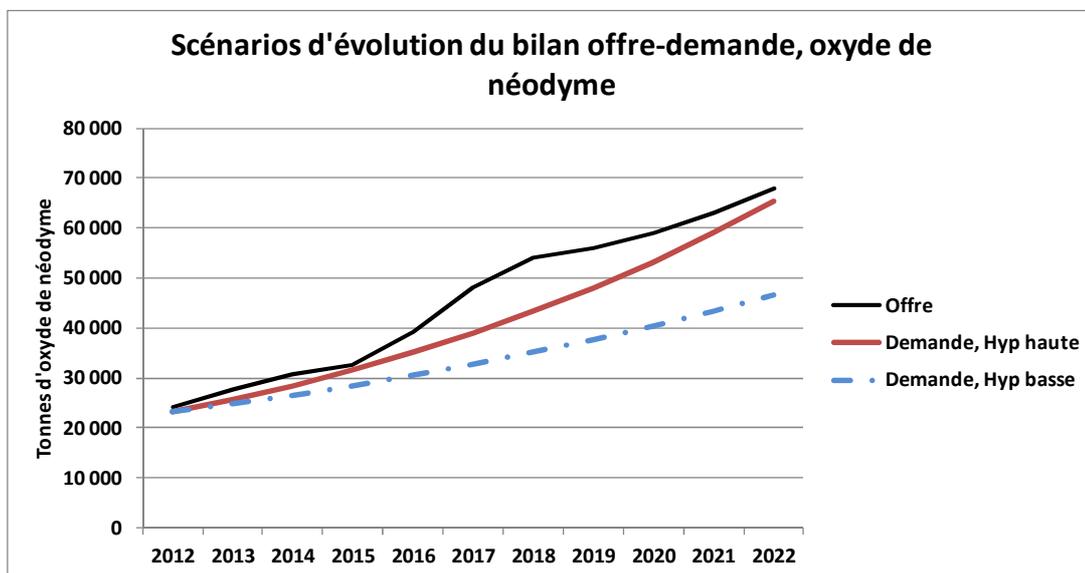


Pour le dysprosium, les projets devant démarrer dans les prochaines années n'apporteront qu'un très faible supplément d'offre, car la proportion de terres rares lourdes dans ces gisements est faible. Ce n'est qu'à partir de 2016-2017 que les démarrages de projets plus riches en terres lourdes apporteraient une offre significative. En 2017, l'offre actuelle serait doublée par les seuls projets non chinois. Les projets qui démarrent à partir de 2018 ont une proportion plus élevée de terres lourdes, et l'offre non chinoise pourrait atteindre un peu plus de 5 000 t en 2022.

5.3 Évolution du bilan offre-demande

Néodyme :

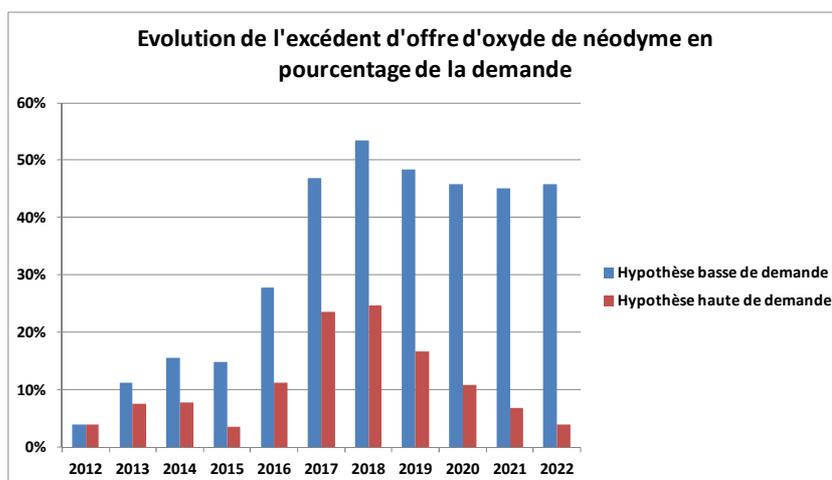
Figure 28 : Scénarios d'évolution du bilan offre-demande pour l'oxyde de néodyme



Les projets non chinois à eux seuls (à production chinoise de néodyme constante) seraient en mesure de faire face à notre hypothèse haute d'accroissement de la demande ; le marché serait assez proche de l'équilibre sur 2012-2015, enregistrerait sur les années 2017-2020 une surcapacité non négligeable, qui se résorberait en fin de période. En cas de demande faible, l'excédent d'offre resterait considérable, et tous les projets envisagés ne seraient pas justifiables par la demande de néodyme.

En 2016, l'excédent d'offre serait de l'ordre de 4 000 t (demande forte) à 8 500 t (demande faible) ; à titre de comparaison [18] prévoit un excédent compris entre 0 et 10 000 t.

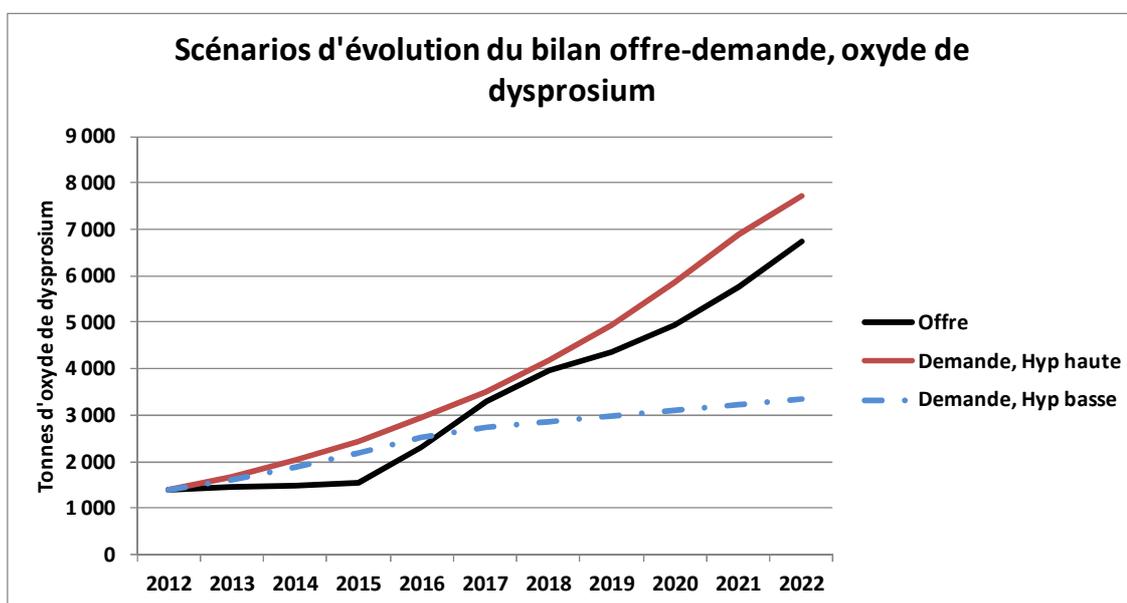
Figure 29 : Évolution de l'excédent d'offre d'oxyde de néodyme, en pourcentage de la demande



Remarque : Étant donné les imprécisions sur les données de départ, le léger excédent sur 2012 pourrait être un léger déficit ; ceci ne change pas les conclusions générales.

Dysprosium :

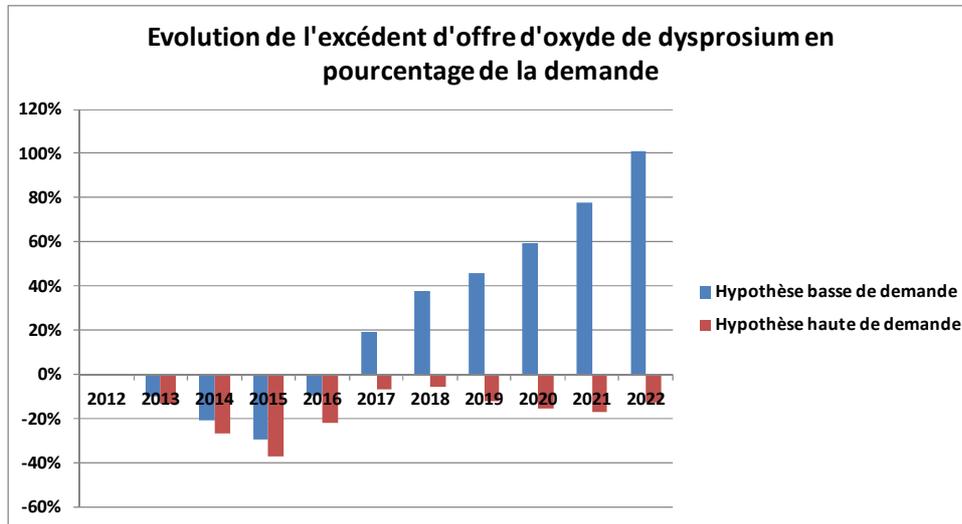
Figure 30 : Scénarios d'évolution du bilan offre-demande pour l'oxyde de dysprosium



À production chinoise de dysprosium constante, l'offre d'oxyde de dysprosium resterait insuffisante jusqu'en 2016, même dans l'hypothèse de croissance basse. Par la suite, dans le cas où la demande serait forte (hypothèse haute), le déficit perdurerait sur toute la période. Pour une demande faible, il y aurait au contraire un excédent d'offre, et tous les projets envisagés ne pourraient pas non plus être justifiés par la demande de dysprosium.

En 2016, le déficit serait compris entre 240 t (demande basse) et 630 t (demande haute). À titre de comparaison [18] prévoit une situation pouvant aller d'un déficit de 500 t à un excédent de 100 t.

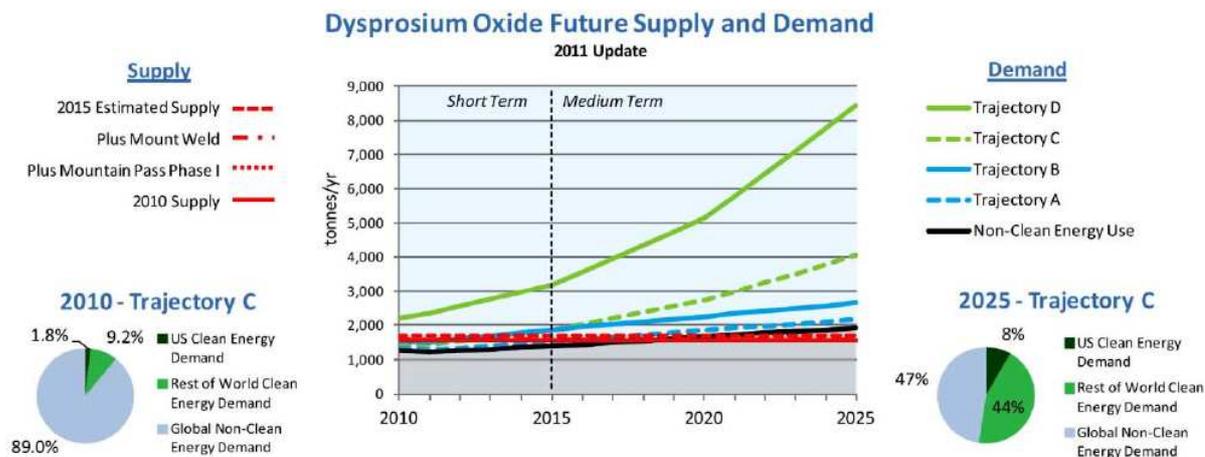
Figure 31 : Évolution de l'excédent d'offre d'oxyde de dysprosium, en pourcentage de la demande



Remarque : Étant donné les imprécisions sur les données de départ, l'année sur 2012 pourrait être en léger déséquilibre (soit excédent, soit déficit) ; ceci ne change pas les conclusions générales.

Le DoE (US Department of Energy) [21], dans son étude sur les matériaux stratégiques, a étudié le cas du dysprosium. Quatre trajectoires de demande ont été étudiées, selon la croissance du marché des aimants et l'évolution de l'intensité d'usage du dysprosium dans les aimants permanents. La trajectoire D (la plus haute) aboutit à une demande d'environ 8 500 t en 2025, la trajectoire la plus basse à une demande d'environ 2 100 t. L'étude fait apparaître le besoin de sources de dysprosium supplémentaires pour des tonnages significatifs et/ou d'évolutions technologiques rapides.

Figure 32 : Étude du US Department of Energy [21] : évolution de l'offre et de la demande d'oxyde de dysprosium



5.4 Autres considérations

Les projets de terres rares sont des projets multimétaux, incluant les diverses terres rares et souvent d'autres minéraux comme le niobium, l'uranium, le zircon, le titane, ... La rentabilité dépend des débouchés et des prix de tous les minéraux extraits, en fonction de leurs proportions récupérables. Compte tenu des teneurs rencontrées, la décision de démarrer de tels projets ne peut pas, le plus souvent, être basée sur un seul élément, sauf dans le cas où les terres rares ne sont qu'un sous-produit d'un autre métal suffisant à lui seul pour justifier l'ouverture d'une exploitation.

La demande des différentes terres rares n'a aucune raison d'être proportionnelle à leur présence dans les gisements.

L'équilibre global entre la demande et l'offre de terres rares est difficile ; par exemple si le lancement de tous les projets nécessaires à satisfaire à la demande de dysprosium conduisait à un excédent de lanthane et de cérium, les prix de ces deux terres rares s'effondreraient, ce qui réduirait la rentabilité des projets comportant une part significative de terres rares légères et compromettrait leur démarrage.

L'évolution de l'offre dépendra donc des équilibres offre-demande de l'ensemble des substances concernées.

5.5 Analyse des scénarios et jeu des acteurs

Néodyme :

Les projets non chinois annoncés, s'ils se réalisent effectivement comme prévu, suffiraient à assurer la croissance du marché du néodyme dans le cas de l'hypothèse haute ; ils conduiraient même à une situation excédentaire dans le cas de l'hypothèse basse, et certains devraient être annulés si les marchés des autres terres rares ne venaient pas compenser la baisse des prix du néodyme qui en résulterait. Les prix du

néodyme pourraient être soumis à des fluctuations conjoncturelles, mais en tendance ne devraient pas croître plus rapidement que l'inflation, et même devraient décroître dans le cas du scénario conduisant à un excédent significatif.

Dysprosium :

Dans chacun de nos scénarios, la période 2012-2016 est critique : sauf effondrement durable de l'économie mondiale, la demande de Dy croîtrait alors qu'aucune nouvelle capacité de production ne verrait le jour hors de Chine ; dans ces conditions :

- soit la Chine ne développe pas suffisamment de capacités supplémentaires, et un déficit global apparaît ;
- soit la Chine pourvoit à la croissance, mais les industriels occidentaux dépendent encore plus des exportations chinoises.

En termes de prix, à moins que la Chine parvienne rapidement à produire significativement plus de dysprosium qu'actuellement, le marché mondial serait déficitaire sur les quatre prochaines années, avec des prix qui augmenteraient rapidement ; si la Chine était capable d'assurer toute cette production supplémentaire, ce qui *a priori* ne semble pas devoir être le cas, elle s'en réserverait sans doute le bénéfice et les prix resteraient élevés pour les acteurs non chinois.

Par la suite, le comportement de la demande est un facteur clé.

- Dans l'hypothèse basse de croissance, les projets hors Chine seraient excédentaires et certains devraient être abandonnés, à moins que d'autres substances présentes dans les gisements étudiés permettent d'assurer la rentabilité des projets ; les prix auraient tendance à redescendre des sommets atteints lors de la période précédente.
- Dans l'hypothèse haute de croissance la mise en production des projets annoncés hors de Chine, encouragée par le niveau des prix du dysprosium, conduirait à une situation légèrement déficitaire ; les prix resteraient à un niveau élevé ; le déficit devrait être comblé soit par d'autres projets hors de Chine, soit par une augmentation de la production chinoise, soit par des évolutions technologiques réduisant l'intensité du besoin en dysprosium.

Les acteurs engagés dans des projets sur des gisements, dont la proportion de terres rares lourdes est élevée, insistent sur le déficit de dysprosium à venir et les prix élevés qui leur permettront de rentabiliser leurs investissements ; mais inversement ces mêmes facteurs, anticipés par les consommateurs d'oxyde de dysprosium, accélèrent les recherches destinées à en réduire le taux d'utilisation (voir § 2.6). Il est donc probable que certains projets actuellement au début de leur développement doivent être annulés ou reportés ; les premiers à entrer en service auront l'avantage.

Aimants et produits finals : Indépendamment de la disponibilité en néodyme et dysprosium, il faut noter que la grande majorité des aimants est produite en Chine (79 % en 2011), et que la consommation finale croît également beaucoup plus rapidement en Chine : production d'alternateurs pour éoliennes et installation

d'éoliennes, production et achat de deux-roues électriques et de véhicules automobiles, etc. Une partie de la croissance de la production de néodyme et de dysprosium hors de Chine ira finalement approvisionner l'industrie chinoise.

5.6 Pistes pour anticiper les risques de pénurie / tension sur les prix

Néodyme : les risques de pénurie globale apparaissent faibles, mais la Chine restera un acteur important de la production et de la consommation de néodyme ; ses décisions de politique industrielle et le rythme de sa croissance impacteront inévitablement le marché global. À titre de précaution, les acteurs français et européens devraient s'assurer que leur développement dans les secteurs utilisateurs de néodyme est couvert par des contrats d'approvisionnement avec des acteurs dont les ressources et les usines sont situées hors de Chine ; par ailleurs, le recyclage des aimants permanents, source secondaire principale de néodyme, devrait être encouragé.

Dysprosium : le risque de pénurie est bien présent à court et moyen terme, sauf effondrement général de l'économie mondiale : les acteurs français et européens utilisant des aimants permanents incorporant du dysprosium devraient s'assurer que des stocks sont constitués chez eux ou chez leurs fournisseurs, et que des contrats d'approvisionnement solides couvrent leurs besoins futurs.

L'offre prévisible ne pourra pas répondre aux besoins qui correspondraient à une croissance forte des véhicules hybrides et électriques et des éoliennes, basée sur des technologies d'aimants permanents à fort taux de dysprosium. Les recherches et développements visant à réduire le taux de dysprosium (recherches sur les matériaux, recherches pour réduire les températures d'utilisation) dans les aimants permanents, ou à réduire le besoin en aimants permanents (nouvelles générations de moteurs / alternateurs) doivent être poursuivies activement.

Le recyclage des aimants permanents est une piste à suivre, mais, compte tenu du taux de croissance de la demande de dysprosium et de la durée de vie des équipements qui contiennent des masses importantes d'aimants, il ne pourra représenter qu'un appoint intéressant mais mineur de dysprosium.

Les acteurs de la production en France et en Europe devraient nouer des partenariats et conclure des accords d'approvisionnement visant à améliorer leur contrôle sur la chaîne de production des aimants NdFeB, avec des sociétés prévoyant d'ouvrir des mines de terres rares lourdes, des sociétés de séparation comme Rhodia, et des producteurs d'aimants.

-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-

Bibliographie

- [1] « Panorama 2010 du marché des terres rares », Rapport final BRGM/RP-60583-FR, Avril 2010
- [2] « Rare Earth Elements », BGS Profile, British Geological Survey , November 2011
- [3] « Rare Earths », Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey, January 2012
http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/mcs-2012-raree.pdf
- [4] « World Mineral production 2006-2010 », British Geological Survey, 2012
- [5] « Special Situation – June 2012 Update – Greenland Minerals and Energy Ltd », Rare Earths Elements Letter International, June 2012
- [6] Lifton, J., « The only five rare earth elements that matter », The Critical Metals Report, June 19, 2012
- [7] « Terres rares », site de la Société Chimique de France www.sociétéchimiquedeFrance.fr
- [8] Site de Lynas Corporation, www.lynascorp.com
- [9] Kingsnorth, D.J., « Meeting the Challenges of Supply this Decade », Industrial Minerals Company of Australia, March 2011
- [10] Great Western Minerals Group Ltd, Presentation, May 23, 2012
- [11] Rijkers, D., cité dans « Heavy rare earths – The 16 most advanced projects », www.raremetalblog.com, February 23, 2012
- [12] Alkane Resources, « Dubbo Project », REE World's Technology Metals Summit, Toronto, February 1-2, 2012
- [13] Alkane Resources, « Dubbo Zirconia Project », Dubbo Community Meeting, 10 July 2012
- [14] Tasman Metals Ltd, Corporate presentation, May 2012
- [15] Gareth, H., « 2012 Chinese Rare Earth Export Quotas Updated », www.resourceinvestor.com, May 18, 2012
- [16] Constantinides, S., « Rare Earth Materials Update – May 2011 », SMMA conference, May 10-12, 2011
- [17] Constantinides, S., « Help Needed for Clean Energy Initiatives », Rare Earth Science Community, RERC 2011, June 2011

- [18] Kingsnorth, D.J., « The Global rare Earths Industry: A Delicate Balancing Act », Deutsche Rohstoffagentur, Berlin, 16th April 2012
- [19] Rare Element Resources Ltd, « Technical Report: Preliminary Economic Assessment of the Bear Lodge Rare-Earths Project », November 2010
- [20] Hastings Rare Metals Limited, « Supplying Heavy Rare Earths for New Technologies », Investor Presentation, June 2012
- [21] US Department of Energy, « Critical materials Strategy », December 2011
- [22] Roskill Information Services, « Global Drivers for rare earth demand », August 2012
- [23] Arnold Magnetic Technologies, « The Important Role of Dysprosium in Modern Permanent Magnets », January 17, 2012

PLATINE (Pt)

24 juin 2012

Avertissement : la présente note est rédigée dans le cadre d'une étude précise, elle ne prétend donc en aucun cas à l'exhaustivité.

Résumé :

La consommation mondiale de platine est estimée à environ 8 095 000 Oz (soit environ 252 t) par an. En 2011, l'utilisation pour la catalyse automobile représente 38 % de la demande, la joaillerie 31 %, les applications industrielles 25 % et l'investissement physique 6 %.

Le platine est en concurrence avec le palladium pour la catalyse automobile, et avec l'or pour la joaillerie et l'investissement physique. Les prix relatifs de ces métaux peuvent jouer sur le niveau de la demande. Au cours des dernières années, on a ainsi constaté un recul rapide de la part du platine dans la catalyse automobile, au profit du palladium moins cher. La quantité de platine utilisée par pot catalytique est faible (0 à 4 g), mais le prix du platine est élevé : autour de 1400-1500 \$/Oz actuellement.

La production minière est fortement concentrée sur l'Afrique du Sud, qui extrait presque les deux tiers du platine mondial. La Russie est le second pays producteur avec 14 % de la production. L'offre est complétée par le recyclage (25 % de la demande en 2011).

L'Europe comporte plusieurs opérateurs spécialisés dans le recyclage du platine et l'imprégnation des pots catalytiques ; la vulnérabilité réside dans l'approvisionnement en platine.

Les producteurs sud-africains sont confrontés à de nombreux problèmes de production et de renchérissement de leurs coûts ; les investissements de capacité rentables dans la situation actuelle sont insuffisants pour assurer le renouvellement de la capacité de production, et on peut prévoir un pic de la production minière, résultant non point d'un épuisement des ressources géologiques mais du manque d'investissement.

La demande de platine pour la catalyse automobile ne devrait croître que lentement en raison de la concurrence du palladium, qui apparaît maintenant aussi bien sur les motorisations essence que Diesel. La demande pour la joaillerie est difficile à prévoir : effet de mode, influence du rapport de prix entre l'or et le platine.

Le scénario de base de notre étude prévoit un léger excédent de capacité de production sur plusieurs années, les producteurs adaptant leur production réelle pour obtenir une augmentation régulière des prix du platine, puis un risque d'insuffisance de la production minière à l'horizon de plusieurs années, avec des prix augmentant plus brutalement à l'approche de ce point.

Toutefois, la situation pourrait devenir critique plus rapidement si la production sud-africaine s'enfonçait durablement dans des difficultés encore plus sérieuses : il en résulterait une forte augmentation des prix à court terme, qui provoquerait une accélération de la substitution du platine dans la catalyse automobile.

Afin de réduire les risques, les pistes suivantes peuvent être proposées :

- Poursuivre les efforts de recherche-développement pour réduire la quantité de platine par pot catalytique nécessaire pour atteindre les objectifs de contrôle des émissions des véhicules, ainsi que pour les piles à combustible sans platine ;
- Améliorer encore la récupération et le recyclage de platine dans les VHU et DEEE ;
- Pour les acteurs s'approvisionnant en platine, participer à des projets d'extension ou de développement de nouveaux gisements (le dernier point est toutefois une action qui ne porterait ses fruits qu'à long terme) avec des contrats garantissant des volumes.

1- Demande : produits et utilisations

Le platine fait partie d'un groupe de six métaux, appelés platinoïdes, qui sont souvent associés dans les gisements : platine, palladium, rhodium, osmium, ruthénium, iridium.

Comme pour les autres métaux précieux (or, argent), l'unité de masse utilisée couramment pour le platine et les platinoïdes n'est pas le kilogramme, mais l'**Once Troy**, abréviation Oz, qui est égale à 31,1034768 g. Inversement $1 \text{ kg} = 32,150747 \text{ Oz}$.

Nous utiliserons également l'abréviation kOz, $1\text{kOz} = 1\,000 \text{ Oz} = 31,1034768 \text{ kg}$.

1.1 Produits intermédiaires

Le platine est extrait, aux côtés des autres platinoïdes, dans des mines à ciel ouvert ou souterraines :

- soit de gisements de platinoïdes (d'autres métaux pouvant être obtenus comme sous-produits) : c'est le cas de l'Afrique du Sud, dans la zone du Bushveld,
- soit de gisements de nickel ou de cuivre, dont il est alors un sous-produit : c'est le cas de la Russie, du Canada.

La première étape après extraction du minerai est l'obtention d'un concentré plus riche en métaux que le minerai brut par élimination, des minéraux stériles (par exemple par flottation, voir annexe 1). Ce concentré peut être transformé par le mineur ou vendu pour être traité par un autre acteur.

Le procédé combinant pyrométallurgie et hydrométallurgie qui conduit aux platinoïdes et aux métaux de base associés dans le gisement (nickel, cuivre par exemple) dépend du minerai, qui peut en particulier être du type pauvre en sulfures (minerais sud-africains UG2 et Merensky Reef) ou riche en sulfures (minerai de Norilsk, riche en nickel et cuivre).

Le platine est également récupéré dans les filières de recyclage des pots catalytiques, des DEEE, de la joaillerie.

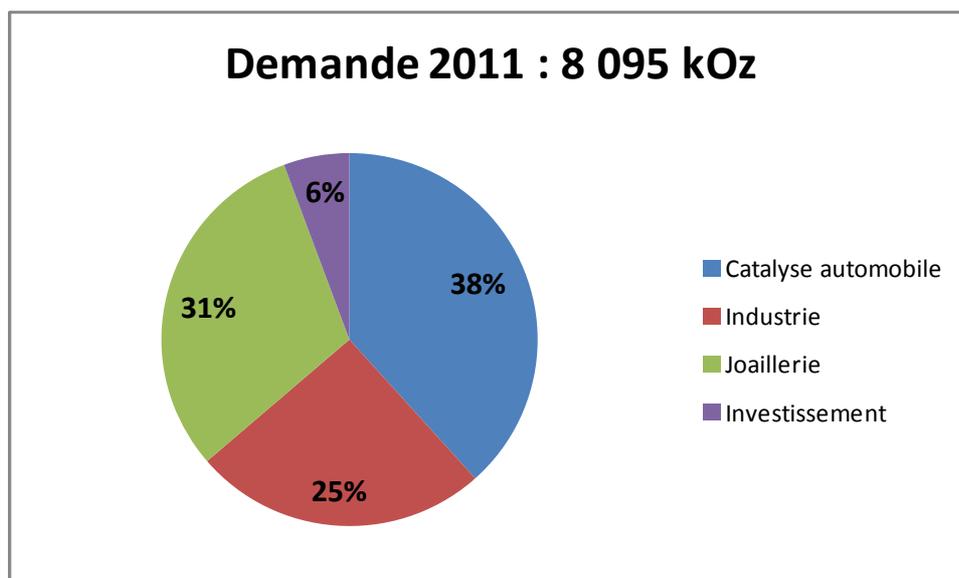
Le platine est vendu sous différentes formes : brutes (minerai, concentré, poudre) ou produits semi-finis : lingot, fil, grille, produits chimiques.

1.2 Utilisations finales

La demande de platine est répartie entre la catalyse pour l'automobile, l'industrie, la joaillerie et les investisseurs (investissement physique : lingots, pièces, ETF).

Figure 1 : Répartition de la demande mondiale par secteurs (source : [1])

kOz	2010	2011	% du total 2011	% var 2011-2010
Catalyse automobile	3 075	3 105	38%	1,0%
Industrie	1 755	2 050	25%	16,8%
Joaillerie	2 420	2 480	31%	2,5%
Investissement	655	460	6%	-29,8%
TOTAL	7 905	8 095	100%	2,4%



La catalyse automobile peut être décomposée en trois segments :

- Véhicules essence (platine, palladium, rhodium) ;
- Véhicules légers et petits utilitaires Diesel (platine, palladium) ;
- Véhicules lourds Diesel (essentiellement platine).

Les catalyseurs utilisés dans l'automobile contiennent du platine, du palladium et du rhodium, en proportions dépendant du type de moteur, des performances recherchées, de la qualité du carburant, du prix relatif de ces métaux précieux ou d'éventuels problèmes d'approvisionnement, des choix du constructeur pour un modèle donné.

Il y a au maximum quelques grammes de platine par catalyseur (voir ci-après).

Les catalyseurs au platine sont aussi utilisés sur les autres moteurs Diesel : générateurs, matériel roulant non destiné à circuler sur les routes.

Dans les applications industrielles, on peut citer :

- La catalyse dans l'industrie pétrochimique : usines de raffinage ;
- Chimie : la catalyse pour la production de silicones, de paraxylène (précurseur du PET utilisé dans l'emballage et les bouteilles en plastique, et du polyester), d'acide nitrique (matière première en particulier des engrais azotés) ;
- La production de verre, en particulier pour les écrans LCD (cuves de fusion), les fibres de verre (filières en platine rhodium) ;
- Électricité/électronique : disques durs informatiques ; contacts électriques ;
- Une application susceptible de se développer : les piles à combustible.

Pour la demande en joaillerie, la Chine est de loin le marché principal (plus de 2/3 de la demande du secteur).

L'Europe et la Chine sont les deux plus grosses régions consommatrices de platine.

Figure 2 : Décomposition de la demande de platine en 2011 par région et par secteur industriel ([1])

kOz, demande 2011	Europe	Japon	Amérique du Nord	Chine	Reste du monde	Total par secteur
Catalyse Auto	1 465	500	380	110	650	3 105
Industrie, dont :	400	265	385	230	770	2 050
<i>Chimie</i>	120	30	95	105	120	470
<i>Electricité/électronique</i>	20	25	25	30	130	230
<i>Verre</i>	30	140	-5	40	350	555
<i>Pétrochimie</i>	35	5	50	15	105	210
<i>Médical</i>	90	20	90	10	20	230
<i>Autres</i>	105	45	130	30	45	355
Joaillerie	175	315	185	1 680	125	2 480
Investissements	155	250	10	0	45	460
Total par zone	2 195	1 330	960	2 020	1 590	8 095

1.3 Données chiffrées sur l'utilisation du platine dans la filière automobile

Échappement : en 2010, la production mondiale a été de 58 478 810 véhicules particuliers et 19 378 895 véhicules utilitaires, soit un total de 77 857 705 [11]. En divisant de façon très abrupte la consommation de platine pour la catalyse automobile en 2010 (3 075 kOz soit 95 641 000 g) par le nombre de véhicules construits, on obtient une « moyenne » de 1,23 g de platine par véhicule. Ce chiffre n'est qu'indicatif car il se réfère à l'ensemble des véhicules automobiles construits, alors que tous n'utilisent pas un catalyseur au platine. En croisant les statistiques de production de véhicules du CCFA [11] et la consommation de platine pour la catalyse automobile par zone [1], on voit que la situation est assez diverse :

Figure 3 : Platine utilisé par véhicule selon la zone de production, année 2010 (calcul à partir des sources [1] et [11])

2010	Europe	Japon	Amérique du Nord	Chine	Reste du monde	Total
Pt pour Catalyse Auto, kOz	1 495	550	405	100	525	3 075
Production véhicules (milliers)	19 823	9 626	12 178	18 265	17 966	77 858
Voitures particulières	17 266	8 307	5 090	13 897	13 919	58 479
Véhicules utilitaires	2 557	1 319	7 087	4 368	4 048	19 379
Grammes de platine par véhicule	2,3	1,8	1,0	0,2	0,9	1,2

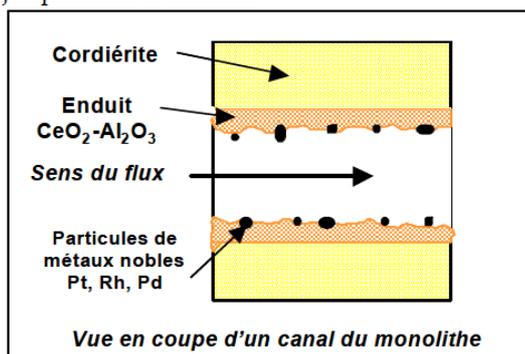
Platine et palladium sont utilisés concurremment pour les moteurs à essence (avec du rhodium dans les catalyseurs trois voies). Pour les moteurs Diesel le platine a longtemps été la seule solution, mais les nouvelles technologies permettent de le remplacer à hauteur de 25 %, voire 50 %, par du palladium.

Le principe du catalyseur trois voies (oxydation du monoxyde de carbone, oxydation des hydrocarbures, réduction des oxydes d'azote) pour les moteurs à essence est le suivant :

Figure 4 : Le principe du pot catalytique « 3 voies » (source : [10])

La solution pour le moteur à essence : le pot catalytique "3-voies"

Le pot catalytique est inséré dans la ligne d'échappement entre le moteur et le silencieux. Le catalyseur est constitué d'un ou deux pains de monolithes en céramique (cordiérite : silico-aluminate de magnésium) pouvant résister jusqu'à 1350°C environ.



Le monolithe est alvéolé, en forme de "nid d'abeille" avec 50 à 70 canaux par cm². La paroi de ces canaux est d'abord enduite d'un oxyde poreux de haute surface (100 m²/g) constitué d'alumine stabilisée (Ba, La,...), contenant en outre un oxyde de terre rare (cérine) capable de stocker des quantités importantes d'oxygène. Enfin, on dépose à la surface de la couche d'enduction la phase active constituée de métaux nobles (Pt, Rh, Pd) très finement divisés (nanoparticules de 1 à 2 nm dans le catalyseur neuf, de 20 à 40 nm dans le catalyseur usé). Le platine est l'élément actif dans les réactions d'oxydation (CO en CO₂ et les hydrocarbures en CO₂ et eau) tandis que le rhodium est nécessaire pour la réduction des oxydes d'azote (NO, NO₂) en N₂.

Pour les moteurs Diesel, on se contente généralement de catalyseurs d'oxydation (à base de platine et de palladium), qui oxydent le CO et les hydrocarbures mais ne réduisent pas les oxydes d'azote. Sur certains modèles on rajoute un catalyseur à NOx/DeNOx et un filtre à particules.

L'étude ADEME de juillet 2010 [19] produit un tableau détaillant la masse de platinoïdes par pot catalytique, en fonction de la motorisation et de la norme européenne.

Figure 5 : Masse de platinoïdes par pot catalytique [19]

Norme	Véhicules essence					Véhicules diesel	
	Cylindrée	g/véhicule				Cylindrée	g/véhicule Pt
		Pt	Pd	Rh	Total		
G-Cat 87-90	< 1,4 l	0,95	0,00	0,19	1,14		
	1,4 - 2 l	1,43	0,00	0,29	1,72	< 2 l	
	> 2 l	2,09	0,00	0,43	2,52	> 2 l	
Euro I	< 1,4 l	0,95	0,00	0,19	1,14		
	1,4 - 2 l	1,71	0,00	0,33	2,04	< 2 l	
	> 2 l	2,76	0,00	0,57	3,33	> 2 l	
Euro II	< 1,4 l	0,29	1,14	0,19	1,62		
	1,4 - 2 l	0,38	2,00	0,29	2,67	< 2 l	1,43
	> 2 l	2,09	3,04	0,67	5,80	> 2 l	4,28
Euro III	< 1,4 l	0,10	2,47	0,29	2,86		
	1,4 - 2 l	0,48	2,76	0,29	3,53	< 2 l	4,09
	> 2 l	0,57	3,71	0,67	4,95	> 2 l	8,55
Euro IV	< 1,4 l	0,57	0,95	0,29	1,81		
	1,4 - 2 l	0,67	2,85	0,48	4,00	< 2 l	4,75
	> 2 l	0,48	4,75	0,67	5,90	> 2 l	8,55

La quantité de platine par pot est faible par rapport à la masse du véhicule, de l'ordre de quelques grammes. Mais avec un cours de l'ordre de 1 500 US\$/Oz, 1 g de platine représente 48 US\$ soit environ 39 €. Pour un véhicule Diesel avec 4 g de platine, le coût du platine par véhicule représente donc 156 €. Les recherches de réduction du coût du pot catalytique conduisent à réduire la quantité globale de métaux précieux utilisée dans le pot, et chaque fois que possible à substituer au moins partiellement le platine par le palladium.

Les principaux producteurs de catalyseurs automobiles à base de platine et autres platinoïdes (palladium, rhodium) sont Johnson Matthey (Royaume-Uni), BASF Catalysts (Allemagne), Umicore Automotive Catalysts (maison mère en Belgique), Cataler (Japon).

Le platine est également un constituant des sondes à oxygène qui permettent de piloter les performances du moteur et la composition des gaz émis.

Allumage : Le platine (ainsi qu'un autre platinoïde, l'iridium) est également utilisé pour augmenter la longévité des bougies d'allumage. Les volumes sont faibles.

2- Offre mondiale

2.1 Volume de production primaire

Les statistiques USGS [3] indiquent un volume de production minière de l'ordre de 192 t/an sur 2010 et 2011, soit environ 6 200 kOz. Les statistiques BGS [4] (pour 2010) sont du même ordre de grandeur.

La production minière en Amérique du Nord a augmenté en 2011, suite à une grève en 2010, et a baissé en République sud-africaine (RSA). La production dans ce dernier pays, qui est de loin le premier producteur mondial de platine, est perturbée par des arrêts de mines par les autorités pour des raisons de sécurité, des grèves, et des coûts en forte augmentation.

2.2 Répartition géographique de la production minière de platine

La répartition de la production minière donnée par [3] montre que la République sud-africaine (RSA) produit plus de 72 % du platine extrait mondialement, suivie de loin par la Russie.

Figure 6 : Production minière par pays [3]

Production minière kOz	2010	2011	% total 2011	Var 2011- 2010
Afrique du Sud	4 758	4 469	72,5%	-6,1%
Russie	807	836	13,6%	3,6%
Amérique du Nord	236	440	7,1%	86,4%
Zimbabwe	283	302	4,9%	6,7%
Autres	106	113	1,8%	6,6%
Total	6 190	6 160	100,0%	-0,5%

Jonhson Matthey [1] présente des chiffres de vente des compagnies productrices, qui correspondent à la somme de la production et du déstockage :

Figure 7 : Ventes des producteurs primaires par pays [1]

Ventes des producteurs primaires kOz	2010	2011
Afrique du Sud	4 635	4 855
Russie	825	835
Amérique du Nord	200	350
Zimbabwe	280	340
Autres	110	100
Total	6 050	6 480

On voit que, bien que la production minière de la RSA ait baissé en 2011, les ventes ont augmenté car les producteurs ont pu vendre du produit qu'ils avaient en stock ou dans le circuit de production ; cet effet ne se reproduira pas en 2012, année dont le début est encore perturbé alors que les stocks ont été utilisés en 2011.

2.3 Les trois principaux producteurs

- **Anglo-American Platinum (Amplats)** : production 2011 de platine raffiné : **2 530 kOz** dont 1 943 kOz à partir du minerai extrait des mines propres, et 587 à partir d'achats de concentrés à des associés ou des tiers [6].
- **Impala Platinum (Implats)** : production de platine raffiné, année fiscale 2011¹² : **1 836 kOz** [7].
- **Lonmin (Lonplats)** : production de platine raffiné, année fiscale 2011¹³ : **731 kOz** [8] ; grâce à la montée en puissance de nouveaux puits, la société vise 750 kOz en 2012 et à terme 950 kOz/an [1].

Les producteurs suivants sont : **Norilsk Nickel** (Russie et petite production au Botswana : Tati Nickel et en Finlande), 667 kOz de platine vendues en 2011 [17] ; **Aquarius Platinum** (RSA) : production (Pt dans les concentrés) attribuable en 2011 : 277 kOz [24] ; **Northam** (RSA), 197 kOz vendues en 2011 [12].

Xstrata détient 24,6 % de Lonmin et exploite deux mines de platine en RSA : Eland, détenue à 74 % et sur laquelle des extensions souterraines sont prévues, et Mototolo (JV 50/50 avec Amplats).

Le plus important producteur de platinoïdes en Amérique du Nord est **Stillwater Mining Company** : production 2011 de 119 kOz de platine dans ses deux mines du Montana [9].

2.4 Recyclage

Le recyclage du platine est une part importante de l'offre finale. Le recyclage dont on parle ici est celui où le métal est récupéré, raffiné et revendu sur le marché ; il ne comprend pas les cas de réutilisation au sein du procédé de l'acheteur du métal.

En 2011 le recyclage a représenté 2 050 kOz [1], une augmentation de 12 % par rapport à 2010, s'expliquant par la forte augmentation du volume récupéré dans les catalyseurs automobiles en fin de vie. Il représente donc le tiers de la production primaire.

Figure 8 : Recyclage du platine [1]

Recyclage, kOz	2010	2011	% var 2011- 2010
Catalyse auto	1 085	1 225	12,9%
Electricité/électronique	10	10	0,0%
Joaillerie	735	810	10,2%
Total	1 830	2 045	11,7%

¹² Année finissant le 30/6/2011

¹³ Année finissant le 30/9/2011

La forte augmentation du recyclage de catalyseurs auto en 2011 provient du redémarrage des ventes de véhicules neufs, en particulier en Amérique du Nord, à la sortie de crise ; à cette occasion le nombre de véhicules retirés du marché a augmenté ; les véhicules déconstruits en 2011 avaient été vendus au cours des années 1996-2007 pour la moitié d'entre eux.

En France, la grande majorité des pots catalytiques récupérés proviennent de la filière VHU¹⁴, et une petite proportion du remplacement de pots hors d'usage sur des véhicules du parc. Les directives européennes imposent un taux minimal de récupération et de recyclage des VHU.

Le recyclage du platine des appareils électroniques reste faible, en raison de la difficulté à récupérer de très petites quantités de platine dispersées dans la masse à traiter.

Les entreprises spécialisées dans le recyclage du platine sont les acteurs de la catalyse cités plus haut : Johson Matthey, BASF, Umicore, à côté desquelles on trouve des fonderies. Aux USA, Stillwater Mining Company effectue du recyclage dans son usine de raffinage, en parallèle avec le traitement de ses concentrés (production de platinoïdes issus du recyclage en 2011 [23] : Palladium 271,3 kOz ; platine : 180,3 kOz ; rhodium : 35,1 kOz).

2.5 Bilan offre-demande

L'offre totale de platine raffiné est la somme des ventes des producteurs primaires et du recyclage.

Figure 9 : Bilan offre-demande de platine, 2010 et 2011 (d'après [1])

Bilan offre-demande (kOz)	2010	2011	% demande 2011
Ventes des producteurs primaires	6 050	6 480	80,0%
Recyclage	1 830	2 045	25,3%
Total de l'offre	7 880	8 525	105,3%
Demande	7 905	8 095	100,0%
Variation de stocks	(25)	430	5,3%

En 2011, le marché a évolué vers un léger excédent d'offres, les stocks dans la chaîne de valeur (hors producteurs primaires, hors consommateur final) ont augmenté de 430 kOz, soit 5,3 % de la demande, ou un peu moins de 3 semaines de consommation.

¹⁴ Véhicules Hors d'Usage.

2.6 Substitution

Étant donné le prix du platine, il n'est *a priori* utilisé dans l'industrie que lorsque c'est la seule solution pour un niveau de performance donné à atteindre. Toutefois, les recherches de réduction de coûts peuvent conduire à l'émergence de solutions alternatives.

C'est le cas des moteurs Diesel pour véhicules légers et petits utilitaires, où le palladium a pris une part du marché auparavant entièrement dévolu au platine. Dans les moteurs à essence, le palladium est utilisé en plus grande quantité que le platine ; toutefois dans les régions où la qualité du carburant est variable (ex. Asie), on peut préférer le platine car il tolère mieux la présence de soufre. Selon [9], l'évolution depuis 2007 est la suivante :

Part du palladium dans la demande de platinoïdes pour les pots catalytiques	Moteurs essence (Pt, Pd, Rh)	Diesel « Light Duty » (Pt, Pd)
2007	70 %	2 %
2009	80 %	5 %
2011	85 %	20 %

Le périmètre auquel correspondent ces chiffres n'est pas précisé, mais ils indiquent bien la tendance et les possibilités techniques.

Le croisement des données de production de véhicules et de consommation pour les pots catalytiques révèle une forte disparité entre grandes régions du monde.

Figure 10 : Quantités comparées de platine et de palladium utilisées pour la catalyse automobile, par région, en 2010 (calcul à partir de [1] et [11])

2010	Europe	Japon	Amérique du Nord	Chine	Reste du monde	Total Monde
Pt pour Catalyse Auto, kOz	1 495	550	405	100	525	3 075
Pd pour Catalyse Auto, kOz	1 330	820	1 355	1 005	1 070	5 580
Production de véhicules (milliers)	19 823	9 626	12 178	18 265	17 966	77 858
Voitures particulières	17 266	8 307	5 090	13 897	13 919	58 479
Véhicules utilitaires	2 557	1 319	7 087	4 368	4 048	19 379
Grammes de platine par véhicule	2,3	1,8	1,0	0,2	0,9	1,2
Grammes de palladium par véhicule	2,1	2,6	3,5	1,7	1,9	2,2
Rapport palladium/platine	0,91	1,44	3,50	8,50	2,11	1,83

Globalement, le palladium est donc largement plus utilisé que le platine, l'Europe étant la région où le platine est en proportion plus élevée.

L'évolution a été rapide ces dernières années. Le même tableau établi pour l'année 2007 montre qu'en 3 ans le taux moyen mondial de platine par véhicule produit a diminué de 1,8 à 1,2 g/t et le taux moyen de palladium augmenté de 1,9 g/t à 2,2 g/t.

Alors que la production de véhicules était plus importante de 6,3 % en 2010 qu'en 2007, la consommation de platine pour catalyse automobile baissait de 25,8 % et la consommation de palladium croissait de 22,8 %. Le rapport palladium/platine est passé de 1,06 à 1,83.

Figure 11 : Quantités comparées de platine et de palladium utilisées pour la catalyse automobile, par région, en 2007(calcul à partir de [1] et [11])

2007	Europe	Japon	Amérique du Nord	Chine	Reste du monde	Total Monde
Pt pour Catalyse Auto, kOz	2 055	610	850	175	455	4 145
Pd pour Catalyse Auto, kOz	920	820	1 695	325	785	4 545
Production de véhicules (milliers)	22 853	11 597	15 454	8 882	14 479	73 266
Voitures particulières	19 331	9 945	6 475	6 381	11 069	53 201
Véhicules utilitaires	3 522	1 652	8 979	2 501	3 410	20 065
Grammes de platine par véhicule	2,8	1,6	1,7	0,6	1,0	1,8
Grammes de palladium par véhicule	1,3	2,2	3,4	1,1	1,7	1,9
Rapport palladium/platine	0,46	1,38	2,00	1,83	1,70	1,06

En 2011, la demande de platine de ce secteur a été pratiquement stable en volume (3 105 kOz en 2011 pour 3 075 en 2010), alors que celle de palladium augmentait encore fortement : 6 030 kOz en 2011 pour 5 580 en 2010 soit + 8 %) : la tendance favorable au palladium par rapport au platine s'est donc poursuivie.

Dans la joaillerie et l'investissement physique, le platine est en concurrence avec les autres métaux précieux, comme l'or. Des effets de mode peuvent intervenir. Les prix relatifs et leurs perspectives d'évolution orientent aussi la demande.

2.7 Évolution des prix

Le platine est coté sur les bourses de métaux précieux. Au 1^{er} juin 2012, son prix était de 1 431,70 US\$/Oz (soit environ 46 000 US\$/kg).

Figure 12 : Évolution du cours du platine du 4 janvier 2002 au 1er juin 2012 (source : site infomine.com)



À la même date le cours du palladium était de 613,50 US\$/Oz. Étant donné que le palladium peut être substitué au platine dans certaines applications de la catalyse auto, il est intéressant de voir l'évolution comparée des cours de ces deux métaux :

Figure 13 : Évolution comparée des cours du platine (échelle de gauche) et du palladium (échelle de droite) (source : site infomine.com)



3- Contraintes sur l'offre et projets de développement

3.1 Réserves et ressources mondiales, répartition

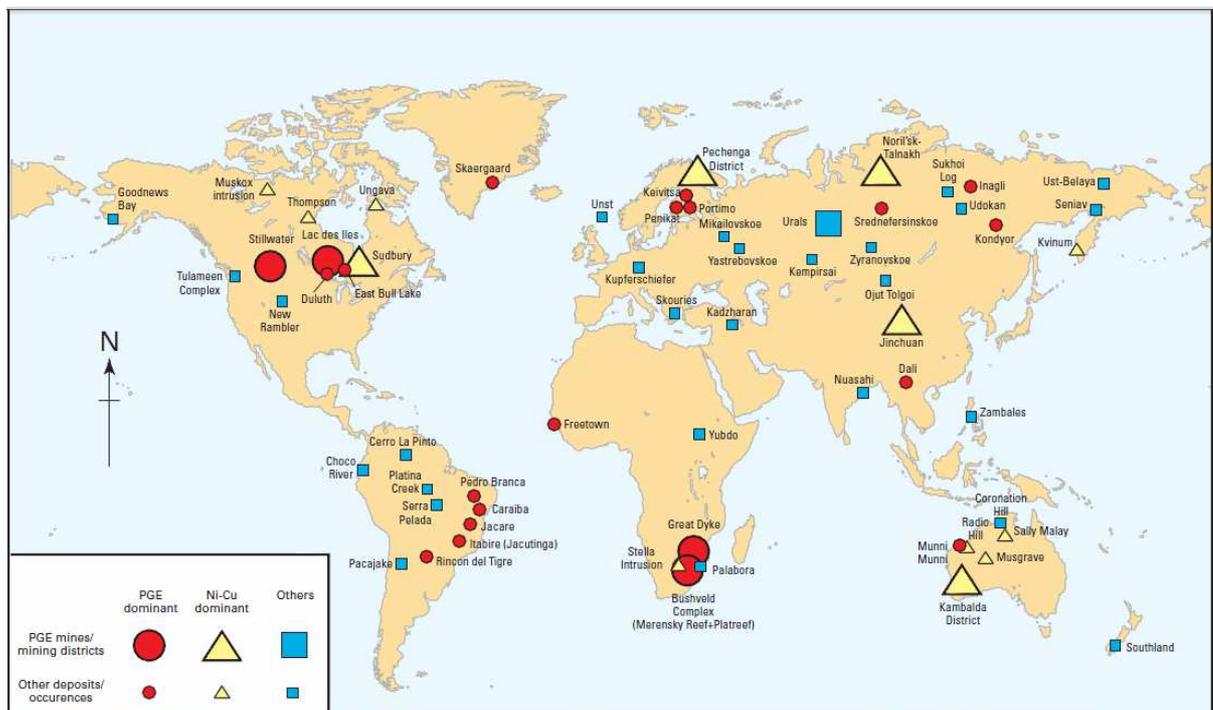
L'USGS [3] estime les réserves mondiales de platinoïdes à 66 Millions de kg, soit 2 122 MOz, dont 95 % en RSA, et les ressources à plus de 3 200 MOz.

Les ressources sud-africaines du district du Bushveld sont considérables, et par là même difficiles à estimer. Une étude citée par [5] estime les réserves prouvées et probables à 204 MOz de platine, et les ressources potentielles à 937 MOz, en se limitant à trois secteurs du Bushveld et à une profondeur de 2 km, alors que des mines commencent à exploiter des gisements situés à plus de 2 km (Northam). Les seules réserves citées permettraient donc d'assurer la production mondiale actuelle sur plus de 30 ans.

D'autres ressources importantes sont situées au Zimbabwe, dans le complexe de Stillwater aux USA, et dans des gisements de nickel-cuivre, au Canada (zone de Sudbury) et en Russie (district de Noril'sk-Talnakh : réserves prouvées et probables de 16 MOz, auxquelles s'ajoutent des ressources mesurées et indiquées de 38 MOz [17]).

Par ailleurs, l'augmentation des prix du platine (voir § 2.6) a amélioré l'intérêt économique de gisements situés au Groenland, aux USA (Duluth), en Finlande (Penikat, Keivista).

Figure 14 : Situation des districts miniers et gisements [5] (PGE = Éléments du groupe du platine)



3.2 Projets miniers

La production sera donc éventuellement limitée non point par une raréfaction physique des réserves, mais par les capacités de production mises en œuvre.

La situation politique et sociale en RSA et au Zimbabwe fait que sur les dernières années les mines se heurtent à de plus en plus de contraintes et de perturbations, dues aux exigences croissantes de l'environnement politique et social, et tournent en deçà de leur capacité ; par ailleurs l'évolution des conditions techniques d'exploitation de certaines mines en RSA (approfondissement, baisse des teneurs) et les augmentations du prix de l'électricité et des salaires conduisent à l'augmentation rapide de leurs coûts de production, et réduisent la rentabilité future des projets. La réévaluation constante du rand par rapport au dollar vient encore dégrader les rentabilités des opérateurs sud-africains.

Les producteurs ont des projets d'ouverture de nouveaux sièges d'exploitation sur les sites existants, pour remplacer les sièges épuisés ou devenus non rentables, ou pour développer leur production, ou de démarrage de nouvelles mines sur des sites vierges (greenfield). Parallèlement de nouveaux entrants (souvent canadiens ou australiens) conduisent des programmes d'exploration et de développement de nouvelles mines. Mais globalement les investissements de renouvellement sont insuffisants, et beaucoup de projets demanderaient des prix sensiblement supérieurs à 2 000 \$/t de façon durable pour justifier leur réalisation [18].

Les producteurs existants n'investissent pas suffisamment pour assurer le maintien de la production. Récemment, le CEO de Lonmin avertissait d'un risque de pénurie, en expliquant que les cours actuels des platinoïdes couvraient les coûts d'exploitation mais pas les investissements nécessaires [20].

Une liste de projets de développement dans l'exploitation minière des platinoïdes est donnée ci-après (liste non exhaustive, de nombreuses sociétés « juniors » pourraient être ajoutées).

Figure 15 : Liste de projets miniers pour les platinoïdes avec leurs caractéristiques principales

PROJETS PLATINE	Projets Greenfield	Etapas décisionnelles	Démarrage annoncé production	Capacité visée		Réserves	Ressources	Vie
				Minerai	Platinoïdes			
Anglo Platinum								
Unki Platinum (Zimbabwe)	x	Production Démarrée	Jan 2011	1,4 Mt/an	175 000 Oz/an 4E	4,74 MOz 4E	10,5 MOz 4E	> 2038
Twickenham (RSA)	x	Approbation investissement fin 2012	2016-2017	3 Mt/an en 2019			76,8 MOz 4E	
Der Brochen (RSA)	x	Faisabilité en 2014					64,0 MOz 4E	
Impala Platinum								
Zimplats phase 2 (Zimbabwe)		Investissement en cours	2013		+ 180 000 Oz/an Pt			
Rustenburg puits 20,16,17 (RSA)		Investissement en cours	2013/2014/2017		500 000 Oz/an Pt			
Afplats (RSA)	x	Exploration en cours					23 Moz Pt 10,3 MOz Pd 4,4 MOz Rh	
Lonmin								
Marikana nouveaux puits (RSA)		Investissement en cours			+ 250 000 Oz/an Pt		68,4 MOz Pt 114,4 MOz 4E 10,9 MOz Pt 26,7 MOz 4E	
Akanani (RSA)	x	Exploration et études en cours						
Northam								
Booyesdal	x	Investissement en cours	2013			3,0 MOz 4E	103,0 MOz 4E	> 50 ans
Dwaalkop (avec Lonmin)	x	Exploration en cours				5,7 MOz 4E	17,8 MOz 4E	
Xstrata								
Eland (RSA)		Extensions souterraines	Non précisé					
Stillwater Mining Company								
Marathon (Canada)	x	Etude d'impact en cours			200 000 Oz Pt/an	2,45 Moz Pt		
Norilsk Nickel								
Selkirk open pit (Botswana)							2,3 MOz 4E	
Eastern Platinum								
Mareesburg (RSA)	x	Investissement en cours ; suspendu le 30/5/2012	2013 (?)		300 000 Oz/an 4E		2,0 Moz 3E	
Platinum Australia								
Smokey Hills (RSA)	x		2012	0,6 Mt/an	90 000 Oz/an 4E		0,822 MOz 4E	
Kalahari Platinum (Kalplats) (RSA)	x	Etude définitive de Faisabilité nov 2011	2015	1,5 Mt/an	120 000 Oz/an 3E		6,7 MOz 3E	> 10 ans
Rooderand (RSA)	x	Etude définitive de Faisabilité mi 2012	2014	1,2 Mt/an	115 000 Oz/an 4E		4,2 MOz 4E	
Panton (Australie) Projet cédé à Panoramic Precious Metals	x	Etude faisabilité en cours		0,6 Mt/an	90 000 Oz/an PGM		2,4 MOz PGM	
Sylvania Platinum								
Northern Limb Projects (RSA)	x	Exploration	2018		165 000 Oz/an PGM à terme pour les 3 projets		0,77 MOz PGM	
Everest North (RSA)	x	Etude détaillée en cours	2014					
Volspruit (RSA)	x	Etude préliminaire faisabilité en cours	2016	0,3 Mt/an			3,55 MOz PGM	
Wesizwe Platinum								
Bakubung (RSA)	x	Préparation du site en cours	2018 (pleine capacité 2023)		350 000 Oz/an 4E		13,5 MOz 4E	> 35 ans
Maseve 1 (RSA) 26 %	x	Etudes infrastructure en cours			275 000 Oz/an 4E		2,44 MOz 4E	
Notes : 1- les sociétés ne publient pas leurs tonnages de façon uniforme ; on trouve donc des volumes exprimés en platine (Pt), en platinoïdes (PGM), en Platine + Palladium + Rhodium (3E), en Platine + Palladium + Rhodium + Or (4E) 2- Le signe + indique les volumes supplémentaires procurés par une extension 3- Greenfield = installation sur un site vierge 4- Abréviations : 1 Mt = 1 000 000 t ; 1 MOz = 1 000 000 Oz								

4- Analyse de quelques facteurs de criticité

4.1 Rareté relative des ressources minières

Bien que le platine soit un métal rare, les ressources minières identifiées suffisent aux besoins (nets du recyclage) pour plusieurs dizaines d'années. La difficulté potentielle réside dans la mise en place et l'exploitation (rentable) des moyens d'extraction, et c'est là que réside le risque (élevé) de pénurie.

4.2 Concentration dans la chaîne de production

La forte concentration géographique des réserves et de la production minière en RSA, alors que les conditions d'exploitation y deviennent plus difficiles, et que les investissements de renouvellement sont insuffisants, est en soi un facteur de forte vulnérabilité.

À l'étape de production des catalyseurs destinés à l'imprégnation des pots catalytiques, trois acteurs principaux : Johnson Matthey, BASF et Umicore se trouvent être des groupes européens. Tant qu'ils ont accès à du platine (et aux autres platinoïdes nécessaires), il n'apparaît *a priori* pas de risque sérieux à ce stade de la chaîne de valeur.

4.3 Importance pour la filière automobile

Le platine est encore un élément incontournable des pots catalytiques indispensables au respect des normes environnementales de plus en plus exigeantes s'imposant aux véhicules à moteur à combustion interne. À terme on peut cependant continuer à voir son importance diminuer en raison de la concurrence du palladium moins cher.

Par ailleurs, les véhicules électriques n'ont pas besoin de pots catalytiques. Si les piles à combustible représentent un pourcentage significatif du parc automobile, elles pourront donner au platine un intérêt renouvelé, puisqu'il est utilisé pour catalyser la réaction produisant l'électricité.

5- Scénarios¹⁵ prospectifs à 10 ans

5.1 Scénario d'évolution de la demande

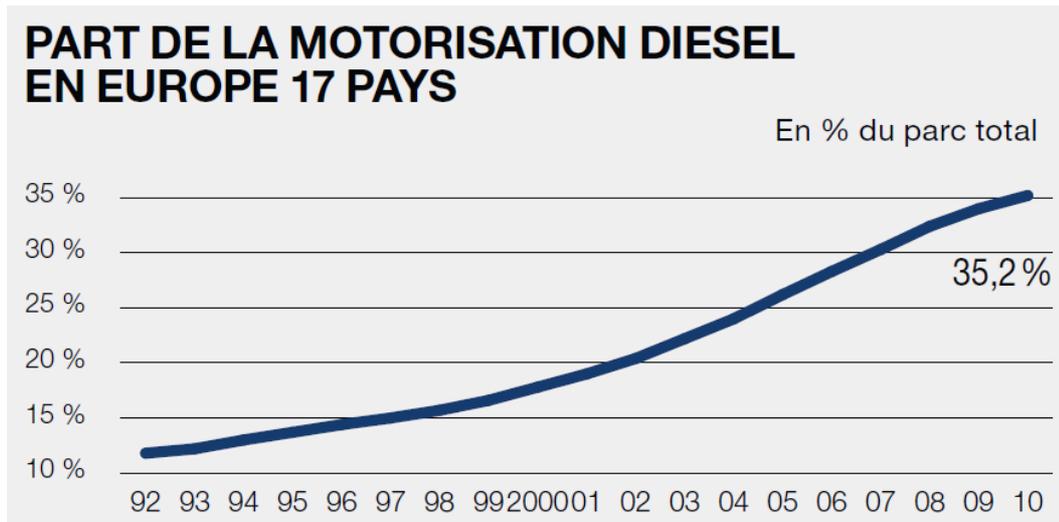
La demande de platinoïdes du secteur automobile est tirée par la croissance de la production de véhicules et l'application de normes environnementales de plus en plus exigeantes (passage à Euro VI), avec un effet de mix motorisation et région jouant de façon complexe sur le rapport platine / palladium, par exemple :

- recours accru au palladium dans les motorisations essence ;

¹⁵ Rappelons qu'un scénario n'est pas une prédiction.

- augmentation de la proportion de la motorisation Diesel des véhicules individuels dans certaines régions (Europe : voir figure 16 : 35 % du parc en 2010 ; France : 71 % des immatriculations de voitures neuves en 2010) ;
- émergence rapide de solutions incorporant le palladium pour les motorisations Diesel ;
- à terme, proportion de véhicules électriques dans la production.

Figure 16 : Croissance de la part de la motorisation Diesel dans le parc automobile en Europe ([11])



L'évolution des dernières années a été défavorable au platine au sein du mix de platinoïdes utilisés pour la catalyse automobile, y compris en Europe, et il est vraisemblable que la tendance se poursuivra. Globalement sur la période 2007-2011, marquée par la crise, la demande de platine pour la catalyse automobile a reculé au rythme annuel moyen (TMCA) de -7%. Nous pensons que la croissance attendue de la demande de platinoïdes pour la catalyse automobile profitera essentiellement au palladium et moins au platine. La demande de platine pour la catalyse automobile devrait croître, mais lentement.

Nous utilisons des prévisions de croissance de la production automobile de 5,3 % en moyenne mondiale, dont plus de la moitié (57 % de l'accroissement) en Asie.

Les applications industrielles croîtront en fonction des investissements, en particulier dans les pays émergents. Sur la période 2007-2011, la demande pour ce secteur a augmenté au rythme annuel moyen de 2,7 %, en ligne avec le PIB mondial mais avec des fluctuations beaucoup plus fortes.

La demande de joaillerie est difficile à prévoir, on peut imaginer que si les prix du platine montent trop vite, cette composante de la demande pourrait faiblir. La demande peut basculer entre l'or et le platine en fonction des prix relatifs. Sur 2007-2011, le

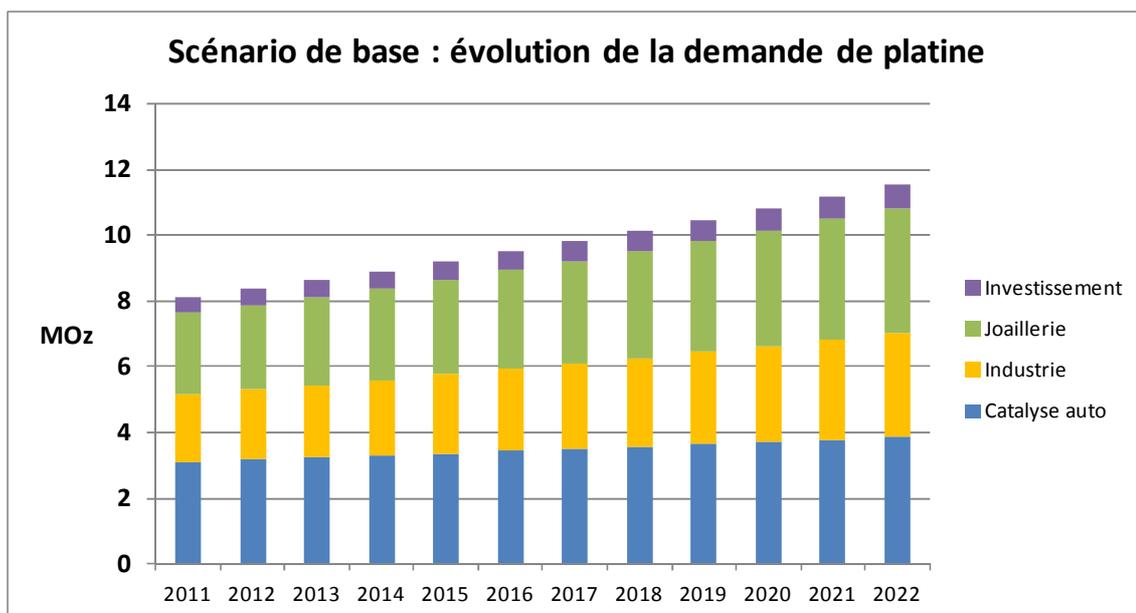
TMCA a été de 4,1 % avec une très forte augmentation en 2009 suivie d'une diminution en 2010.

La demande pour l'investissement physique peut être volatile, au gré des arbitrages. Le TMCA sur 2007-2011 a été de 28,3 %, avec un maximum en volume sur 2009-2010.

Dans notre scénario de base, nous retiendrons une croissance tendancielle d'environ 2 % par an de l'emploi du platine dans la catalyse auto, et des croissances de 4 % par an dans les autres secteurs. Il peut y avoir des fluctuations autour de ces tendances, selon le rythme de croissance de l'économie mondiale et le caractère cyclique de certaines industries.

Nous n'intégrons pas encore d'effet important du développement des piles à combustible, les intégrant dans la demande industrielle.

Figure 17 : Scénario d'évolution de la demande globale en platine

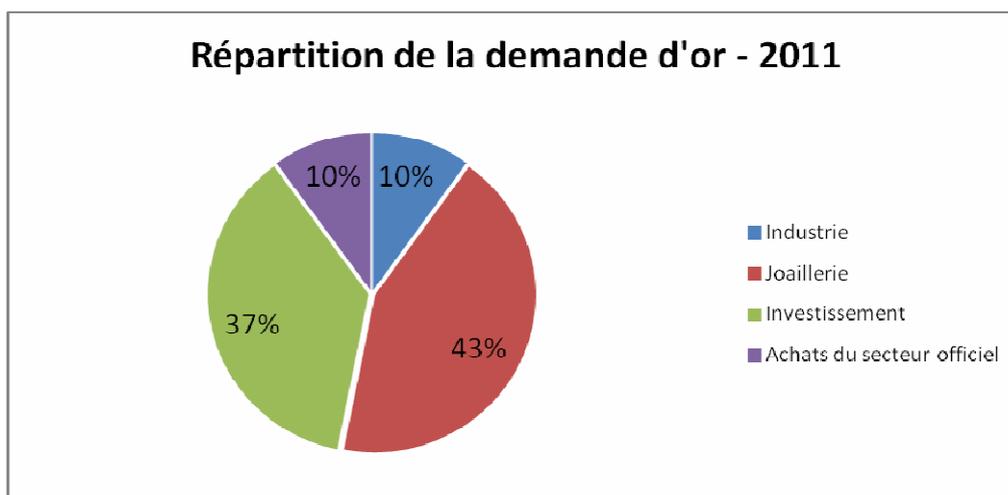


La croissance moyenne sur 2011-2022 se ferait donc au taux moyen de 3,3 % par an, portée par la demande industrielle et par la joaillerie, et dans une moindre mesure par la catalyse automobile.

Les deux grandes inconnues, difficiles à prévoir, sont la joaillerie et l'investissement physique. Dans notre scénario, l'ensemble Joaillerie + Investissement évolue entre 36 % (valeur 2011) et 39 % de la demande totale. La joaillerie représenterait une part très importante de la demande ; si cette composante n'était pas au rendez-vous, la croissance de la demande de platine serait sensiblement affectée. Inversement, le secteur investissement physique, encore faible en proportion, pourrait se développer.

À titre de comparaison, la demande d'or se décomposait de la façon suivante en 2011 :

Figure 18 : Demande d'or en 2011 : répartition en volume [21]

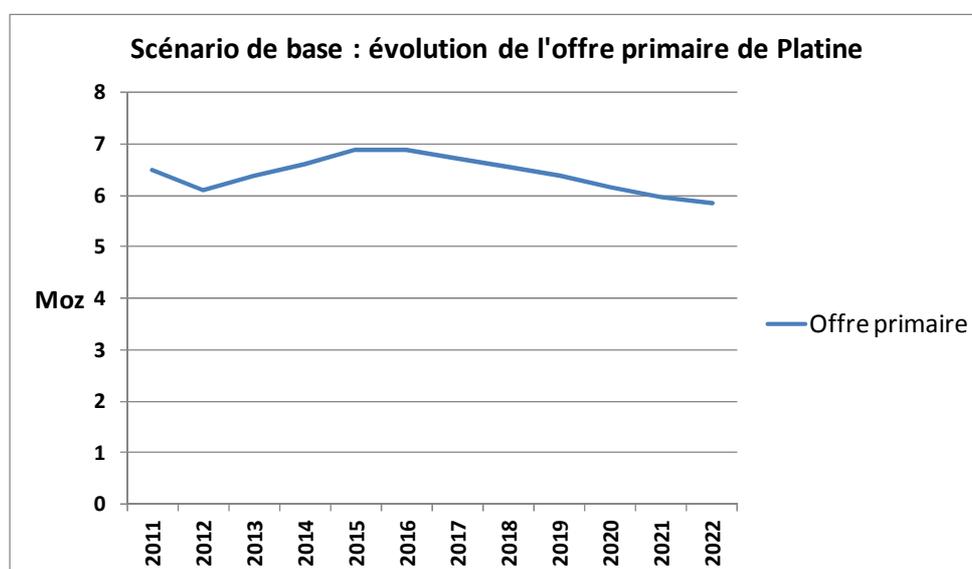


La demande industrielle d'or ne représentait que 10 % de la demande totale, la joaillerie 43 %, l'investissement et les achats du secteur officiel 47 %.

5.2 Scénario d'évolution de l'offre

Offre primaire : Comme cela a été évoqué plus haut, les investissements sont insuffisants, et même si leur niveau remontait subitement, le temps de réponse est tel que la production primaire de platine devrait passer par un pic au cours des dix prochaines années. Ainsi, selon les experts du SFA Oxford, compte tenu de l'épuisement de réserves des exploitations en cours, ainsi que des projets d'extension ou de nouvelles mines susceptibles de se réaliser, le pic pourrait se situer vers 2015-2016 [9]. Nous retiendrons comme scénario de base un tel scénario de **pic de l'offre primaire**. Le début de l'année 2012 est marqué par la poursuite des problèmes en Afrique australe et des fermetures de mines.

Figure 19 : Scénario d'évolution de l'offre primaire de platine

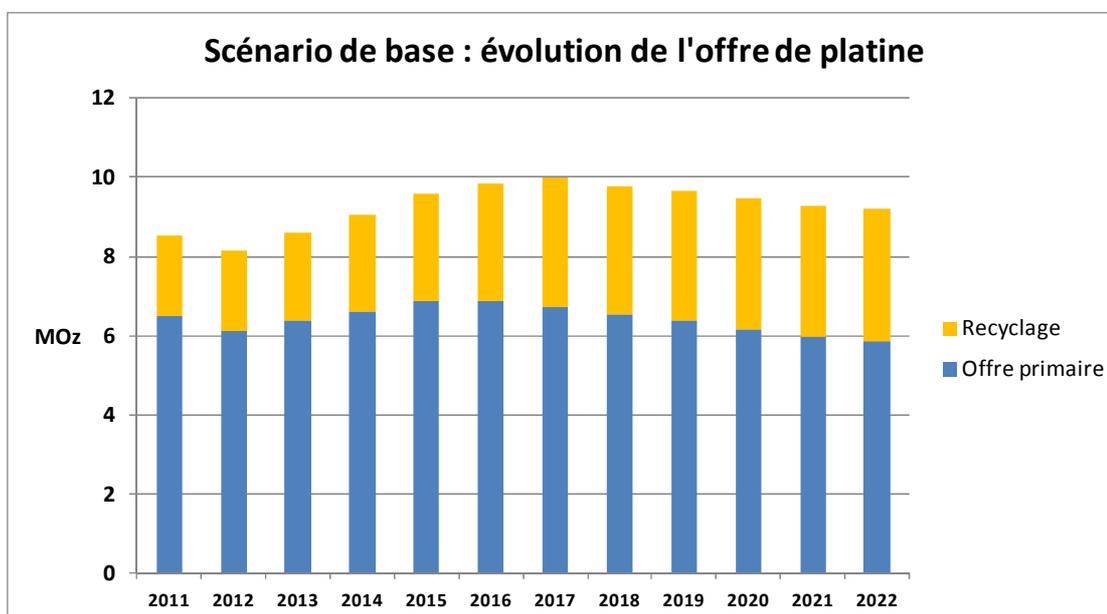


Recyclage : En 2011, le recyclage a représenté 25 % de la demande mondiale. Compte tenu de l'augmentation attendue du taux de recyclage, en particulier sur les pots catalytiques (évolution des législations sur la valorisation des VHU), et de l'utilisation passée de platine, on attend une croissance du volume de platine issu du recyclage de pots catalytiques. Nous supposons qu'en 2022 le recyclage des métaux précieux contenus dans les pots catalytiques pourrait atteindre 75 % : nos hypothèses conduisent à une augmentation du volume recyclé dans ce secteur jusqu'à environ 2,4 MOz en 2022. Le recyclage du secteur joaillerie est difficile à prévoir ; nous retiendrons un volume de 25 % de la demande.

Scénario d'évolution de l'offre totale :

L'offre totale est la somme de l'offre primaire et du recyclage.

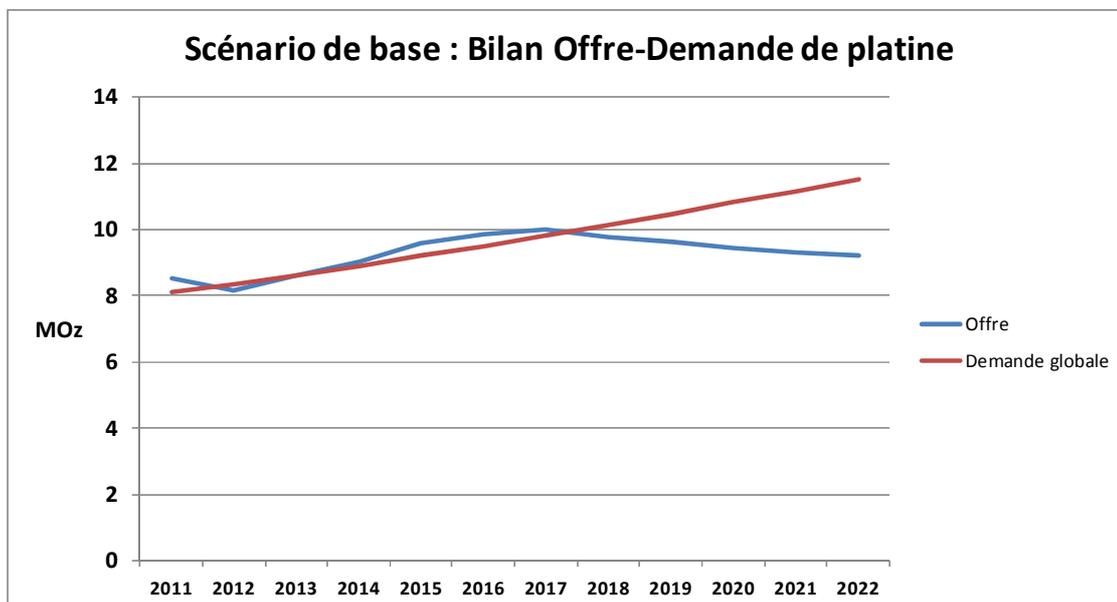
Figure 20 : Scénario d'évolution de l'offre de platine



Un pic de l'offre totale serait donc atteint en 2017, sous l'effet du manque d'investissement dans l'offre primaire.

5.3 Évolution du bilan offre-demande

Figure 21 : Bilan offre-demande de platine 2011-2022



5.4 Analyse du scénario de base

Les deux hypothèses centrales de ce scénario sont le pic de l'offre primaire et la faible croissance de la demande de platine pour les pots catalytiques, avec l'inconnue de la demande représentée par la joaillerie et l'investissement physique.

Le marché serait plus ou moins équilibré jusqu'en 2017, sachant que ce type d'analyse n'est pas destiné à prévoir des fluctuations autour de la tendance. L'offre deviendrait insuffisante aux environs de l'année 2018, et si rien ne change du côté de l'offre ou de la demande, le déficit théorique atteint en 2022 représenterait 17 % de la demande.

En début de période, le scénario présenté conduirait en tendance à une montée régulière des prix, les producteurs sud-africains pilotant leur offre et fermant les puits les moins rentables pour soutenir les prix quand nécessaire. Les prix augmenteraient fortement à l'approche de la pénurie, atteignant puis dépassant les 2 000 \$ (en dollars 2012) nécessaires à l'ouverture de nouvelles mines.

Cependant, même à court terme, tout bouleversement de la production en Afrique du Sud et au Zimbabwe se traduirait par des tensions immédiates sur l'offre et sur les prix. Il faut donc s'attendre à une possibilité d'évolution des prix du platine en « montagnes russes », pouvant conduire temporairement à dépasser le niveau des 2 000 \$/Oz.

À partir du moment où les prix du platine augmenteraient rapidement, des mécanismes d'adaptation de la demande joueraient : le plus rapide serait la réduction de la

demande pour la joaillerie. Inversement, face à la perspective d'augmentation de prix à venir, la demande pour investissement physique pourrait s'accroître. Dans le secteur de la catalyse automobile et de l'industrie, la mise en œuvre d'alternatives à l'utilisation du platine serait accélérée.

Inversement, une économie mondiale tournant au ralenti sur une période prolongée soulagerait la demande et contribuerait à maintenir les prix en dessous des 2 000 \$/Oz, ce qui retarderait encore les investissements de capacité (voir la variante « demande faible » ci-après).

En 2010, l'étude [22] avait défini 3 scénarios :

- Scénario 1, « évolution au fil de l'eau » : évolution plus ou moins régulière de la demande de platine, sans ruptures ou problèmes d'offre ; tendance moyenne d'augmentation des prix du platine de 6 % par an.
- Scénario 2, « instabilité et volatilité » : problèmes d'offre et instabilité du marché contrariant à la fois le développement de nouvelles applications du platine et le développement de nouveaux gisements, dans la mesure où la rentabilité des investissements ne pourrait être garantie ; les acteurs de l'automobile chercheraient des solutions permettant d'échapper au problème de l'approvisionnement en platine ; les prix évolueraient au rythme moyen de 4-5 % par an, mais avec de violentes fluctuations.
- Scénario 3, « Anticipation de la rareté », avec l'émergence d'alternatives au platine, qui pourrait conduire à une contraction de la demande de 5 à 10 % par an à partir de la fin des années 2015-2020 ; la demande et les prix continueraient à augmenter pendant la période initiale (+ 3 % par an pour les prix), puis diminueraient ensuite.

Notre analyse, deux ans après, retrouve les problèmes de l'offre (arrêts de production en RSA, augmentation des coûts et difficulté à prouver la rentabilité des investissements), et l'émergence de solutions de remplacement pour la catalyse automobile.

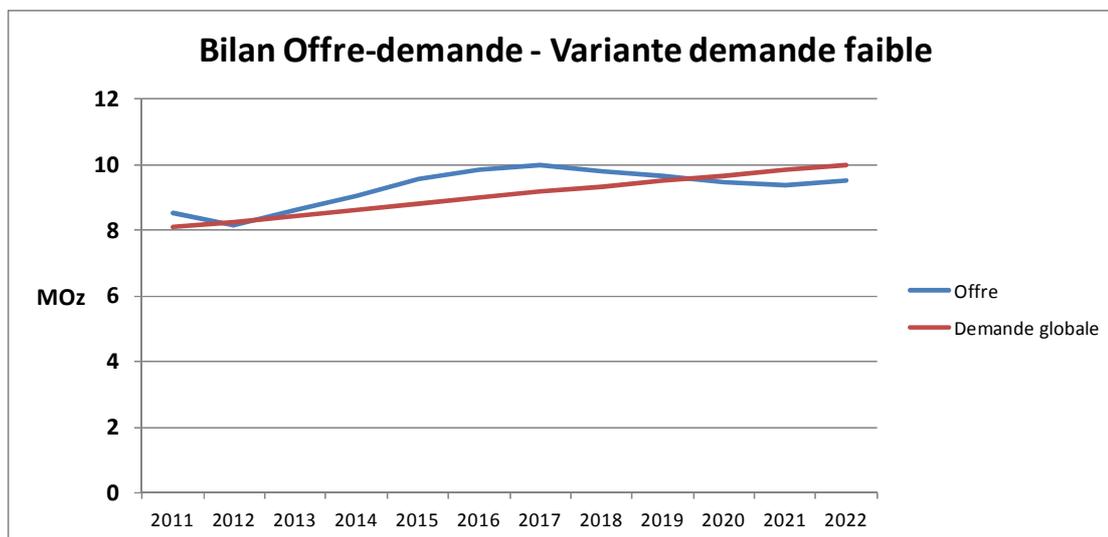
5.5 Variantes

Autour de notre scénario central, on peut élaborer deux variantes :

Variante « demande faible », où la demande industrielle et pour l'automobile est réduite en raison par exemple d'une économie mondiale durablement languissante. Les capacités deviendraient insuffisantes autour de l'année 2020 ; en 2022, le déficit serait de 6 % de la demande. Les prix auraient tendance à n'augmenter que lentement sur la plus grande partie de la période (sauf problèmes graves dans l'appareil de production), puis augmenteraient plus rapidement à l'approche du croisement des courbes d'offre et de demande. La demande pour la bijouterie ne serait pas réduite en début de période, les prix relativement modérés du platine compensant une situation économique morose, mais ralentirait lors de

l'accélération des prix ; la demande pour l'investissement serait d'abord réduite devant le manque de perspective d'augmentation des prix, puis s'accroîtrait plus rapidement à partir de l'approche du croisement des courbes d'offre et de demande. Cette variante « demande faible » du scénario prend en compte ces possibles ajustements de la demande.

Figure 22 : Variante demande faible



Les producteurs seraient amenés à fermer temporairement des mines faute de rentabilité et pour essayer de soutenir les prix en début de période, puis constitueraient des stocks à revendre à des prix plus élevés. Dans un tel cas de figure, les projets de nouvelles exploitations seraient évidemment retardés.

- **Variante « problèmes graves de production »**

Dans cette variante du scénario, la RSA resterait durablement marquée par des perturbations et les problèmes de production ou les arrêts imposés feraient que la production primaire n'atteindrait que 90 % du volume possible sur les années 2012, 2013, 2014. Sauf effondrement de la demande, un déficit s'instaurerait, qui ferait monter les prix probablement au-delà des 2 000 US\$/Oz au cours de la période 2012-2014.

Cette montée des prix pourrait jouer sur la demande, en particulier la demande pour la joaillerie, qui serait susceptible de baisser jusqu'en 2014 avant de reprendre lentement. Par contre la demande des investisseurs resterait soutenue, le contexte étant propice à des bénéfices futurs.

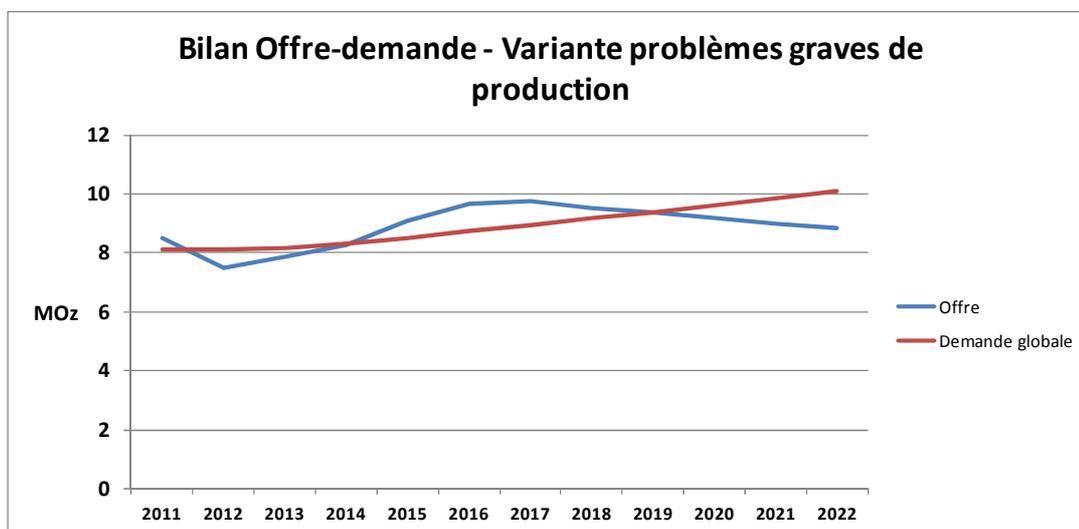
Ces ajustements de la demande et de l'offre sont pris en compte dans ce scénario.

À partir de 2015, en supposant des solutions apportées aux problèmes sud-africains, les producteurs pourraient piloter la reprise de production de façon à suivre la croissance de la demande et à conserver des prix élevés.

À partir de 2019 on retrouverait la situation de déficit d'offre ; on peut toutefois penser que cette échéance serait un peu retardée du fait de la sous-exploitation des réserves au cours de la période précédente. Parallèlement, les prix élevés

prolongés auraient accéléré la mise en œuvre de solutions de remplacement du platine et de quelques projets de nouvelles mines.

Figure 23 : Variante problèmes graves de production



5.6 Pistes pour anticiper les risques de pénurie / tension sur les prix

Le risque de goulot d'étranglement ne se situe pas au niveau des producteurs de pots catalytiques pour l'automobile, mais au niveau de leur approvisionnement en platine. Les ressources minières sur le sol européen sont faibles, le gros des ressources se trouve en République sud-africaine et les producteurs locaux sont confrontés à des problèmes importants, provoquant des arrêts de production, un renchérissement constant des coûts, et un manque de rentabilité des projets de développement. Le risque sur les approvisionnements en platine et les prix est réel.

Face à cela, les pistes que l'on peut évoquer sont les suivantes :

- Poursuivre les efforts de recherche-développement pour réduire la quantité de platine par pot catalytique nécessaire à atteindre les objectifs de contrôle des émissions des véhicules, ainsi que pour les piles à combustible sans platine ;
- Améliorer encore la récupération et le recyclage de platine dans les VHU et DEEE ;
- Pour les acteurs s'approvisionnant en platine, participer à des projets d'extension ou de développement de nouveaux gisements (le dernier point est une action ne portant ses fruits qu'à long terme) avec des contrats garantissant des volumes.

-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-

Bibliographie

Annexe 1 : Schéma du procédé d'Anglo American Platinum (Amplats)

Bibliographie

- [1] Johnson Matthey PLC, Platinum 2012, Présentation aux analystes, 14 mai 2012
- [2] « Platinum Group Metals », 2010 Minerals Yearbook, U.S.Geological Survey, October 2011. Accessible en ligne :
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/myb1-2010-plati.pdf>
- [3] « Platinum-Group Metals », Minerals Commodity Summaries, U.S.Geological Survey, January 2012. Accessible en ligne :
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/mcs-2012-plati.pdf>
- [4] « World Mineral Production 2006-2010 », British Geological Survey, January 2012
- [5] « Platinum », BGS Profile, British Geological Survey, Septembre 2009
- [6] Anglo American Integrated Annual Report 2011
- [7] Implats Condensed audited consolidated annual results, Year ended 30 June 2011
- [8] Lonmin Plc Annual Report and Accounts for the year ended 30 September 2011
- [9] Stillwater Mining Company, Annual Shareholders Meeting, April 26, 2012, et Presentation, May 2012
- [10] “Le pot catalytique”, Société Chimique de France,
http://www.societechimiquedefrance.fr/IMG/pdf/fiche_pot_catalytique.pdf
- [11] « L’industrie automobile Française, Analyse et statistiques 2011 », rapport annuel du CCFA
- [12] Northam Annual Integrated Report 2011
- [13] Eastern Platinum website, <http://eastplats.com>
- [14] Platinum Australia, ASW Mid to Small Cap Conference, March 2012
- [15] Sylvania Platinum, Half Year Results and Production update to March 2012, March 26, 2012
- [16] Wesiswe Platinum Strategic overview, February 2012
- [17] “Metals in Our Lives”, Annual Review of MMC Norilsk Nickel for 2010
- [18] Creamer, M., “Platinum’s slide down slippery supply slope has begun – SFA Oxford”, miningweekly.com, 8th February 2011

[19] “Étude du potentiel de recyclage de certains métaux rares”, Étude réalisée pour le compte de l’ADEME par BIO Intelligence Service S.A.S., Juillet 2010 – partie 2

[20] “Heightened risk of platinum supply disruption – Lonmin”, <http://igoldprice.net>, 9 Février 2012

[21] “Gold Demand Trends, First Quarter 2012”, World Gold Council, May 2012

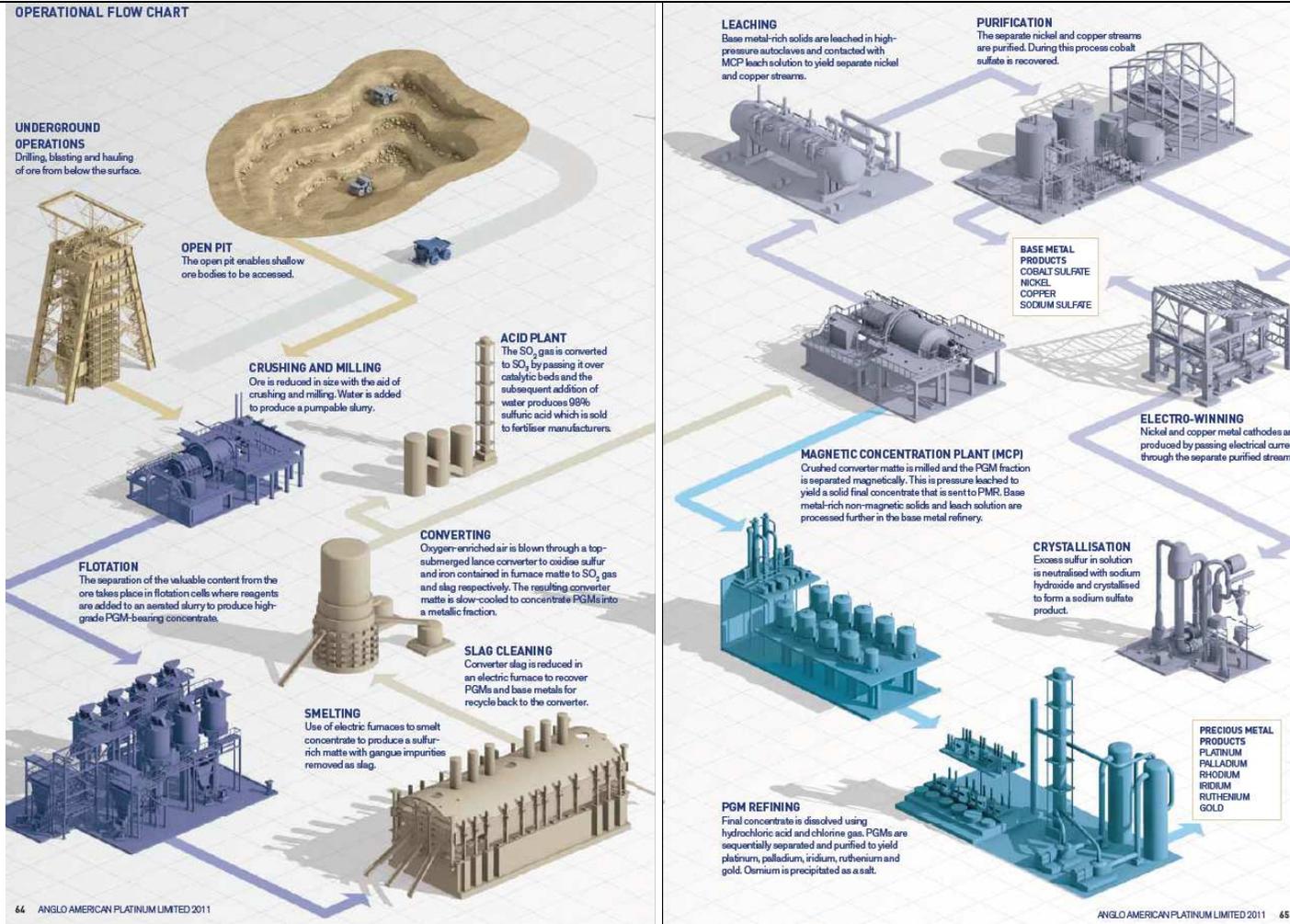
[22] “Mutations économiques dans le domaine automobile”, Étude PIPAME - BIPE, Avril 2010

[23] Stillwater Mining Company 2011 Annual Report

[24] Aquarius Platinum, Annual report 2011

ANNEXE 1

Schéma du procédé d'Anglo American Platinum (Amplats)



PALLADIUM (Pd)

24 juin 2012

Avertissement : la présente note est rédigée dans le cadre d'une étude précise, elle ne prétend donc en aucun cas à l'exhaustivité.

Résumé :

La consommation mondiale de palladium (hors la demande pour investissement) est estimée à environ 9 000 000 Oz (soit environ 280 t) par an ; l'utilisation pour la catalyse automobile en représente les deux tiers, c'est de loin l'utilisation la plus importante du palladium, devant les applications électriques et électroniques. En 2011, les investisseurs ont vendu plus de palladium qu'ils n'en ont acheté.

Le palladium concurrence fortement le platine pour la catalyse automobile, grâce à ses propriétés voisines et son prix plus faible. La quantité de palladium utilisée par pot catalytique est faible (quelques grammes), mais le platine ou le palladium sont indispensables pour respecter les normes d'émission des véhicules.

La production minière est fortement concentrée sur la Russie et l'Afrique du Sud, qui à elles deux extraient 80 % du palladium d'origine minière. Le recyclage (à partir des VHU et DEEE) fournit plus du quart de la demande mondiale.

L'Europe comporte plusieurs opérateurs spécialisés dans le recyclage des platinoïdes et l'imprégnation des pots catalytiques ; la vulnérabilité réside dans l'approvisionnement en platine et palladium primaires.

Les mines sud-africaines sont confrontées à de nombreux problèmes de production et au renchérissement de leurs coûts ; les producteurs russes voient l'épuisement de leurs meilleurs gisements. Les investissements de capacité rentables dans la situation actuelle sont insuffisants pour assurer le renouvellement de la capacité de production, et on peut prévoir un pic de la production minière, résultant non point d'un manque de ressources géologiques, mais du manque d'investissements.

La demande de palladium pour la catalyse automobile devrait croître rapidement. Le scénario de base de notre étude prévoit donc un déficit de capacité de production dès 2012, et qui croîtrait sur la période étudiée, malgré la croissance du volume en provenance du recyclage. Les prix devraient augmenter rapidement.

Afin de réduire les risques, les pistes suivantes peuvent être proposées :

- À très court terme, renforcer les stocks de palladium ;
- Poursuivre les efforts de recherche-développement pour réduire la quantité de platinoïdes (platine, palladium) par pot catalytique nécessaire pour atteindre les objectifs de contrôle des émissions des véhicules ;

- Améliorer encore la récupération et le recyclage des platinoïdes dans les VHU et DEEE ;
- Pour les acteurs s'approvisionnant en palladium, participer à des projets d'extension ou de développement de nouveaux gisements (le dernier point est toutefois une action qui ne porterait ses fruits qu'à long terme), avec des contrats garantissant des volumes.

1- Demande : produits et utilisations

Le palladium fait partie d'un groupe de six métaux, appelés platinoïdes, qui sont souvent associés dans les gisements : platine, palladium, rhodium, osmium, ruthénium, iridium.

Comme pour les autres métaux précieux (or, argent), l'unité de masse utilisée couramment pour le palladium et les autres platinoïdes n'est pas le kilogramme, mais l'**Once Troy**, abréviation Oz, qui est égale à 31,1034768 g. Inversement $1 \text{ kg} = 32,150747 \text{ Oz}$.

Nous utiliserons également l'abréviation kOz, $1 \text{ kOz} = 1\,000 \text{ Oz} = 31,1034768 \text{ kg}$; de même $1 \text{ MOz} = 1\,000\,000 \text{ Oz}$.

1.1 Produits intermédiaires

Le palladium est extrait, aux côtés des autres platinoïdes, dans des mines à ciel ouvert ou souterraines,

- soit de gisements de platinoïdes (d'autres métaux pouvant être obtenus comme sous-produits) : c'est le cas de l'Afrique du Sud, dans la zone du Bushveld,
- soit de gisements de nickel ou de cuivre, dont il est alors un sous-produit : c'est le cas de la Russie, du Canada.

La première étape après extraction du minerai est l'obtention d'un concentré plus riche en métaux que le minerai brut, par élimination des minéraux stériles. Ce concentré peut ensuite être transformé par le mineur ou vendu pour être traité par un autre acteur. Le procédé combinant pyrométallurgie et hydrométallurgie qui conduit aux platinoïdes et aux métaux de base associés dans le gisement (nickel, cuivre par exemple) dépend du minerai, qui peut en particulier être du type pauvre en sulfures (minerais sud-africains UG2 et Merensky Reef) ou riche en sulfures (minerai de Norilsk, riche en nickel et cuivre).

Le palladium est également récupéré dans les filières de recyclage des pots catalytiques, des DEEE, de la joaillerie.

Il est vendu sous différentes formes : brutes (minerai, concentré, poudre) ou produits semi-finis (lingot, fil, grille, produits chimiques : sels, pâtes, ...).

1.2 Utilisations finales

La demande de palladium est répartie entre la catalyse pour l'automobile, l'industrie, la joaillerie, et les investisseurs (investissement physique : lingots, pièces, ETF).

Figure 1 : Répartition de la demande mondiale de palladium par secteur, et évolution 2007-2011 (source : [1])

Palladium, MOz	HISTORIQUE					% du total 2011	TMCA 2011/2007
	2007	2008	2009	2010	2011		
Catalyse Auto	4,545	4,465	4,050	5,580	6,030	71,4%	7,3%
Industrie	2,640	2,420	2,400	2,465	2,480	29,3%	-1,6%
Chimie	0,375	0,350	0,325	0,370	0,445	5,3%	4,4%
Electricité/électronique	1,550	1,370	1,370	1,410	1,380	16,3%	-2,9%
Dentaire	0,630	0,625	0,635	0,595	0,550	6,5%	-3,3%
Autres	0,085	0,075	0,070	0,090	0,105	1,2%	5,4%
Joaillerie	0,950	0,985	0,775	0,595	0,505	6,0%	-14,6%
Investissement	0,260	0,420	0,625	1,095	-0,565	-6,7%	-
Total demande mondiale	8,395	8,290	7,850	9,735	8,450	100,0%	0,2%

L'utilisation dans les pots catalytiques pour automobile représente en 2011 71 % de la demande totale, et a augmenté de 33 % en 4 ans.

Les principales applications industrielles (hors pots catalytiques pour automobile) sont :

- La catalyse dans l'industrie chimique (plastiques, fibres synthétiques, ...),
- Électricité et électronique : condensateurs céramiques multicouches (MLCC), revêtements de contacts, soudures sans plomb, ...
- Dentisterie (bridges et couronnes), marché en déclin sous l'influence d'une meilleure prévention et de la concurrence des céramiques, plus esthétiques,
- La catalyse pour la réduction des émissions des moteurs hors automobile.

La demande pour investissement physique a été négative en 2011 : ventes supérieures aux achats, alors qu'en 2010 les achats ont été extrêmement élevés. Les investisseurs avaient anticipé des hausses de prix et beaucoup d'entre eux ont été en mesure de vendre avec bénéfice en 2011.

Figure 2 : Demande 2011, par secteur et zone géographique [1]

Demande de Palladium 2011, kOz	Europe	Japon	Amérique du Nord	Chine	Reste du monde	Total par secteur
Catalyse Auto	1 440	665	1 475	1 115	1 335	6 030
Industrie, dont :	375	570	485	430	620	2 480
Chimie	80	20	80	150	115	445
Electricité/électronique	185	310	145	270	470	1 380
Dentaire	80	230	225	0	15	550
Autres	30	10	35	10	20	105
Joaillerie	60	70	45	305	25	505
Investissements	-35	5	-535	0	0	-565
Total par zone	1 840	1 310	1 470	1 850	1 980	8 450

La catalyse auto est l'application la plus importante dans toutes les zones. On note la particularité chinoise, qui est le poids plus important de la consommation pour la joaillerie, et le volume des ventes des investisseurs nord-américains.

Si on compare les utilisations du palladium et du platine en 2011, on constate que la proportion de la demande pour la catalyse automobile est nettement plus élevée pour le palladium, alors que la proportion pour la joaillerie est plus élevée pour le platine.

En volume, **la catalyse automobile consomme deux fois plus de palladium que de platine** ; la joaillerie consomme cinq fois plus de platine que de palladium.

Figure 3 : Comparaison de la structure de la demande 2011 pour le palladium et le platine (d'après [1])

Comparaison demande Platine Palladium 2011				
kOz	Palladium		Platine	
Catalyse Automobile	6 030	71,4%	3 105	38,4%
Industrie	2 480	29,3%	2 050	25,3%
Joaillerie	505	6,0%	2 480	30,6%
Investissement	-565	-6,7%	460	5,7%
Total	8 450	100,0%	8 095	100,0%

1.3 Données chiffrées sur l'utilisation dans la filière automobile

Échappement :

La catalyse automobile peut être décomposée en trois segments :

- Véhicules essence (platine, palladium, rhodium) ;
- Véhicules légers et petits utilitaires Diesel (platine, palladium) ;
- Véhicules lourds Diesel (essentiellement platine).

Les catalyseurs utilisés dans l'automobile contiennent du platine, du palladium et du rhodium, en proportions dépendant du type de moteur, des performances recherchées (normes d'émission), de la qualité du carburant, du prix relatif de ces métaux précieux ou d'éventuels problèmes d'approvisionnement, des choix du constructeur pour un modèle donné.

Il y a au maximum quelques grammes de palladium par catalyseur (voir ci-après).

En 2010, la production mondiale a été de 58 478 810 véhicules particuliers et 19 378 895 véhicules utilitaires, soit un total de 77 857 705 [2]. En divisant de façon très abrupte la consommation de platine et de palladium pour la catalyse automobile en 2010 par le nombre de véhicules construits, on obtient une « moyenne » de 1,2 g de platine et 2,2 g de palladium par véhicule. Ce chiffre n'est qu'indicatif car il se réfère à l'ensemble des véhicules automobiles construits, alors que tous n'utilisent pas encore un pot catalytique, et que la formulation du catalyseur est variable.

Figure 4 : Comparaison de l'emploi du platine (Pt) et du palladium (Pd) dans la catalyse automobile, 2010 (calculé à partir de [1] et [2])

2010	Europe	Japon	Amérique du Nord	Chine	Reste du monde	Total Monde
Pt pour Catalyse Auto, kOz	1 495	550	405	100	525	3 075
Pd pour Catalyse Auto, kOz	1 330	820	1 355	1 005	1 070	5 580
Production de véhicules (milliers)	19 823	9 626	12 178	18 265	17 966	77 858
Voitures particulières	17 266	8 307	5 090	13 897	13 919	58 479
Véhicules utilitaires	2 557	1 319	7 087	4 368	4 048	19 379
Grammes de platine par véhicule	2,3	1,8	1,0	0,2	0,9	1,2
Grammes de palladium par véhicule	2,1	2,6	3,5	1,7	1,9	2,2
Rapport palladium/platine	0,91	1,44	3,50	8,50	2,11	1,83

La situation est assez variable selon les régions, l'Europe étant la région où le rapport palladium/platine est le plus faible, alors qu'au contraire en Chine le palladium domine nettement.

L'évolution entre 2007 et 2010 a été favorable au palladium, qui s'est substitué au platine grâce à un coût inférieur, y compris dans les motorisations Diesel longtemps réservées au platine.

Figure 5 : Comparaison de l'emploi du platine (Pt) et du palladium (Pd) dans la catalyse automobile, 2007 (calculé à partir de [1] et [2])

2007	Europe	Japon	Amérique du Nord	Chine	Reste du monde	Total Monde
Pt pour Catalyse Auto, kOz	2 055	610	850	175	455	4 145
Pd pour Catalyse Auto, kOz	920	820	1 695	325	785	4 545
Production de véhicules (milliers)	22 853	11 597	15 454	8 882	14 479	73 266
Voitures particulières	19 331	9 945	6 475	6 381	11 069	53 201
Véhicules utilitaires	3 522	1 652	8 979	2 501	3 410	20 065
Grammes de platine par véhicule	2,8	1,6	1,7	0,6	1,0	1,8
Grammes de palladium par véhicule	1,3	2,2	3,4	1,1	1,7	1,9
Rapport palladium/platine	0,46	1,38	2,00	1,83	1,70	1,06

On constate qu'en 3 ans, le rapport moyen palladium/platine au niveau mondial est passé de 1,06 à 1,83, et que même en Europe, où la plus grande partie des véhicules produit est équipée d'une motorisation Diesel, le palladium fait presque jeu égal avec le platine en 2010 alors qu'en 2007 il n'en représentait qu'un peu moins de la moitié.

Sur cette période, alors que la production mondiale de véhicules progressait de 6,3 %, la quantité totale de platine utilisée pour la catalyse automobile régressait de 25,8 %

alors que la quantité de palladium pour cette même application augmentait de 22,8 %. 2011 a confirmé la tendance, avec une croissance beaucoup plus forte pour le palladium que pour le platine.

Selon [9], l'évolution depuis 2007 est la suivante :

Part du palladium dans la demande de platinoïdes pour les pots catalytiques	Moteurs essence (Pt, Pd, Rh)	Diesel « Light Duty » (Pt,Pd)
2007	70 %	2 %
2009	80 %	5 %
2011	85 %	20 %

Le périmètre auquel correspondent ces chiffres n'est pas précisé, mais ils indiquent bien la tendance et les nouvelles possibilités techniques.

En termes de poids économique de l'achat de la matière première, la masse de palladium par pot catalytique est faible, de l'ordre de quelques grammes ; avec le prix actuel du palladium, voisin de 615 \$US\$/Oz, pour un contenu de 4 g, le métal représenterait 79 US\$ soit environ 64 € par pot catalytique.

La croissance de la production de véhicules et l'adoption de normes d'émission plus contraignantes devraient bénéficier au palladium plus qu'au platine.

Les principaux producteurs de catalyseurs automobiles à base de platinoïdes sont Johnson Matthey (Royaume-Uni), BASF Catalysts (Allemagne), Umicore Automotive Catalysts (maison mère en Belgique), Cataler (Japon).

2- Offre mondiale

2.1 Volume de production primaire

Selon les sources, les chiffres de production minière peuvent sembler varier sensiblement. Ces écarts apparents s'expliquent par le volume important de ventes à partir du stock contrôlé par le gouvernement russe. La figure suivante montre qu'en fait les trois sources USGS [3], BGS [4] et Johnson Matthey [1] sont en accord (aux petits écarts statistiques inévitables près) : production minière de l'ordre de 6,6 MOz et ventes du stock russe de 0,775 MOz en 2011.

Figure 6 : Production minière et ventes du stock russe ([1], [3], [4])

Source	kOz	2010	2011
USGS	Production minière	6 486	6 656
BGS	Ventes	7 347	
Johnson Matthey	Total Ventes	7 355	7 360
	<i>Dont :</i> Ventes de stock russe	1 000	775
	Production minière	6 355	6 585

Le volume de ventes du stock russe en 2011 a été le plus faible des 5 dernières années. Certains experts [1] s'attendent à un volume encore beaucoup plus faible en 2012 : autour de 0,250 MOz. Selon le rapport annuel 2011 de Norilsk Nickel [12], ce stock serait presque complètement épuisé.

2.2 Répartition géographique de la production minière

Les trois principales zones productrices sont, dans l'ordre (chiffres de production de l'USGS pour 2011) :

1. la Russie (2 733 kOz),
2. la République sud-africaine (RSA) et le Zimbabwe (2 508 kOz et 238 kOz respectivement),
3. l'Amérique du Nord (Canada : 579 kOz + USA : 402 kOz).

Les trois premiers pays producteurs sont la Russie (41 % de la production mondiale, hors ventes de stock), l'Afrique du Sud (38 % de la production mondiale) et le Canada (8,7 %).

Figure 7 : Répartition géographique de la production minière [3]

Production minière kOz de palladium	2010	2011	% total 2011	Var 2011- 2010
Russie	2 723	2 733	41,1%	0,4%
Rép. Sud Africaine	2 643	2 508	37,7%	-5,1%
Amérique du Nord	588	981	14,7%	66,8%
Zimbabwe	225	238	3,6%	5,8%
Autres	307	196	2,9%	-36,2%
Total	6 486	6 656	100,0%	2,6%

On constate que la situation est un peu moins concentrée que pour le platine, la Russie partageant la tête du classement avec la RSA. Les platinoïdes extraits au Zimbabwe sont raffinés en RSA.

2.3 Les trois principaux producteurs primaires

Le premier producteur de palladium est le groupe russe **Norilsk Nickel**, avec des ventes de 2 715 kOz de palladium en 2011 (légère baisse par rapport aux 2 813 kOz de 2010) [12] ; les ventes du groupe en 2011 comprenaient également 296 000 t de nickel, 371 000 t de cuivre et 667 kOz de platine. Contrairement aux producteurs sud-africains, Norilsk produit plus de palladium que de platine.

Les deux producteurs suivants sont deux groupes sud-africains :

AngloAmerican Platinum (Amplats), qui a produit en 2011 1 431 kOz de palladium raffiné, dont 1 122 provenant de ses mines et 309 provenant de concentrés achetés à ses JV, ses associés ou des tierces parties [6]. Sa production 2010 était de 1 449 kOz de palladium.

Impala Platinum (Implats), qui a produit en 2011¹⁶ 1 192 kOz de palladium raffiné (pour 1 238 en 2010)

On peut également citer le nord-américain **Stillwater Mining Company** (399 kOz de palladium en provenance de ses deux mines), les sud-africains **Lonmin** (373 kOz de palladium en 2011), **Aquarius Platinum** (156 kOz dans les concentrés) et **Northam** (91 kOz), etc.

Figure 8 : Production de platine et de palladium des principaux producteurs en 2011 (source : rapports annuels)

Production de métal raffiné 2011 (Moz)	Pt	Pd
Norilsk (Russie)	0,667	2,715
Amplats (RSA)	2,530	1,431
Implats (RSA)	1,836	1,192
Stillwater Mining Company (USA)	0,119	0,399
Lonmin (RSA)	0,731	0,373
Aquarius Platinum (RSA)	0,277	0,156
Northam (RSA)	0,197	0,091

2.4 Recyclage

Le recyclage est une composante importante de l'offre globale.

Figure 9 : Volume du recyclage de palladium (selon [1])

Recyclage Pd, kOz	2007	2010	2011	% var 2011-2010
Catalyse auto	1 015	1 310	1 655	26,3%
Electricité/électronique	315	440	480	9,1%
Joaillerie	235	100	210	110,0%
Total	1 565	1 850	2 345	26,8%

¹⁶ Année fiscale : 1^{er} juillet 2010 - 30 juin 2011.

La forte augmentation du recyclage de catalyseurs auto en 2011 provient du redémarrage des ventes de véhicules neufs, en particulier en Amérique du Nord, à la sortie de crise ; à cette occasion le nombre de véhicules retirés du marché a augmenté ; les véhicules détruits en 2011 avaient été vendus au cours des années 1996-2007 pour la moitié d'entre eux.

Le recyclage de palladium à partir d'équipements électriques et électroniques est plus important que pour le platine.

En 2011, le recyclage a donc représenté 35 % de la production minière.

Les entreprises spécialisées dans le recyclage du platine sont les acteurs de la catalyse cités plus haut : Johnson Matthey, BASF, Umicore, à côté desquelles on trouve des fonderies. Aux USA, Stillwater Mining Company effectue du recyclage dans son usine de raffinage, en parallèle avec le traitement de ses concentrés (production de platinoïdes issus du recyclage en 2011 [10] : palladium 271,3 kOz ; platine : 180,3 kOz ; rhodium : 35,1 kOz).

2.5 Bilan offre-demande

L'offre totale de palladium raffiné est la somme des ventes des producteurs primaires, des ventes du stock russe et du recyclage.

Figure 10 : Bilan offre-demande de palladium, 2007-2010-2011

Bilan offre-demande de Pd (kOz)	2007	2010	2011	% demande 2011
Ventes des producteurs primaires hors stocks russes	7 090	6 355	6 585	77,9%
Ventes du stock russe	1 490	1 000	775	9,2%
Recyclage	1 565	1 850	2 345	27,8%
Total de l'offre	10 145	9 205	9 705	114,9%
Demande	8 395	9 735	8 450	100,0%
Variation de stocks	1 750	(530)	1 255	14,9%

Les variations de stocks sont les variations des stocks dans les étapes intermédiaires de la chaîne de valeur, n'incluant ni les stocks chez les producteurs primaires ni les stocks contrôlés par le gouvernement russe, ni les stocks chez le consommateur final. On remarque les fluctuations de stocks importantes : diminution des stocks en 2010, forte augmentation en 2011 (près de 8 semaines de consommation).

2.6 Substitution

Le palladium possède des propriétés voisines de celles du platine, tout en étant nettement moins cher ; chaque fois que possible, il est donc utilisé en substitution au platine (voir §1.3 et l'étude sur le platine, en particulier pour ce qui concerne la catalyse automobile).

Dans la joaillerie, le palladium souffre d'un déficit d'image, il est moins connu que l'or et ses alliages (le palladium entre dans la composition de certains alliages d'or blanc) et le platine ; en cas de crise, il est concurrencé par des solutions moins chères.

Dans le secteur électricité / électronique, pour la principale application du palladium, les condensateurs multicouches, il est remplacé par le nickel dans les applications les moins exigeantes ; inversement, il remplace l'or dans certaines applications grand public (smartphones, tablettes), présentant l'avantage d'être moins cher et moins dense ; le développement des alliages pour soudeuse sans plomb a également été favorable au palladium.

Dans la dentisterie, où le marché global a tendance à décroître grâce à la progression de l'hygiène et de la prévention, il est concurrencé par la céramique et des métaux plus ordinaires.

2.7 Évolution des prix

Le palladium est coté sur les marchés des métaux précieux. Au 4 juin 2012, son cours était de 613,50 US\$/Oz.

Figure 11 : Évolution du cours du palladium du 4 janvier 2002 au 4 juin 2012



Étant donné que le palladium peut substituer le platine dans certaines applications de la catalyse automobile, il est intéressant de comparer l'évolution des cours de ces deux métaux.

Figure 12 : Évolution comparée des cours du platine (échelle de gauche) et du palladium (échelle de droite)



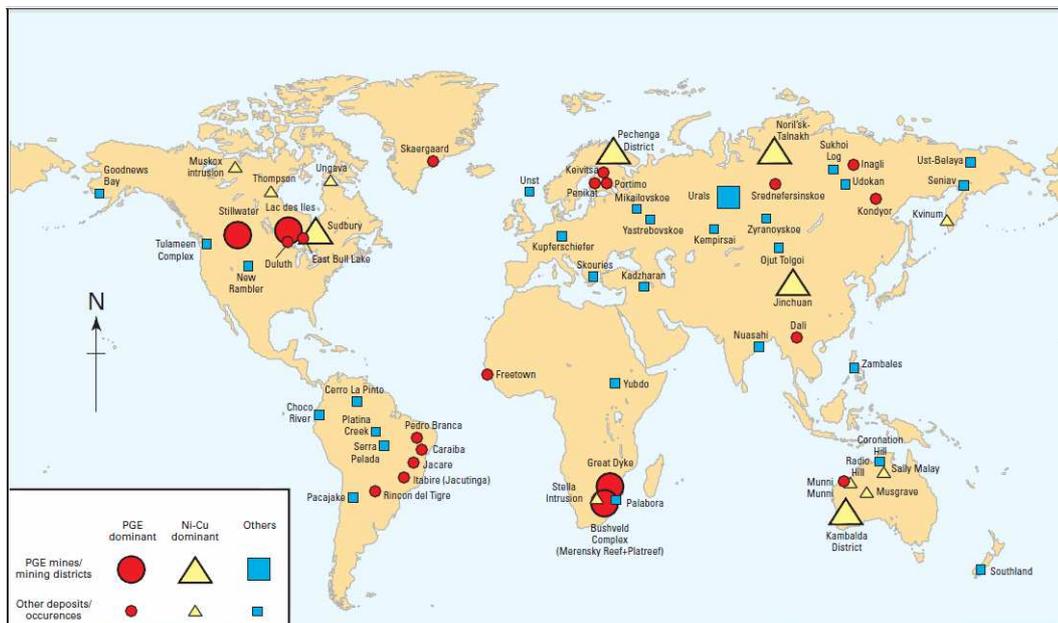
3- Contraintes sur l'offre et projets de développement

3.1 Réserves et ressources mondiales, répartition

L'USGS [3] estime les réserves mondiales de platinoïdes à 66 Millions de kg, soit 2 122 MOz, dont 95 % en RSA, et les ressources à plus de 3 200 MOz.

Le BGS [5] donne une carte des districts et gisements miniers de platinoïdes.

Figure 13 : Situation des districts miniers et gisements [5] (PGE = éléments du groupe du platine)



Les principaux producteurs publient leurs réserves et ressources dans leurs rapports annuels ; en voici quelques exemples :

Figure 14 : Réserves et ressources publiées par les principaux producteurs

kOz	Réserves et ressources des principaux producteurs		
Norilsk Nickel	Réserves (Prouvées + probables)	Ressources (mesurées + indiquées)	[11]
Pt	16 171	38 667	
Pd	61 176	135 459	
Amplats	Réserves (Prouvées + probables)	Ressources (mesurées + indiquées + Inférées), hors réserves	[6]
4E (4E = Pt+Pd+Rh+Au)	180 800	649 700	
Implats	Réserves (Prouvées + probables)	Ressources (mesurées + indiquées + Inférées), incluant réserves	[13]
Pt	36 900	225 000	
Pd	22 300	145 000	
Lonmin	Réserves (Prouvées + probables)	Ressources (mesurées + indiquées + Inférées), incluant réserves	[8]
Pt	25 700	97 600	
4E (4E = Pt+Pd+Rh+Au)	43 400	175 400	
Stillwater	Réserves (Prouvées + probables)		[10]
Mines du Montana (USA)			
Pt	4 365		
Pd	15 614		
Projet Marathon (Canada)			
Pt	700		
Pd	2 400		

Avec une demande actuelle de palladium (hors solde de l'investissement) de 9 000 kOz/an, dont un quart est assuré par le recyclage, les réserves et ressources identifiées suffiraient théoriquement à assurer la production pour plusieurs dizaines d'années. La question qui se pose est de savoir si suffisamment d'extensions et de projets nouveaux seront mis en place pour exploiter ces ressources.

3.2 Projets miniers

La liste (non exhaustive) des projets miniers étudiés pour les platinoïdes est la même que celle figurant dans l'étude platine.

Figure 15 : Liste de projets miniers pour les platinoïdes avec leurs caractéristiques principales

PROJETS PLATINE	Projets Greenfield	Etapas décisionnelles	Démarrage annoncé production	Capacité visée		Réserves	Ressources	Vie
				Minéral	Platinoïdes			
Anglo Platinum								
Unki Platinum (Zimbabwe)	x	Production Démarrée	Jan 2011	1,4 Mt/an	175 000 Oz/an 4E	4,74 MOz 4E	10,5 MOz 4E	> 2038
Twickenham (RSA)	x	Approbation investissement fin 2012	2016-2017	3 Mt/an en 2019			76,8 MOz 4E	
Der Brochen (RSA)	x	Faisabilité en 2014					64,0 MOz 4E	
Impala Platinum								
Zimplats phase 2 (Zimbabwe)		Investissement en cours	2013		+ 180 000 Oz/an Pt			
Rustenburg puits 20,16,17 (RSA)		Investissement en cours	2013/2014/2017		500 000 Oz/an Pt			
Afplats (RSA)	x	Exploration en cours					23 Moz Pt 10,3 MOz Pd 4,4 MOz Rh	
Lonmin								
Marikana nouveaux puits (RSA)		Investissement en cours			+ 250 000 Oz/an Pt		68,4 MOz Pt 114,4 MOz 4E	
Akanani (RSA)	x	Exploration et études en cours					10,9 MOz Pt 26,7 MOz 4E	
Northam								
Booyendal	x	Investissement en cours	2013			3,0 MOz 4E	103,0 MOz 4E	> 50 ans
Dwaalkop (avec Lonmin)	x	Exploration en cours				5,7 MOz 4E	17,8 MOz 4E	
Xstrata								
Eland (RSA)		Extensions souterraines	Non précisé					
Stillwater Mining Company								
Marathon (Canada)	x	Etude d'impact en cours			200 000 Oz Pt/an	2,45 Moz Pt		
Norisik Nickel								
Selkirk open pit (Botswana)							2,3 Moz 4E	
Eastern Platinum								
Mareesburg (RSA)	x	Investissement en cours ; suspendu le 30/5/2012	2013 (?)		300 000 Oz/an 4E		2,0 Moz 3E	
Platinum Australia								
Smokey Hills (RSA)	x		2012	0,6 Mt/an	90 000 Oz/an 4E		0,822 MOz 4E	
Kalahari Platinum (Kalplats) (RSA)	x	Etude définitive de Faisabilité nov 2011	2015	1,5 Mt/an	120 000 Oz/an 3E		6,7 MOz 3E	> 10 ans
Rooderand (RSA)	x	Etude définitive de Faisabilité mi 2012	2014	1,2 Mt/an	115 000 Oz/an 4E		4,2 MOz 4E	
Panton (Australie) Projet cédé à Panoramic Precious Metals	x	Etude faisabilité en cours		0,6 Mt/an	90 000 Oz/an PGM		2,4 MOz PGM	
Sylvania Platinum								
Northern Limb Projects (RSA)	x	Exploration	2018					
Everest North (RSA)	x	Etude détaillée en cours	2014		165 000 Oz/an PGM à terme pour les 3 projets		0,77 MOz PGM	
Volspruit (RSA)	x	Etude préliminaire faisabilité en cours	2016	0,3 Mt/an			3,55 MOz PGM	
Wesizwe Platinum								
Bakubung (RSA)	x	Préparation du site en cours	2018 (pleine capacité 2023)		350 000 Oz/an 4E		13,5 MOz 4E	> 35 ans
Maseve 1 (RSA) 26 %	x	Etudes infrastructure en cours			275 000 Oz/an 4E		2,44 MOz 4E	

Notes : 1- les sociétés ne publient pas leurs tonnages de façon uniforme ; on trouve donc des volumes exprimés en platine (Pt), en platinoïdes (PGM), en Platine + Palladium + Rhodium (3E), en Platine + Palladium + Rhodium + Or (4E)
2- Le signe x indique les volumes supplémentaires procurés par une extension
3- Greenfield = installation sur un site vierge
4- Abréviations : 1 Mt = 1 000 000 t ; 1 MOz = 1 000 000 Oz

Cependant, les difficultés croissantes rencontrées par les producteurs sud-africains limitent considérablement leur capacité à investir dans les extensions de capacité sur les sites existants ou dans des projets sur des sites vierges (greenfield).

En effet, la situation politique et sociale en RSA et au Zimbabwe fait que sur les dernières années les mines se heurtent à de plus en plus de contraintes et de perturbations, dues aux exigences croissantes de l'environnement politique et social, et tournent en deçà de leur capacité ; par ailleurs l'évolution des conditions techniques d'exploitation de certaines mines en RSA (approfondissement, baisse des teneurs) et les augmentations du prix de l'électricité et des salaires conduisent à l'augmentation rapide de leurs coûts de production, et réduisent la rentabilité future des projets. La réévaluation constante du rand par rapport au dollar vient encore dégrader les rentabilités des opérateurs sud-africains.

En Afrique du Sud, la rentabilité des mines dépend du prix du platine ; la plupart des projets demanderaient des prix du platine sensiblement supérieurs à 2 000 \$/t de façon durable pour justifier leur réalisation [14]. Il en résulte que les producteurs existants n'investissent pas suffisamment pour assurer le maintien de la production.

Pour ce qui est de la Russie, on trouve dans [1] une description détaillée des projets de développement de la production minière de platinoïdes. La conclusion en est relativement pessimiste. Norilsk se trouve confronté à l'épuisement de ses meilleures réserves et doit exploiter des minerais moins riches et plus disséminés. Le démarrage effectif des projets de développement est considéré comme incertain, et ils ne sont pas capables de compenser rapidement la baisse de la production des sites en exploitation. Seuls quelques projets sont capables à terme d'apporter des volumes significatifs en supplément du volume actuel, mais ils exigent des investissements importants et, une fois financés, demanderont du temps avant d'atteindre leur capacité nominale.

Globalement, les projets qui se réaliseront dans les prochaines années vont compenser partiellement les baisses de production des sites existants, de sorte que la production primaire de palladium, comme celle du platine, va passer par un pic.

4- Analyse de quelques facteurs de criticité

4.1 Rareté relative des ressources minières

Bien que le palladium soit un métal rare, les ressources minières identifiées suffisent aux besoins (nets du recyclage) pour plusieurs dizaines d'années. La difficulté potentielle réside dans la mise en place et l'exploitation (rentable) des moyens d'extraction, et c'est là que réside le risque (élevé) de pénurie.

4.2 Concentration dans la chaîne de production

La forte concentration géographique des réserves et de la production minière en Russie et en RSA, alors que les conditions d'exploitation y deviennent plus difficiles, et que les investissements de renouvellement sont insuffisants, est en soi un facteur de forte vulnérabilité.

À l'étape de production des catalyseurs destinés à l'imprégnation des pots catalytiques, trois acteurs principaux, Johnson Matthey, BASF et Umicore, se trouvent

être des groupes européens. Tant qu'ils ont accès aux platinoïdes nécessaires, il n'apparaît *a priori* pas de risque sérieux à ce stade de la chaîne de valeur.

4.3 Importance pour la filière automobile

Le palladium est un élément incontournable des pots catalytiques indispensables au respect des normes environnementales s'imposant aux véhicules à moteur à combustion interne. Son importance croît au fur et à mesure qu'il prend des parts de marché au platine.

En sens inverse, les véhicules électriques n'ont pas besoin de pots catalytiques. Si les piles à combustible deviennent une source d'électricité significative, le palladium peut y trouver un nouveau point d'application aux côtés du platine.

5- Scénarios¹⁷ prospectifs à 10 ans

5.1 Scénario d'évolution de la demande

La demande de platinoïdes du secteur automobile est tirée par la croissance de la production de véhicules et l'application de normes environnementales de plus en plus exigeantes (passage à Euro VI), avec un effet de mix motorisation et région jouant de façon complexe sur le rapport platine / palladium, par exemple :

- recours accru au palladium dans les motorisations essence ;
- augmentation de la proportion de la motorisation Diesel des véhicules individuels dans certaines régions (Europe : 35 % du parc en 2010 ; France : 71 % des immatriculations de voitures neuves en 2010) ;
- émergence rapide de solutions incorporant le palladium pour les motorisations Diesel ;
- à terme, croissance de la proportion de véhicules électriques dans la production.

Nous pensons que la croissance attendue de la demande de platinoïdes pour la catalyse automobile profitera essentiellement au palladium et moins au platine.

Nous utilisons des prévisions de croissance de la production automobile de 5,3 % en moyenne mondiale, dont plus de la moitié (57 % de l'accroissement) en Asie. La demande de palladium devrait croître à un rythme supérieur.

En ce qui concerne les autres applications, au cours de la période 2007-2011, la demande pour la chimie a crû au rythme moyen de 4,4 % malgré la crise ; la demande du secteur électronique a baissé au rythme de -2,9 % par an, celle du secteur dentaire au rythme de -3,3 % par an.

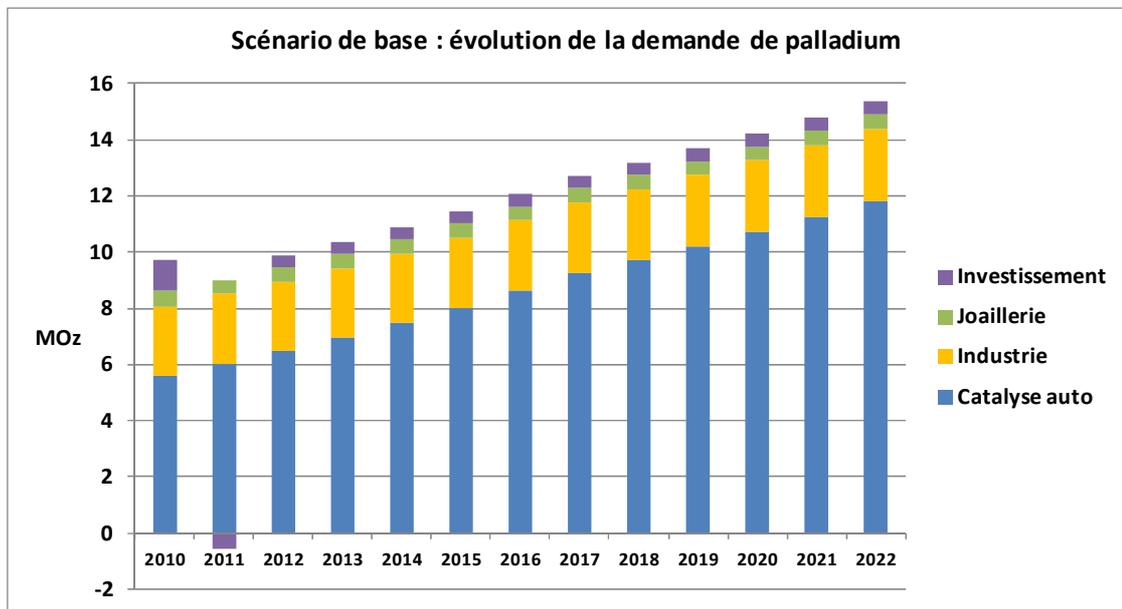
Les demandes pour la joaillerie et l'investissement sont comme d'habitude difficiles à prévoir ; la demande pour la joaillerie dépend de l'image du palladium (actuellement plutôt un déficit d'image par rapport à l'or et au platine), des prix relatifs des métaux précieux, et de l'ambiance économique générale ; la demande pour l'investissement

¹⁷ Rappelons qu'un scénario n'est pas une prédiction.

peut être très volatile, dépendant des perspectives de prix futurs et pouvant devenir négative certaines années (comme en 2011).

Dans notre scénario de base, nous retiendrons une croissance tendancielle de 7,4 % pour la demande de la catalyse auto en début de période, pour intégrer l'adoption de normes plus contraignantes, puis un rythme de 5 % par an ; une croissance de 4 % par an pour la demande du secteur de la chimie ; une demande étale pour le secteur électronique, les développements étant compensés par la concurrence d'autres métaux comme le nickel ; un recul régulier du secteur dentaire ; une demande constante pour la joaillerie, car nos scénarios font apparaître une tendance à une hausse sensible des prix ; un retour à un solde positif en 2012 puis une hausse régulière de la demande pour investissements. La catalyse auto resterait, et de loin, le facteur prépondérant de la demande.

Figure 16 : Scénario d'évolution de la demande globale en palladium

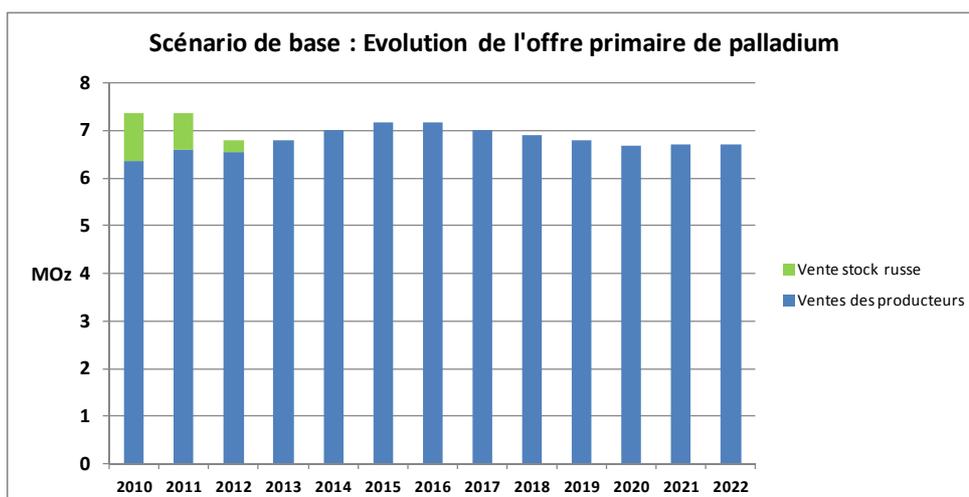


5.2 Scénario d'évolution de l'offre

Offre primaire : Comme expliqué plus haut, les investissements sont insuffisants, et même si leur niveau remontait subitement, le temps de réponse est tel que la production primaire de palladium devrait passer par un pic au cours des dix prochaines années. Par ailleurs, il semble bien que les dernières ventes du stock russe aient lieu en 2012. Ainsi, selon les experts du SFA Oxford, compte tenu de l'épuisement de réserves des exploitations en cours, ainsi que des projets d'extension ou de nouvelles mines susceptibles de se réaliser, le pic pourrait se situer vers 2015-2016 [9].

Nous retiendrons pour notre scénario de base un tel scénario de **pic de l'offre primaire**.

Figure 17 : Scénario d'évolution de l'offre primaire de palladium



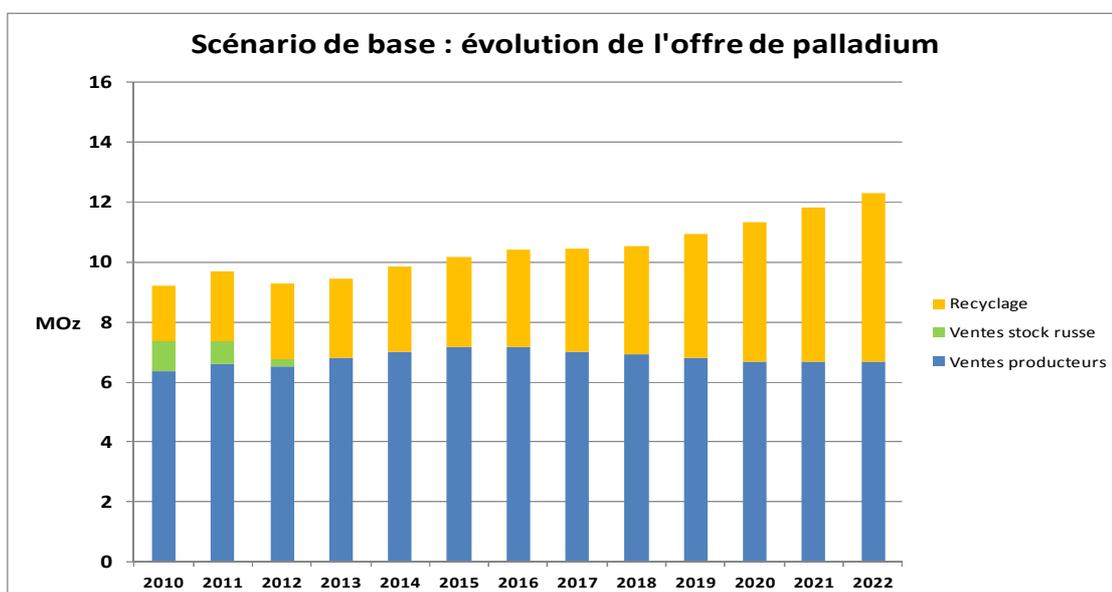
Recyclage : En 2011, le volume de palladium recyclé représentait 27 % de la demande.

Le volume issu du recyclage des pots catalytiques devrait augmenter rapidement au cours de la période, en raison de l'arrivée en fin de vie de plus en plus de véhicules équipés de pots catalytiques et de l'amélioration du taux de récupération. Nous supposons qu'en 2022 le recyclage des métaux précieux contenus dans les pots catalytiques pourrait atteindre 75 % : nos hypothèses conduisent à une augmentation du volume recyclé dans ce secteur jusqu'à environ 4,9 MOz en 2022 (ce qui représente 75 % de la demande 2012 pour la catalyse auto). Le volume recyclé à partir des DEEE croîtrait peu à peu, et le recyclage dans la joaillerie suivrait la demande.

Scénario d'évolution de l'offre totale :

L'offre totale est la somme de l'offre primaire et du recyclage.

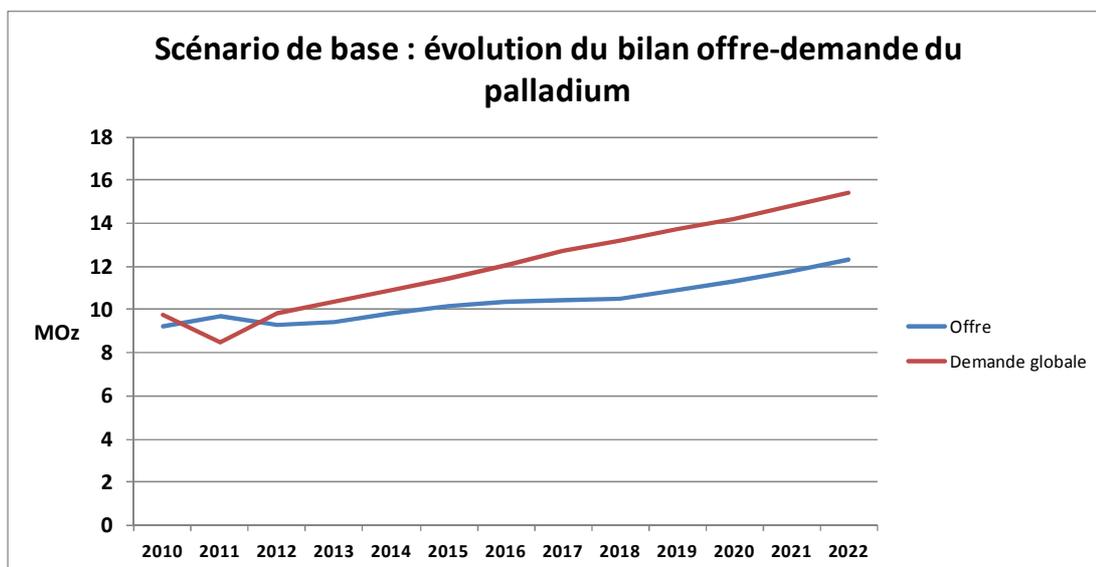
Figure 18 : Scénario de base : évolution de l'offre totale de palladium



L'offre globale baisserait en 2012, en raison de la réduction des ventes du stock russe ; puis elle plafonnerait sur la période 2015-2017, avant de repartir à la hausse grâce au recyclage, et malgré la baisse de l'offre primaire.

5.3 Évolution du bilan offre-demande

Figure 19 : Bilan offre-demande de palladium 2010-2022



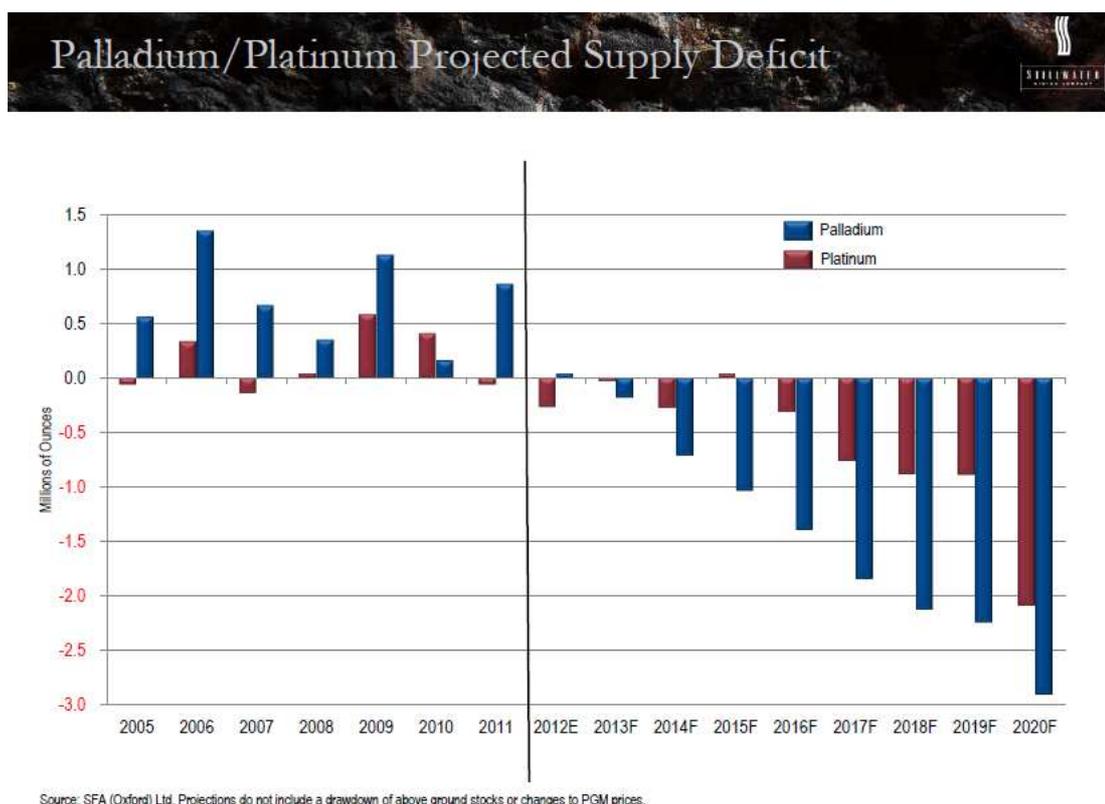
5.4 Analyse du scénario de base

Avec les hypothèses retenues, et en particulier la croissance très rapide de l'utilisation du palladium dans la catalyse automobile, le marché serait en déficit dès 2012 (d'environ 0,5 - 0,6 MOz) ; sur une année, voire deux, les stocks le long de la chaîne, qui ont été renforcés en 2011 (+1,2 MOz), devraient permettre de faire face à la situation, sans exclure de possibles problèmes pour tel ou tel acteur.

Par contre, on constate que le déficit serait durable, ce qui entraînerait une forte hausse des prix du palladium et poserait des problèmes d'approvisionnement physique. Le déficit avoisinerait les 3 MOz sur 2019-2022.

À titre de comparaison, la figure suivante, extraite de la présentation faite en avril 2012 aux actionnaires de Stillwater Mining Company, expose le même type de conclusion : déficit croissant de palladium, approchant 3 MOz en 2020.

Figure 20 : Projections de déficit pour le platine et le palladium (source : [9])



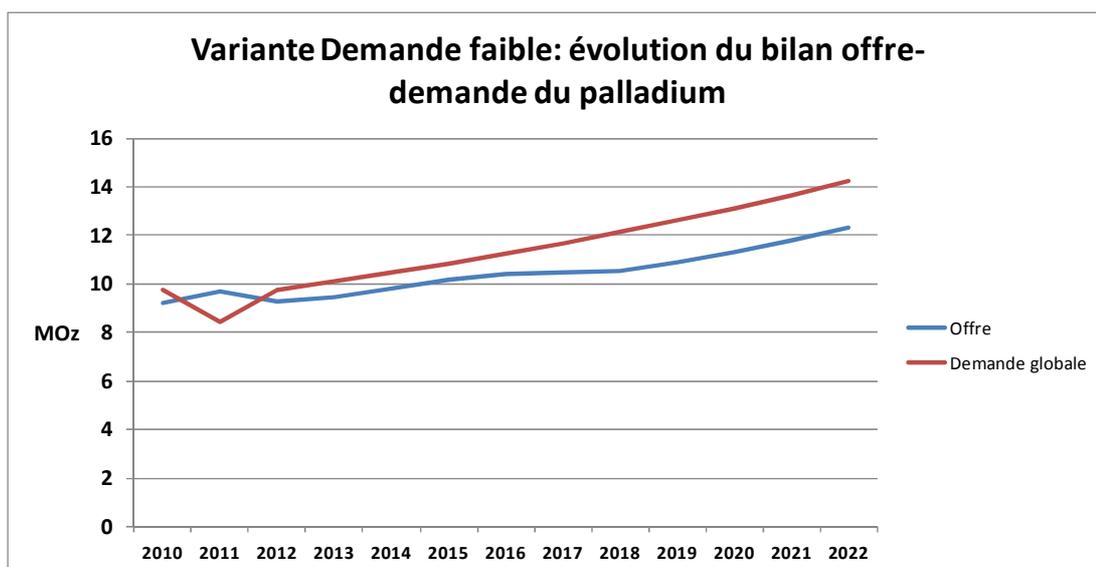
Si, de plus, les problèmes rencontrés en Afrique du Sud et au Zimbabwe, qui représentent 41 % de la production minière, se poursuivaient, la situation de l’approvisionnement de l’industrie des pots catalytiques deviendrait critique.

Des effets de rétroaction peuvent intervenir sur le facteur demande : baisse de la demande pour la joaillerie, mais la proportion en est faible et n’est pas à la hauteur du problème à terme. Inversement, la demande pour investissement pourrait être stimulée par les perspectives de forte augmentation du cours du métal. Le recours croissant au palladium pour remplacer le platine dans la catalyse pourrait être freiné ; mais (voir étude sur le platine et figure ci-dessus) le platine est confronté aux mêmes problèmes.

5.5 Variante « demande faible » :

Dans cette variante, nous supposons que la demande pour la catalyse automobile ne croîtrait qu’au rythme de la production mondiale de véhicules, soit 5,3 % par an. Le marché reste en déficit sur toute la période, même si le déficit est moins important.

Figure 21 :Évolution du bilan offre-demande dans la variante « demande faible ».



5.6 Pistes pour anticiper les risques de pénurie / tension sur les prix

Le risque de goulot d'étranglement ne se situe pas au niveau des producteurs de pots catalytiques pour l'automobile, mais au niveau de leur approvisionnement en palladium.

Les ressources minières sur le sol européen sont faibles, le gros des ressources se trouvant en Russie et en République sud-africaine.

Les producteurs sud-africains sont confrontés à des problèmes importants, provoquant des arrêts de production, un renchérissement constant des coûts, et un manque de rentabilité des projets de développement. La Russie voit ses meilleurs gisements s'épuiser. Les projets de développement probables sont insuffisants pour maintenir à terme le volume de production primaire.

Malgré l'accroissement de la quantité de palladium provenant du recyclage, le risque sur les approvisionnements est non seulement réel mais proche. Les prix du palladium devraient augmenter rapidement.

Face à cela, les pistes que l'on peut évoquer sont les suivantes :

- À très court terme, renforcer les stocks ;
- Poursuivre les efforts de recherche-développement pour réduire la quantité de platinoïdes par pot catalytique nécessaire pour atteindre les objectifs de contrôle des émissions des véhicules ;
- Améliorer encore la récupération et le recyclage du palladium dans les VHU et DEEE ;
- Pour les acteurs s'approvisionnant en palladium, participer à des projets d'extension ou de développement de nouveaux gisements (le dernier point est une action ne portant ses fruits qu'à long terme) avec des contrats garantissant des volumes.

Bibliographie

- [1] “Platinum 2012”, Johnson Matthey, May 2012
- [2] « L’industrie automobile française, Analyse et statistiques 2011 », rapport annuel du CCFA
- [3] « Platinum-Group Metals », Minerals Commodity Summaries, U.S.Geological Survey, January 2012. Accessible en ligne :
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/platinum/mcs-2012-plati.pdf>
- [4] « World Mineral Production 2006-2010 », British Geological Survey, January 2012
- [5] « Platinum », BGS Profile, British Geological Survey, Septembre 2009
- [6] Anglo American Integrated Annual Report 2011
- [7] Implats Condensed audited consolidated annual results, Year ended 30 June 2011
- [8] Lonmin Plc Annual Report and Accounts for the year ended 30 September 2011
- [9] Stillwater Mining Company, Annual Shareholders Meeting, April 26, 2012, et presentation, May 2012
- [10] Stillwater Mining Company 2011 Annual Report
- [11] “Metals in Our Lives”, Annual Review of MMC Norilsk Nickel for 2010
- [12] Présentation des résultats 2011, OJSC MMC NORILSK NICKEL, 6 Juin 2012
- [13] Implats Mineral Resource and Mineral Reserve statement 2010
- [14] Creamer, M., “Platinum’s slide down slippery supply slope has begun – SFA Oxford”, miningweekly.com, 8th February 2011
- [15] Aquarius Platinum, Annual report 2011

LITHIUM (Li)

- Batteries pour véhicules hybrides et électriques

- Alliages aluminium-lithium pour l'aéronautique

28 août 2012

Avertissement : la présente note est rédigée dans le cadre d'une étude précise, elle ne prétend donc en aucun cas à l'exhaustivité.

Résumé :

Le lithium est un métal extrêmement léger et très réactif, utilisé pour de nombreuses applications, depuis le verre et les céramiques jusqu'à la chimie et la pharmacie, en passant par la lubrification et les piles et batteries.

Sa consommation mondiale serait de l'ordre de 20 à 25 000 t par an (les chiffres diffèrent selon les sources) ; les quantités sont souvent exprimées en carbonate de lithium, 25 000 t de l'élément lithium correspondant à environ 130 000 t de carbonate.

Il est extrait soit de saumures produites sur les sites d'anciens lacs salés, soit de gisements contenant des minéraux tels que le spodumène. Les ressources géologiques sont importantes, en particulier en Amérique du Sud (Bolivie, Chili, Argentine).

Les applications que nous examinons plus particulièrement dans cette étude sont les batteries au lithium pour l'automobile (véhicules hybrides et électriques), et les alliages aluminium-cuivre-lithium pour l'aéronautique.

Le potentiel de développement des batteries au lithium est très important ; le point clé est de savoir à partir de quel moment le décollage du marché des véhicules électriques et hybrides représenterait des quantités significatives ; un simple décalage de quelques années a des conséquences importantes sur la croissance de la consommation de lithium. Une autre application qui pourrait se développer est le stockage de masse d'électricité.

Les alliages aluminium-lithium représentent pour les producteurs d'alliages d'aluminium un moyen de reconquérir une partie de la part du marché aéronautique perdue au profit des composites et du titane ; les volumes concernés sont moins importants que pour les batteries automobiles.

Nos scénarios conduiraient à l'horizon de 10 ans à une consommation (exprimée en carbonate de lithium) comprise entre 240 000 t et 436 000 t, avec un scénario de base à 335 000 t.

Devant cette forte croissance, les projets de nouvelles capacités se sont multipliés ; si l'on accordait foi à toutes les dates de démarrage annoncées, la croissance de l'offre d'ici 2017 serait beaucoup trop rapide par rapport à celle de la demande, conduisant à un excédent considérable : dès 2017, l'offre serait capable de satisfaire un niveau de demande correspondant à notre variante haute pour 2022. Il est donc très probable que beaucoup de projets seront repoussés.

Sauf développement extrêmement rapide à la fois des véhicules électriques et hybrides et du stockage de masse d'électricité avec des batteries au lithium, le risque de pénurie dans les années à venir semble donc faible. Tendanciellement, les prix ne devraient augmenter qu'à un rythme correspondant aux augmentations de coûts (incluant la rentabilisation des augmentations de capacité) ; si des projets trop nombreux étaient lancés trop tôt, les prix pourraient baisser.

L'Europe restera cependant dépendante des autres continents pour ses approvisionnements en matières premières à base de lithium.

Il serait donc de bonne politique pour les producteurs de batteries au lithium de sécuriser leurs approvisionnements, par des accords de participation ou des contrats à long terme avec des producteurs de matières premières.

La « seconde vie » des batteries ainsi que le développement du recyclage du lithium (et des autres métaux) des batteries sont à promouvoir, aussi bien pour des raisons de prolongation des ressources que de protection de l'environnement.

1- Demande : produits et utilisations

Le lithium est le premier élément du tableau de Mendeleïev qui soit solide à température ambiante. C'est le plus léger des métaux, avec une densité de 0,534. Il est très réactif et réagit avec l'eau ; on ne le trouve pas à l'état métallique dans la nature.

1.1 Produits intermédiaires

Le lithium et ses dérivés sont produits à partir de deux sources de matières premières :

- les saumures (mélanges de chlorures de différents métaux), essentiellement d'anciens lacs salés (le lithium est sous forme de chlorure, mélangé à d'autres chlorures dont certains sont valorisés comme le chlorure de potassium pour les engrais : potasse), mais on étudie aussi les saumures d'origine géothermale, ou trouvées dans les gisements pétroliers ;
- les roches contenant des minéraux tels que lépidolite, spodumène¹⁸, pétalite. Jusqu'au démarrage de la production de carbonate de lithium à partir de saumures au Chili en 1997, la production de carbonate de lithium était essentiellement effectuée à partir de spodumène.

Dans les deux cas, un poste important de coût est le carbonate de sodium Na_2CO_3 utilisé pour précipiter le carbonate de lithium Li_2CO_3 .

¹⁸ Silicate d'aluminium et de lithium contenant 8 % d'oxyde Li_2O .

D'autres sources de lithium sont à l'étude : une argile, l'hectorite ; la jadarite, un minéral découvert en Serbie par Rio Tinto ; l'eau de mer (recherches coréennes [2]).

Les tonnages sont souvent exprimés en Equivalent Carbonate de Lithium Li_2CO_3 ; le carbonate contient environ 18,7 % de lithium.

Le lithium est vendu sous forme de saumures, de concentrés, de carbonates, de composés chimiques, de métal...

La société Rockwood Lithium, filiale de Chemetall, donne un tableau indiquant les utilisations des principaux dérivés du lithium, et un schéma récapitulatif de la chaîne de valeur à partir des saumures.

Le lithium métal, intermédiaire pour de nombreux composés et composant de certaines piles et batteries, est produit par électrolyse du chlorure de lithium en bain de sels fondus.

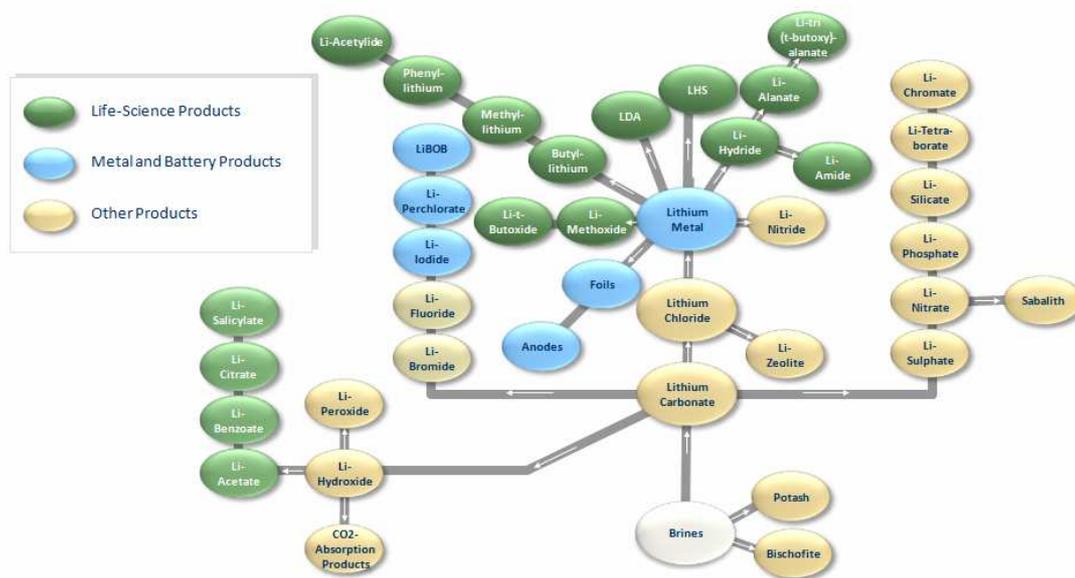
Figure 1 : Principaux dérivés du lithium et applications (source : site internet de Rockwood Lithium¹⁹)



¹⁹ <http://www.rockwoodlithium.com/applications/applications.en.html>

Figure 2 : Chaîne de valeur du lithium et de ses dérivés [10]

Lithium Value Chain



Rockwood
Powered by Lithium



Selon le produit souhaité, la chaîne de valeur peut être différente. Par exemple, la production d'hydroxyde, qui pourrait se développer pour les batteries lithium-ion-phosphate, ne nécessite pas le passage par le carbonate si le point de départ est le concentré de spodumène

1.2 Utilisations finales

Selon Roskill [3], le volume de la consommation mondiale en 2011 était de l'ordre de 138 000 t (en équivalent carbonate) ; à côté de la consommation, un volume d'environ 23 000 t de stocks a été constitué²⁰. La production aurait donc représenté un volume de 161 000 t (équivalent carbonate de lithium).

Roskill [3] et SQL [9] donnent des estimations de la décomposition de la consommation finale en 2011.

²⁰ En particulier, la société Galaxy Resources - voir ci-après -, a extrait du concentré de spodumène de sa mine australienne et l'a stocké en attendant le démarrage de son usine chinoise de carbonate.

Figure 3 : Estimation de la consommation finale par application, année 2011 (sources : Roskill [3] et SQM [9])

Année 2011	Roskill	Année 2011	SQM
Verre et céramiques	30%	Verre et émaux	26%
Batteries Li-ion	22%	Piles et Batteries	33%
Graisses (lubrification)	11%	Graisses (lubrification)	11%
Traitement de l'air	4%	Traitement de l'air	5%
Métallurgie	4%	Métallurgie	4%
Polymères	3%	Polymères	3%
Electrolyse aluminium	2%	Electrolyse aluminium	2%
Pharmacie	2%	Pharmacie	2%
Autres	22%	Autres	14%

Les deux principales applications sont l'industrie du verre et des céramiques, et les piles et batteries. La différence apparente entre les deux sources provient du fait que Roskill isole les batteries Li-ion (et les autres piles et batteries sont dans le poste « Autres »), alors que SQM regroupe toutes les applications piles et batteries. Les catégories concernant le verre et les céramiques n'ont pas non plus exactement le même contenu.

Verres et céramiques : l'oxyde de lithium est un composant traditionnel dans la production des verres, des émaux et des céramiques (carrelages, sanitaires, vaisselle), car il joue en particulier le rôle de fondant : il réduit la température de fusion du verre et la durée de séjour des pièces céramiques dans le four, donc la consommation de combustibles et les émissions de CO₂. Il contribue aussi à améliorer la qualité du produit final et sa résistance aux attaques chimiques.

Les concentrés de minéraux contenant de l'oxyde de lithium (spodumène) peuvent être introduits dans les matières premières, avec la silice, le feldspath (et les argiles pour les céramiques).

Électrolyse de l'aluminium : le carbonate de lithium est utilisé pour réduire la température de fusion de la cryolite, qui est un des composants du bain d'électrolyse. D'autres méthodes de production font reculer l'utilisation du lithium sur ce créneau.

Graisses au lithium : l'ajout de lithium confère aux graisses une meilleure résistance à la température et à l'humidité. Les graisses au lithium sont utilisées dans l'industrie lourde, le transport par rail, ainsi que dans des applications domestiques.

Conditionnement de l'air : les bromure et chlorure de lithium, extrêmement hygroscopiques, permettent d'assécher l'air ou d'autres gaz au contact de solutions de ces sels.

Pharmacie : le lithium est utilisé pour traiter des maladies psychiatriques ; il entre aussi dans certains traitements du HIV, de certains cancers. Il intervient (en particulier sous forme de butyllithium) dans des réactions de synthèse de produits pharmaceutiques.

Chimie : le caractère réducteur et la forte réactivité du lithium le font utiliser dans la synthèse de composés organiques. Il est également utilisé comme catalyseur dans la production de caoutchouc synthétique, de plastiques.

Métallurgie : le lithium intervient dans le procédé de coulée continue de l'acier (protection de l'acier contre l'oxydation).

Alliages d'aluminium pour l'aéronautique : le lithium est utilisé comme élément d'alliage pour une famille d'alliages aluminium-cuivre pour l'aéronautique, permettant à performances mécaniques identiques d'alléger les pièces produites (alliages Airware® de Constellium).

Piles : les piles (non rechargeables) au lithium courantes, piles boutons par exemple, utilisent : une anode en lithium ou alliage de lithium, de qualité piles (pureté Li > 99,8 %, teneurs en sodium, potassium, calcium, azote contrôlées) ; une cathode en dioxyde de manganèse ; un électrolyte composé d'un solvant et d'un sel de lithium. Pour d'autres applications (plutôt professionnelles) on emploie des piles lithium-chlorure de thionyle.

Batteries rechargeables : les batteries (ou accumulateurs) au lithium sont la source d'énergie dans la plupart des téléphones mobiles, les appareils photos et caméscopes, les ordinateurs portables, une grande partie des outils portables²¹ ; elles se substituent aux batteries nickel-cadmium, maintenant proscrites, et aux batteries nickel-hydrure de métal, bien que ces dernières résistent sur certains créneaux grâce à leur moindre coût.

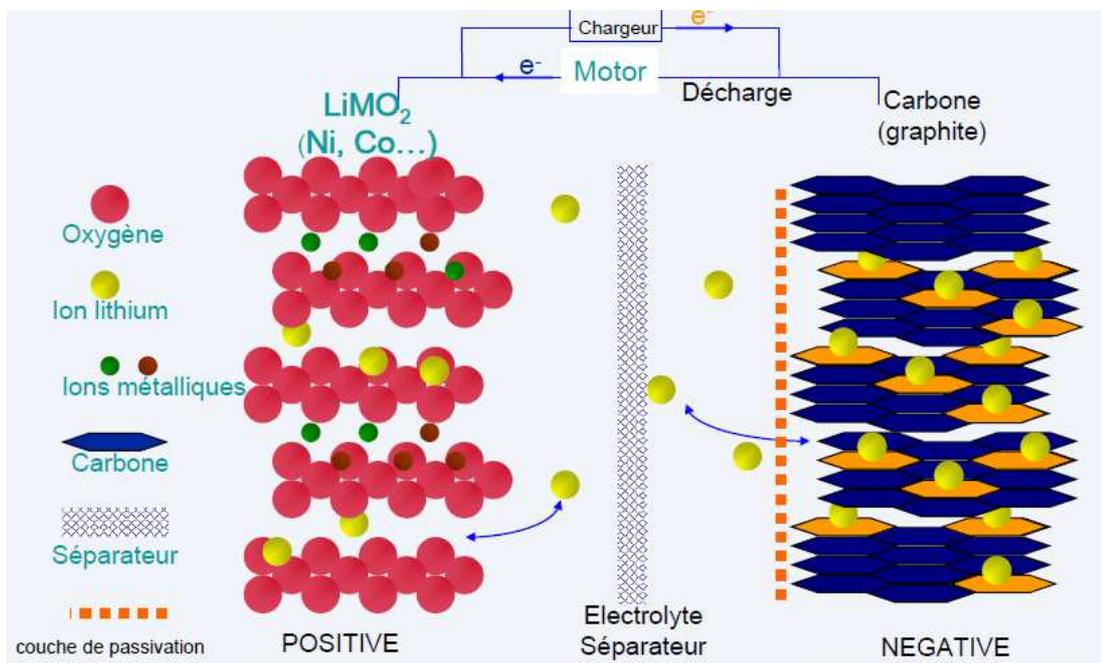
Les véhicules électriques (automobiles mais aussi deux-roues : voir par exemple l'essor des vélos à assistance électrique en Chine, pour l'instant surtout équipés de batteries au plomb) et peut-être aussi le stockage de masse de l'électricité d'origine renouvelable représentent un extraordinaire potentiel de développement pour les batteries au lithium.

La plupart des batteries au lithium actuelles sont du type **lithium-ion**. L'anode (électrode négative) est généralement en graphite, la cathode (électrode positive) en matériau associant le lithium à un oxyde d'un autre métal, voire à du phosphate de fer : LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMnO_2 , LiFePO_4 , $\text{Li}_2\text{FePO}_4\text{F}$, ... ; l'électrolyte qui contient

²¹ Les « 4C » : communication, camcorders, computers, cordless.

des ions lithium peut être liquide, ou solide dans la technologie lithium-ion polymère : polymère gélifié tel que LiPF_6 , LiBF_4 , LiClO_4 .

Figure 4 : Principe d'une batterie lithium-ion (source SAFT [5])



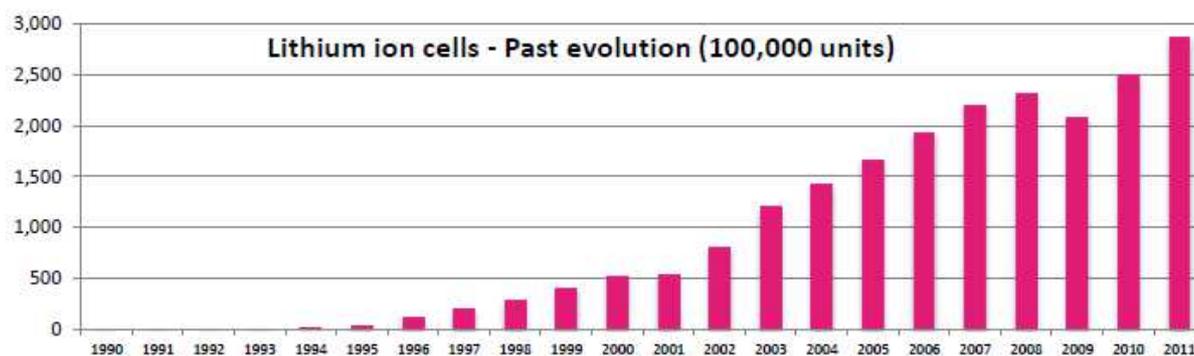
Dans une batterie Li-ion, la masse de lithium, en équivalent lithium métal, est de l'ordre de 2,5 % ; le lithium est contenu dans l'électrode positive pour 95 %, dans l'électrolyte pour 5 %. La masse de lithium (équivalent métal) est de [5] :

- Moins d'un gramme dans une batterie de téléphone
- Environ 10 g dans une batterie d'ordinateur
- 200 g dans un véhicule hybride, 3,3 kg dans un véhicule électrique
- 1,3 t pour un système de stockage de 8 MWh

Lithium Americas Corp [13] donne le contenu en carbonate par type d'équipement et l'évolution du nombre de batteries lithium-ions vendues. Les chiffres de carbonate contenu par équipement doivent être multipliés par 19 % pour être comparés aux chiffres précédents exprimés en lithium métal ; on constate alors que l'estimation pour les véhicules électriques et hybrides est plus élevée que celle donnée par [5] et [16] : 4 kg de Li métal pour un véhicule hybride, 28 kg pour un véhicule électrique.

Figure 5 : Batteries Li-ion : contenu en carbonate par type d'utilisation, et évolution du nombre de batteries vendues (source : [13])

Device	Wh	LC content (gr)
Mobile Phone	1.3	1.7
Smart Phone	1.6	2.1
Tablet	25.0	19.0
Laptop	50.0	37.0
Power Tool	2.0	39.0
e-bike	100.0	75.0
e-Scooter	400.0	300.0
e-Motorcycle	700.0	525.0
HEV	30,000.0	21,000.0
P-HEV	80,000.0	59,000.0
EV	200,000.0	149,000.0
Grid Storage Battery	32,000,000.0	23,600,000.0



La production des cathodes utilise comme matière première de départ le carbonate Li_2CO_3 , ainsi que l'hydroxyde monohydraté $\text{LiOH}(\text{H}_2\text{O})$, ce dernier prenant de l'importance avec les matériaux à forte teneur en nickel et le ferrophosphate. Les sels de lithium de l'électrolyte sont également produits à partir soit du carbonate soit de l'hydroxyde. Les qualités de carbonate et d'hydroxyde destinés aux batteries ont des exigences spécifiques de pureté et de granulométrie.

À titre d'exemple l'analyse chimique du carbonate qualité batteries de Rockwood Lithium est donnée ci-après, avec pour comparaison le carbonate « technique » ; la qualité batteries est fournie sous forme d'une poudre fine de granulométrie inférieure à $40 \mu\text{m}$.

Figure 6 : Carbonate qualité batteries et carbonate technique de Rockwood Lithium

Carbonate qualité Batteries

Chemical:	Guaranteed
Li ₂ CO ₃ *):	min. 99.8 %
Cl:	max. 0.015 %
K:	max. 0.001 %
Na:	max. 0.025 %
Mg:	max. 0.007 %
SO ₄ :	max. 0.05 %
Fe ₂ O ₃ :	max. 0.001 %
Ca:	max. 0.016 %
H ₂ O (200°C):	max. 0.35 %
calculated in dry substance	

Carbonate technique

	typical	guaranteed
Li ₂ CO ₃	99.4 %	min. 99.0 %
Cl	0.01 %	max. 0.015 %
K	0.0003 %	max. 0.001 %
Na	0.06 %	max. 0.08 %
Mg	0.004 %	max. 0.01 %
SO ₄	0.04 %	max. 0.05 %
Fe ₂ O ₃	0.001 %	max. 0.003 %
Ca	0.01 %	max. 0.016 %
Loss at 550°C	0.6 %	max. 0.75 %
H ₂ O (110°C)	0.14 %	-

On peut noter que le développement massif des cathodes incorporant du cobalt pourrait se heurter à des problèmes de prix et de disponibilité de ce métal. Les cathodes au phosphate de fer évitent ce problème et améliorent la sécurité de la batterie, au détriment de la conductivité.

Une autre technologie basée sur le lithium est celle des batteries **lithium métal polymère**, utilisant une anode en lithium, une anode en oxyde de vanadium et un électrolyte polymère solide (polyoxyéthylène + sels de lithium). Le groupe Bolloré utilise cette technologie.

1.3 Utilisation du lithium dans les batteries pour automobile

On distingue plusieurs types d'automobiles hybrides et électriques :

Véhicules hybrides : ils sont équipés d'un moteur thermique et d'un moteur électrique en complément ; le moteur électrique peut jouer le rôle de générateur pour recharger la batterie :

- Les micro-hybrides, avec un moteur thermique conventionnel (essence ou diesel), mais où le démarreur et l'alternateur classiques ont été remplacés par un moteur

électrique permettant au moteur thermique de s'arrêter lorsque le véhicule s'arrête et de redémarrer instantanément (*stop and start*) ;

- Les hybrides « doux » (mild) et « medium » où un moteur/générateur électrique a été interposé entre le moteur thermique et la transmission et fournit un complément d'énergie pour la propulsion du véhicule, avec récupération d'énergie au freinage ;
- Les hybrides « full », qui peuvent rouler avec le seul moteur électrique, avec bien entendu la fonction *stop and start* et la récupération d'énergie pour recharger la batterie au freinage et à la décélération ;
- Les hybrides rechargeables sur le secteur, dits « plug-in », dont la batterie peut être rechargée sur le secteur par exemple pendant les heures creuses ; mais si la batterie est déchargée, ils peuvent rouler grâce au moteur thermique.

Véhicules électriques : ils ne comportent plus de moteur thermique, la propulsion étant assurée uniquement par un dispositif de traction électrique. La batterie doit donc avoir une capacité suffisante pour assurer au véhicule une autonomie en rapport avec le type d'usage visé.

Figure 7 : Nomenclature des voitures hybrides et électriques (source : INERIS [4])

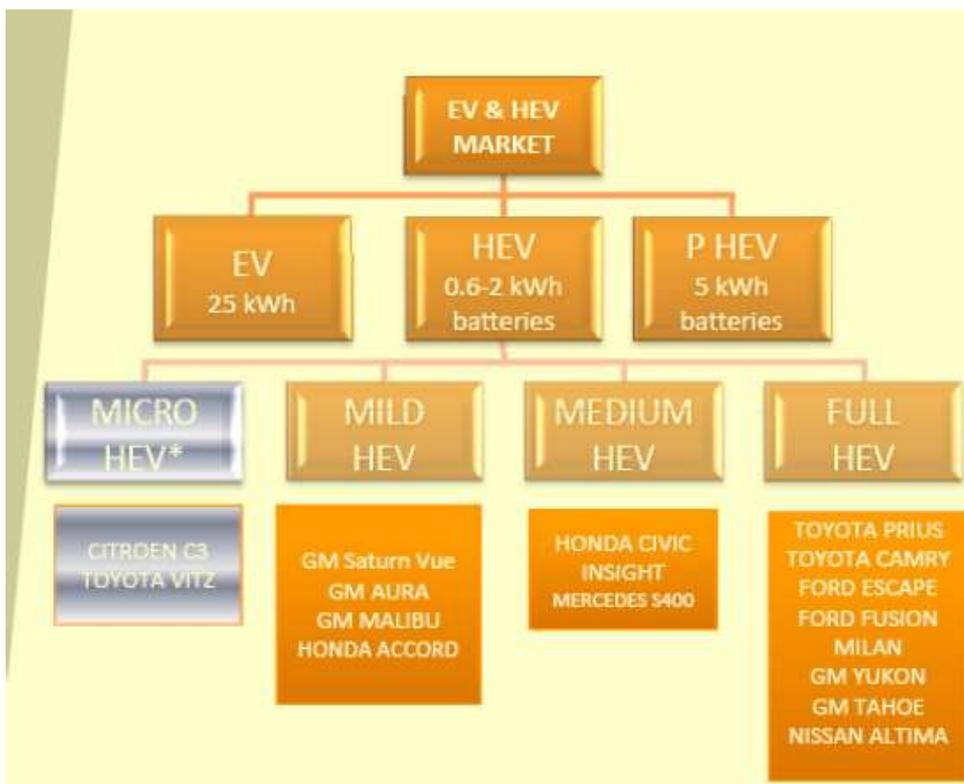
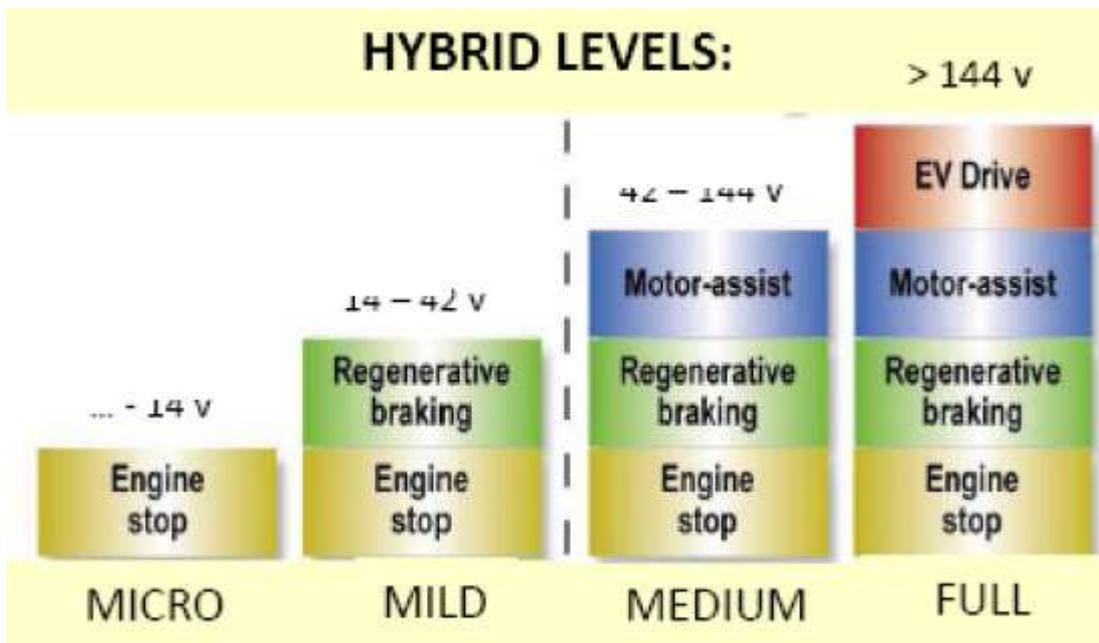
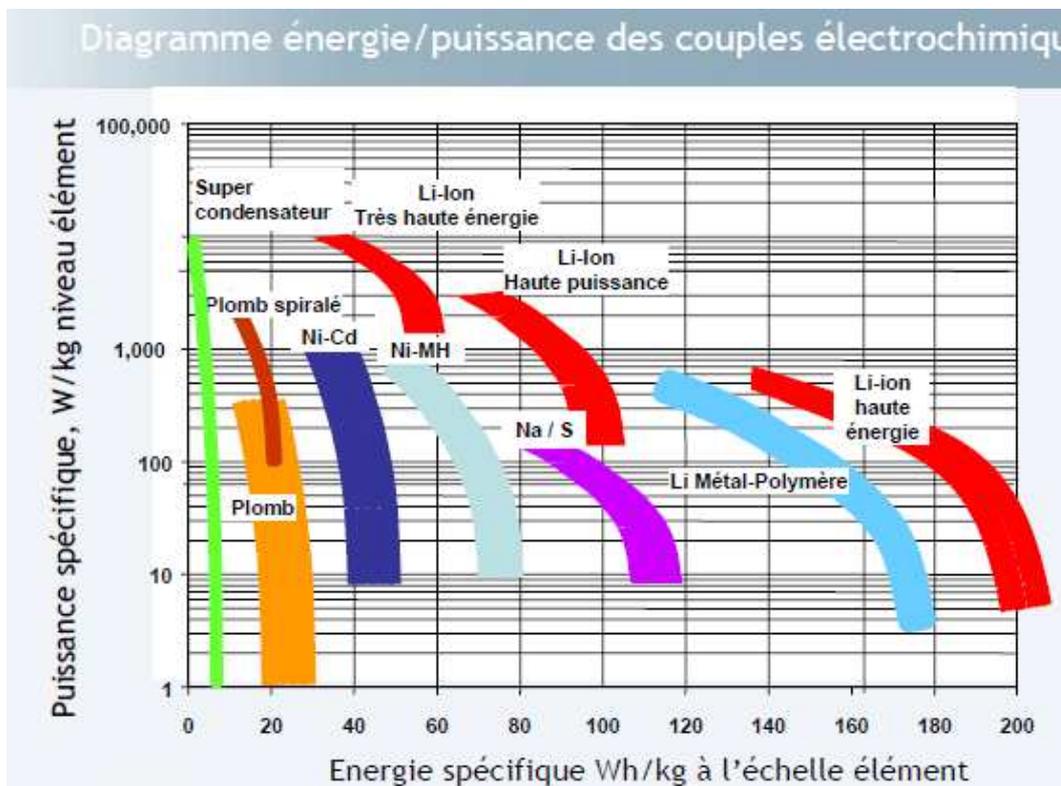


Figure 8 : Fonctionnalités selon le type de véhicule hybride ([4])



Les caractéristiques souhaitables pour les batteries ne sont pas les mêmes pour les différents types de véhicules hybrides et électriques, et les technologies de batteries ont des performances et des coûts très différents.

Figure 9 : Puissance spécifique et énergie spécifique de différents types de batteries [5]



Les batteries automobiles traditionnelles plomb-acide présentent les avantages d'un coût faible, grâce à l'emploi d'un métal relativement peu cher et abondant comme le plomb et à une expérience industrielle accumulée depuis des décennies, et d'une bonne puissance spécifique ; elles présentent l'inconvénient d'une énergie spécifique plus faible que les autres technologies envisagées (elles pèsent plus lourd pour stocker une même quantité d'électricité), et d'une durée de vie (nombre de cycles charge-décharge) qui décroît fortement lorsqu'elles sont soumises à des décharges profondes, ce qui se produirait dans les cas des hybrides plug-in et des véhicules électriques²².

Les batteries nickel-hydrure de métal (NiMH) sont employées dans certains véhicules hybrides. À capacité égale elles sont plus légères que les batteries au plomb mais plus lourdes que les batteries au lithium. Elles sont sensibles aux prix du nickel et du cobalt (et à la disponibilité de ce dernier métal). Elles peuvent avoir tendance à chauffer par dissipation d'énergie (conversion énergie chimique-énergie électrique imparfaite) et à se détériorer en cas de décharge profonde.

Les batteries au lithium sont actuellement plus chères que les deux technologies précédentes. Elles ont une capacité spécifique supérieure aux batteries NiMH, et une puissance spécifique élevée. La conversion d'énergie à l'intérieur de la batterie a un bon rendement, et elles n'ont pas tendance à surchauffer ce qui a un effet favorable sur leur durée de vie. Toutefois elles peuvent poser des problèmes de sécurité car dans des conditions extrêmes (grand froid, surcharge) des courts-circuits internes peuvent se produire, détruisant la batterie et pouvant provoquer des incendies. Les enjeux importants pour le développement de ces batteries sont de résoudre ce problème de sécurité, et d'obtenir une durée de vie suffisante par rapport à leur prix.

Une comparaison des différentes technologies de batteries pour véhicules électriques a été présentée par [7], en termes d'autonomie, de densité d'énergie et de prix.

²² On peut bien sûr penser à placer des batteries surdimensionnées et à n'utiliser qu'une partie de leur capacité, mais le problème de la masse de batterie à emporter pour une charge électrique utile donnée devient rédhibitoire.

Figure 10 : Comparaison des technologies de batteries pour véhicules électriques [7]



L'étude de l'US DoE [16] considère qu'à l'horizon 2025 les véhicules tout électriques et hybrides « plug-in » produits seraient tous équipés de batteries Li-ion, et que pour les hybrides non « plug-in » la part de marché des batteries Li-ion se situerait entre 50 et 100 %, le reste étant des batteries nickel-hydrure de métal. Les quantités de lithium par véhicule sont données sous forme de fourchettes, très larges : 0,17 à 0,64 kg par véhicule hybride, 1,4 à 5,1 kg par véhicule hybride « plug-in » et 3,4 à 12,7 kg par véhicule électrique.

D'autres technologies font l'objet de programmes de développement, entre autres :

- Zebra (sodium-chlorure de nickel)
- Zinc-air
- Lithium-air.

L'annexe 2 donne deux diagrammes illustrant le procédé de fabrication des batteries Li-ion (tirés de [24]). La technologie représentée utilise le carbonate de lithium comme point de départ de la production des cathodes et des sels de lithium de l'électrolyte.

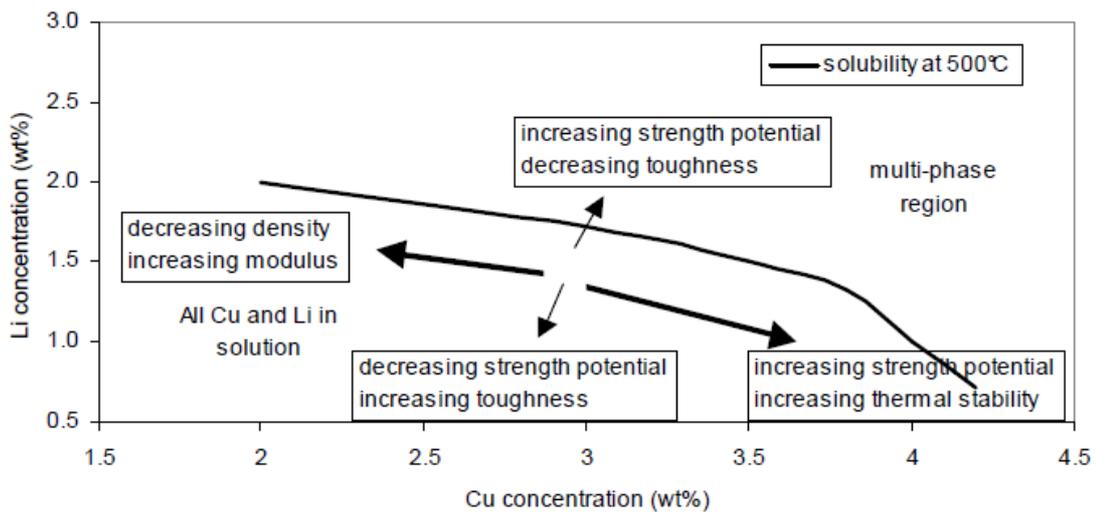
1.4 Utilisation du lithium dans les alliages aéronautiques

Les alliages d'aluminium pour l'aéronautique représentent un marché d'environ 250 000 t/an, dominé par Constellium et Alcoa.

La recherche constante d'allègements a conduit à développer pour les structures aéronautiques (voilures, fuselage) des alliages aluminium-cuivre-lithium. Les propriétés mécaniques et la densité dépendent des concentrations en lithium, cuivre et autres éléments.

Figure 11 : Évolution des propriétés des alliages aluminium-cuivre-lithium en fonction des concentrations en lithium et cuivre ([6])

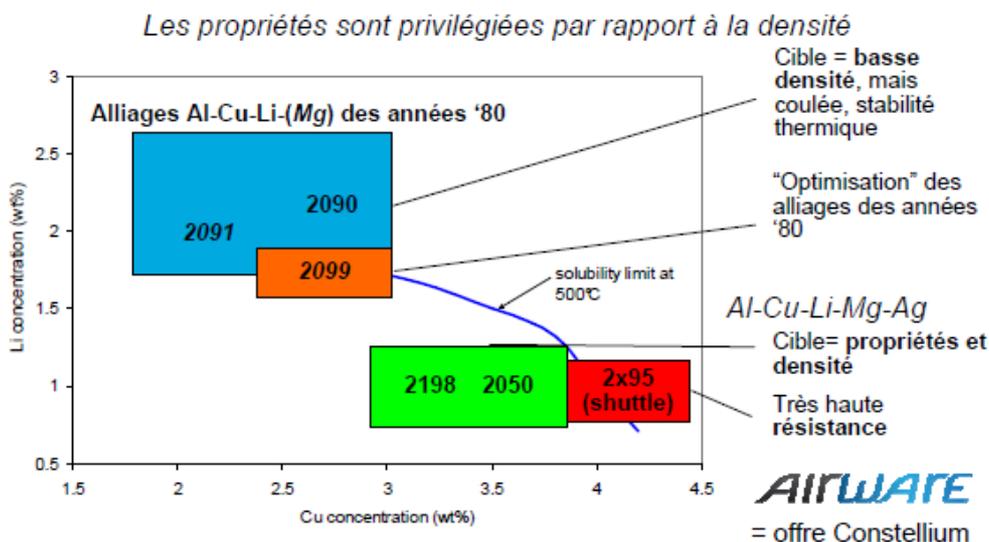
■ Mécanismes métallurgiques et évolution des propriétés des produits



T. Warner et al, 2006

Les derniers alliages développés (technologie AIRWARE® de Constellium) contiennent moins de lithium que les précédents : autour de 1 %, et incorporent de l'argent, du magnésium (et éventuellement du zirconium).

Figure 12 : Évolution de la composition des alliages Al-Cu-Li ([6])

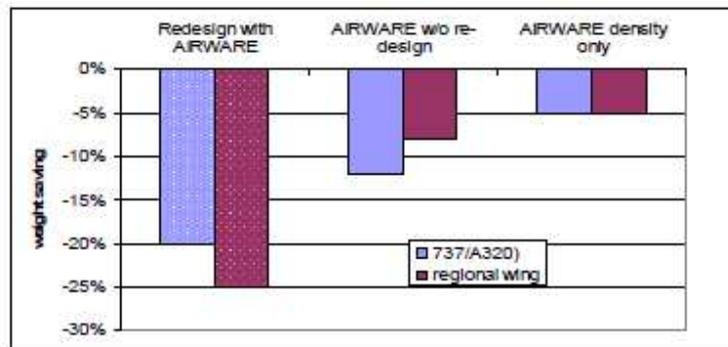


Ehrström et al, 2010

Ces nouveaux alliages permettent un allègement de certaines pièces de 20 à 25 %.

Figure 13 : Gains de masse de pièces en alliages d'aluminium grâce aux nouveaux alliages Al-Cu-Li ([6])

- Gains de masse : évaluations typiques internes et en partenariat avec avionneurs
 - 3-6% par effet de densité seul (sans réduire les épaisseurs)
 - 5-10% par optimisation des épaisseurs grâce aux propriétés
 - 15-25% avec re-design
- Exemple d'un extradós (737/A320 ou régional)



À titre d'exemples d'applications, l'alliage AIRWARE® 2198 à résistance mécanique et tolérance au dommage élevées sera utilisé pour le fuselage :

Figure 14 : Utilisation de l'alliage AIRWARE® 2198 pour le fuselage ([6])

Applications pour Bombardier C Series : fuselage

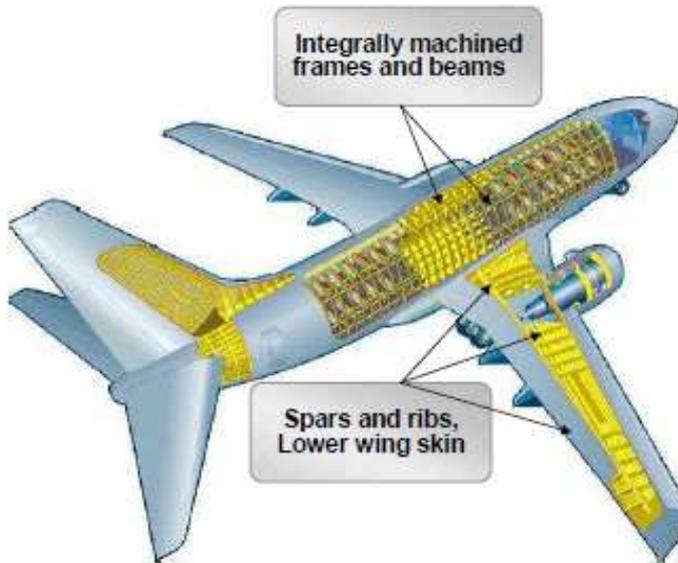
- A high strength and high damage tolerant product for fuselage applications



Courtesy of Bombardier

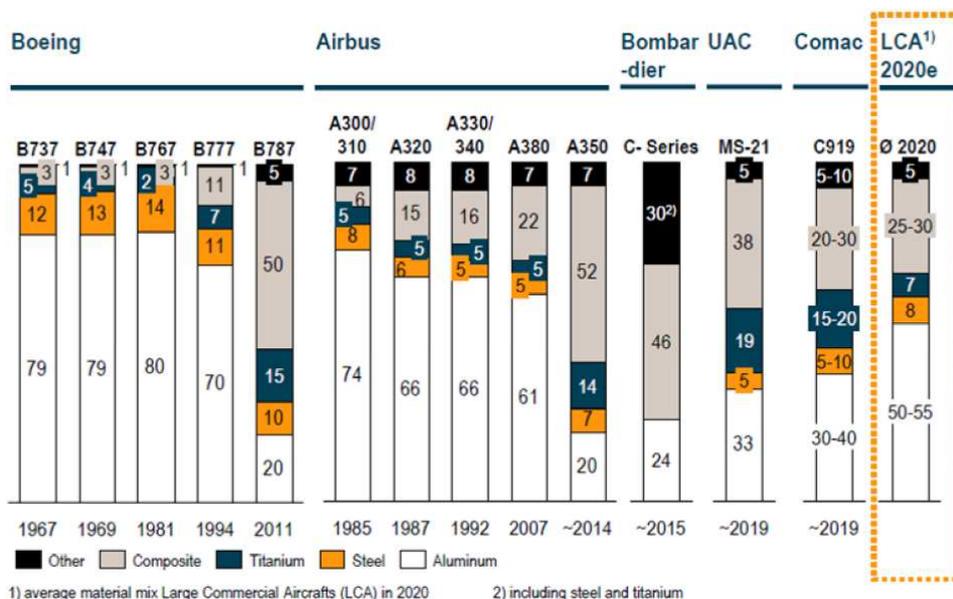
L'alliage AIRWARE® 2050 combine résistance, tenue en fatigue, tolérance au dommage, résistance à la corrosion, et sera utilisé pour les tôle fortes :

Figure 15 : Utilisations de l'alliage AIRWARE® 2050 [6]



La part des alliages d'aluminium dans les dernières générations d'avions commerciaux a décliné, l'aluminium perdant du terrain au profit du couple composites – titane. Les producteurs d'aluminium comptent regagner le terrain perdu, en particulier grâce aux alliages aluminium-lithium ; pour Alcoa [17], la structure de la famille d'avions LCA (Large Commercial Aircraft) des années 2020 devrait incorporer autour de 50 % d'alliages d'aluminium, ce qui est plus que les dernières familles B787 et A350, mais en recul par rapport aux générations précédentes où le ratio était supérieur à 60 %.

Figure 16 : Évolution de la part respective des différents matériaux composant la structure des avions commerciaux (source [17])



Le lithium est introduit sous forme de pains de lithium métal, de pureté au moins égale à 99,8 %, ou d'alliages mères Al-Li.

2- Offre mondiale

2.1 Volume de production primaire

Le lithium est extrait à partir de deux sources de matières premières :

- les saumures (mélanges de chlorures de différents métaux), essentiellement d'anciens lacs salés (le lithium est sous forme de chlorure, mélangé à d'autres chlorures), mais on étudie aussi les saumures d'origine géothermale, ou trouvées dans les gisements pétroliers ;
- les roches contenant des minéraux tels que le lépidolite, spodumène, pétalite. Jusqu'au démarrage de la production de carbonate de lithium à partir de saumures au Chili en 1997, la production de carbonate de lithium était essentiellement effectuée à partir de spodumène.

Dans les deux cas, un poste important de coût est le carbonate de sodium Na_2CO_3 utilisé pour précipiter le carbonate de lithium Li_2CO_3 .

D'autres sources de lithium sont à l'étude : une argile, l'hectorite ; la jadarite, un minéral découvert en Serbie par Rio Tinto ; l'eau de mer (recherches coréennes [2]).

Comme pour beaucoup de métaux stratégiques de nos études, on remarque un écart entre les statistiques de différentes sources.

Selon [3], les volumes extraits (en équivalent carbonate de lithium) en 2011 étaient de 80 000 t provenant de saumures et 81 000 t provenant de minéraux, soit un équivalent en lithium métal d'environ 30 000 t. C'est un chiffre intermédiaire entre celui de l'USGS (environ 35 000 t) et celui du BGS (20 000 t, mais pour 2010) [8]. SQM [9] estime le marché 2011 à environ 25 500 t de Li contenu, mais ce sont sans doute les ventes plutôt que les productions, et la part de Talison est sans doute sous-estimée.

Si on retient le chiffre moyen pour la production primaire 2011 d'environ 30 000 t de Li contenu, cela équivaut à environ 160 000 t de carbonate de lithium.

2.2 Répartition géographique de la production

La production mondiale 2011, estimée en combinant les données de l'USGS (qui considère les chiffres américains comme confidentiels²³) avec celles du BGS pour la production US, serait d'environ 35 000 t en lithium contenu.

²³ Un seul producteur.

Figure 17 : Répartition par pays de la production 2010, 2011 et des réserves (sources [1] et [8])

En t de lithium contenu	Production 2010	Production 2011	% production 2011	Réserves
USA	1 600	1 600	4,5%	38 000
Argentine	2 950	3 200	9,1%	850 000
Australie	9 260	11 300	32,0%	970 000
Brésil	160	160	0,5%	64 000
Chili	10 510	12 600	35,6%	7 500 000
Chine	3 950	5 200	14,7%	3 500 000
Portugal	800	820	2,3%	10 000
Zimbabwe	470	470	1,3%	23 000
Total hors USA	28 100	33 750	95,5%	12 917 000
Total avec USA	29 700	35 350	100,0%	12 955 000

Le Chili est le principal pays producteur (avec 35,6 % de la production mondiale) à partir de saumures (plateau d'Atacama). Il est suivi par l'Australie (32 %), à partir de spodumène, puis par la Chine (14,7 %). Ces trois pays représentaient 82 % de la production mondiale en 2011.

2.3 Les principaux producteurs

Les 4 principaux producteurs sont Talison Lithium, SQM, Rockwood Lithium, et FMC ; Talison produit un concentré de spodumène, SQM des produits de base (carbonate, hydroxyde, métal), alors que Rockwood et FMC offrent une gamme de produits beaucoup plus large.

Au Chili

SQM (Sociedad Quimica y Minera de Chile) exploite les salins d'Atacama pour la potasse et le lithium ; il commercialise du carbonate (technique et qualité batterie), de l'hydroxyde et du lithium métal (à 99,5 %). La capacité de son usine de carbonate est de 48 000 t/an.

SQM a été longtemps le leader du marché (en volume d'équivalent carbonate) et revendique encore cette place pour 2011 (il estime sa part de marché mondial 2011 à 31 % [9]).

Figure 18 : Vision du marché 2011 présentée par SQM [9] (tonnes d'équivalent carbonate de lithium ; 136 500 t correspondent à environ 25 500 t de Li métal contenu)



Rockwood Lithium, anciennement **Chemetall Foote**, exploite des salins au Chili (Atacama) et aux USA (Silver Peak, Nevada) et des usines au Chili (La Negra près d'Antofagasta), aux USA (Kings Mountain NC, La Porte TX*, New Johnsonville TN*), en Allemagne (Langelsheim*), en Inde (Gujarat*), à Taiwan*²⁴. Cette société produit et vend du carbonate, de l'hydroxyde, du métal, du butyllithium et de nombreux dérivés du lithium, dont les matières premières pour les piles et batteries ; elle est organisée en 4 divisions : sels de lithium ; butyllithium et lithium métal ; produits pour piles et batteries ; spécialités à base de lithium. Elle vient de doubler sa capacité de carbonate à Silver Peak, de démarrer une unité de production d'hydroxyde pour batteries à Kings Mountain, et annonce une extension de capacité de l'usine de carbonate de La Negra. Fin 2013, la capacité totale en carbonate de la société serait portée à 50 000 t/an, le double de sa capacité début 2012.

En Argentine

FMC exploite des salins à Salar del Hombre Muerto et produit toute une gamme de produits dérivés du lithium, dont les matières premières pour piles et batteries ; suite à une augmentation de capacité récente, sa capacité en carbonate est passée de 16 000 à 22 000 t/an.

Rincon Lithium démarre en 2012 la production de carbonate qualité batterie à partir des salins de Salar del Rincon (capacité visée 10 000 t/an).

En Australie

Talison Lithium exploite le spodumène à Greenbushes. Ses ventes 2011 ont représenté 50 700 t d'équivalent carbonate [11], en forte augmentation (38 000 t en

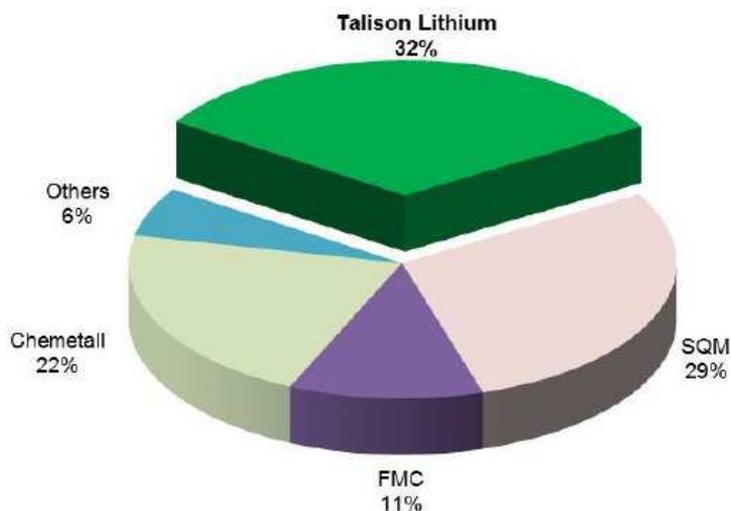
²⁴ * : usines de butyllithium.

2010). Les ventes actuelles sont sous forme de concentrés (340 kt en 2011 ; deux qualités : chemical grade, et bas fer pour verre et céramique), essentiellement vendu en Chine pour transformation, mais une usine de production de carbonate est prévue pour fin 2015 (capacité 20 000 t/an de carbonate). En termes de volume d'équivalent carbonate, Talison aurait donc détrôné SQM et pris la place de leader du marché en 2011, contrairement à la présentation SQM. Le marché mondial 2011 estimé par Talison est de 156 kt d'équivalent carbonate. En 2012²⁵, ses ventes auront été de 365 kt de concentré soit 54 000 t d'équivalent carbonate.

Un doublement de sa capacité de production est en cours de démarrage. Talison a également un projet de salins à Atacama (Salares 7).

Fin août 2012 Rockwood a offert 733 MUS\$ pour acquérir Talison. L'ensemble **Rockwood + Talison** représenterait 55 % du marché du lithium.

Figure 19 : Vision du marché 2011 présentée par Talison Lithium



Lithium Supply by Company, 2011.
Source: Talison.

En Chine

Les deux sources de lithium sont exploitées en Chine : salins et minéraux (spodumène). La Chine importe aussi des minéraux et du carbonate produit à partir de saumures.

Salins : au Tibet : Tibet Lithium New Technology Development Co. ; Zhabuye Lithium. Dans le Qinghai : CITIC Gouan Lithium Science & Technology Co. ; Qinghai Salt Lake Industry Group Co. (liste non exhaustive).

²⁵ Année fiscale, du 1/7/2011 au 30/6/2012.

Spodumène : le spodumène domestique, de basse qualité, est utilisé dans l'industrie du verre et des céramiques ; pour les besoins des batteries, la Chine importe des concentrés. La société Galaxy Resources est propriétaire de la mine de Mt Cattlin en Australie, importe le concentré et est en train de démarrer une usine de carbonate pour batteries dans la province du Jiangsu ; à pleine capacité, l'usine pourra traiter 137 kt de concentré de Mt Cattlin pour produire 17 000 t/an de carbonate qualité batteries. Galaxy projette de construire une usine de batteries Lithium-ion visant le marché du vélo électrique.

Au Canada :

Cabot Corporation exploite la mine de Tanco dans le Manitoba, et produit un concentré de spodumène vendu aux industriels du verre et de la céramique. Le tantale est un sous-produit de cette exploitation (c'est aussi le cas de la mine de Galaxy à Mt Cattlin).

En Europe, de petits gisements de minéraux industriels contenant du spodumène (feldspath lithique) sont exploités pour l'industrie de la céramique.

2.4 Recyclage du lithium

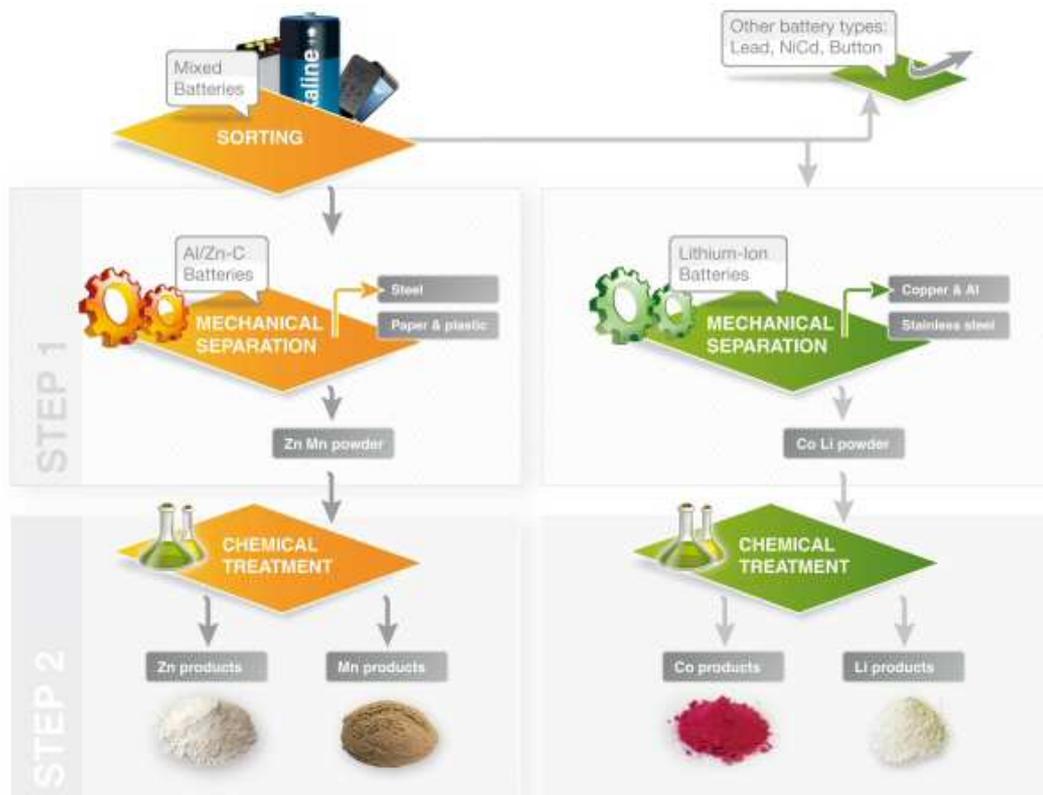
Batteries lithium-ion

Selon le groupe de travail 3 du COMES, sous-groupe « Objectifs de recyclage », présentation intermédiaire de juin 2012, il n'y a actuellement pas de technologie viable pour le recyclage du lithium des batteries lithium-ion.

À part quelques exceptions, les procédés actuels de récupération des métaux des batteries ne récupèrent pas le lithium, ce dernier se retrouvant par exemple (procédés pyrométallurgiques comme celui d'Umicore) dans un laitier qui est cédé aux cimentiers.

En France, la société Récupyl a mis au point un procédé hydrométallurgique qui permettrait de traiter les batteries lithium-ion et de récupérer le cobalt et le lithium (sous forme de sels).

Figure 20 : Recyclage des métaux des batteries lithium-ion (source : www.recupyl.com)



Aux USA, la société Toxco utilise un procédé hydrométallurgique pour recycler les piles et batteries au lithium, et indique récupérer le lithium sous forme de carbonate ; le procédé se fait à basse température ($-325^{\circ}\text{F} = -198^{\circ}\text{C}$) pour déduire la réactivité du lithium, ce qui n'a pas empêché l'usine d'être la proie d'un incendie.

Notion de « seconde vie des batteries » : même lorsque les performances d'une batterie deviennent insuffisantes pour l'utilisation dans l'automobile, la capacité résiduelle (70 à 80 %) permet encore son utilisation dans d'autres secteurs [12], comme le stockage de l'électricité produite par des installations photovoltaïques ou éoliennes, les lissages des pointes (sous-stations SNCF par exemple), la sécurisation d'alimentation électrique, le remplacement de groupes électrogènes. Ce n'est qu'à l'issue de cette seconde vie que le recyclage des matières premières prendrait place.

Alliages aluminium-lithium aéronautiques

On sait que d'une façon générale l'aluminium est un métal dont le recyclage est très développé ; en 2009, 30 % de la production d'aluminium mondiale était assurée par de la matière première recyclée.

En ce qui concerne les alliages aluminium-lithium, compte tenu de la durée de vie des avions, il n'y a pas encore de recyclage en fin de vie.

Par contre le recyclage des déchets de fabrication (scraps) est une composante importante de la production d'alliages. La proportion de copeaux lors de l'usinage est importante, elle peut atteindre 90 % pour certaines pièces ; ces copeaux sont repris par le fournisseur d'alliages et de produits semi-finis et refondus dans l'étape d'élaboration des alliages ; ils peuvent représenter de l'ordre de la moitié des matières premières introduites dans la charge des fours. Il est important pour un recyclage optimal que ces déchets d'alliages ne soient pas mélangés à d'autres.

2.5 Substitution

Dans l'industrie du verre et des céramiques, d'autres minéraux fondants (sodiques et potassiques) sont utilisables en remplacement du lithium.

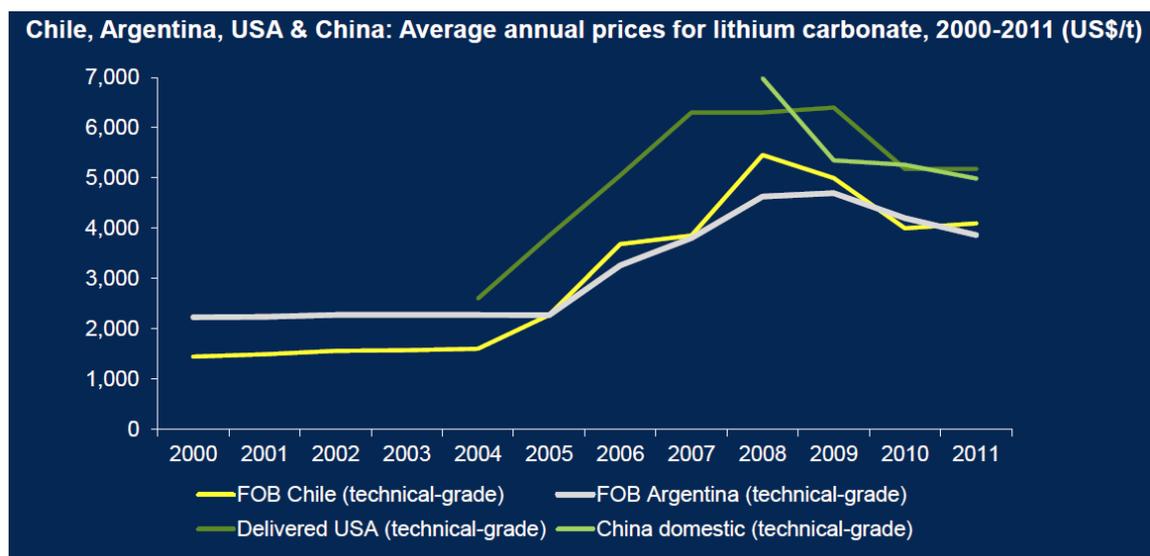
Pour les batteries, ainsi qu'il a été exposé précédemment, d'autres technologies sont en concurrence avec les batteries au lithium, les modèles existants étant moins chers mais moins performants que les batteries lithium-ion pour les véhicules hybrides et électriques.

Pour les alliages aluminium-lithium, le lithium est indispensable, mais ces alliages sont en concurrence avec les composites organiques et le titane.

2.6 Évolution des prix

Roskill [3] donne une synthèse de l'évolution des prix du carbonate, qualité technique, sur 2000-2011, FOB Chili et FOB Argentine, rendu aux USA, et sur le marché domestique chinois. Les prix ont augmenté de 2004 à 2008, puis ont baissé sur 2009-2010 avant de se stabiliser en 2011 à un niveau nettement supérieur à celui de la période 2000-2004.

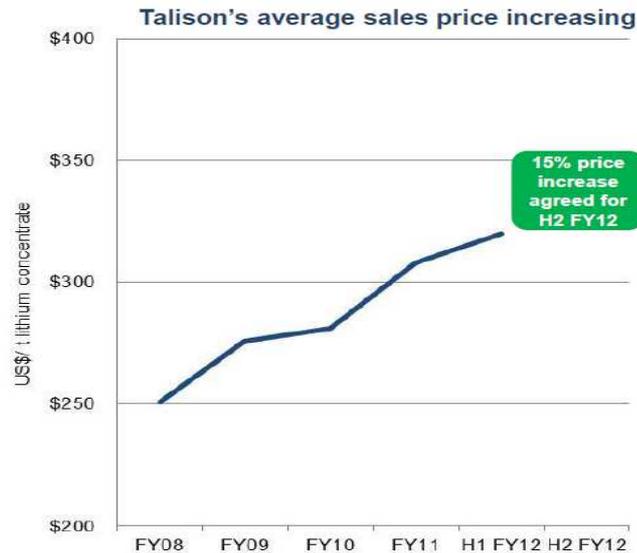
Figure 21 : Évolution des prix du carbonate technique, 2000-2011 (source [3])



Selon [13], le prix du carbonate de qualité batteries est de 6 250 \$/t (juin 2012).

Talison a vu ses prix de concentré de spodumène augmenter depuis 2008.

Figure 22 : Augmentation des prix de vente de Talison depuis 2008 (FY = année fiscale, du 1er juillet N-1 au 30 juin N) [11]



Les principaux producteurs ont annoncé récemment (mai, juin 2012) des augmentations de prix, en les justifiant par la nécessité de financer leurs investissements.

2.7 Producteurs de batteries Lithium-ion pour véhicules hybrides et électriques

L'étude ADEME [12] de juin 2011 donne un tableau des principaux fabricants mondiaux de batteries Li-ion pour véhicules hybrides et électriques.

Figure 23 : Principaux fabricants de batteries Li-ion pour véhicules hybrides et électriques (source : [12])

Tableau 1 – Principaux fabricants mondiaux de batteries Li-Ion pour VE et VHR

Nom	Pays d'origine	Partenariats connus avec les constructeurs automobiles
A123 Systems	USA	Chrysler, SAIC
AESC (JV Nissan-Nec)	Japon	Renault-Nissan
BYD	Chine	BYD
Dow Kokam	USA-Corée-France	
Enax	Japon	
GS Yuasa/ Lithium Energy Japan	Japon	Honda, Mitsubishi et PSA
Johnson Controls-Saft	USA-France	Ford, Mercedes
LG Chem	Corée	General Motors, Hyundai
Li-Tec (JV Evonik-Daimler)	Allemagne	Daimler
Matsushita	Japon	
PEVE (JV Panasonic-Toyota)	Japon	Toyota
Sanyo (Panasonic)	Japon	Suzuki
SB Limotive (JV Bosch et Samsung)	Allemagne-Japon	BMW
Sony	Japon	
Toshiba	Japon	Volkswagen

Source : compilation de données en provenance des sites internet des acteurs listés.

Le groupe Bolloré produit des batteries au lithium avec la technologie Lithium Métal Polymère.

2.8 Producteurs d'alliages aluminium-lithium pour l'aéronautique

Les deux principaux fournisseurs de pièces en alliages d'aluminium pour l'aéronautique, Constellium et Alcoa, incluent des alliages aluminium-lithium dans leur offre et développent leurs capacités d'élaboration spécifiques.

Aleris a annoncé la construction d'une usine d'alliages aluminium-lithium à Coblenz (Allemagne).

KUMZ (Russie) a sa production d'alliages aluminium-lithium.

La Chine est en train de développer cette famille d'alliages pour son programme de construction d'avions.

Les alliages mères aluminium-lithium sont produits par des sociétés spécialisées dans les alliages mères base aluminium, telles que KBM Affilips (Pays-Bas), KB Alloys (USA, groupe AMG), Milward Allos (USA), Belmont Metals (USA), SLM (République de Corée), Konik Industries (Chine), ...

3- Contraintes sur l'offre et projets de développement

3.1 Réserves et essources mondiales, répartition

Les réserves et leur répartition ont été indiquées au § 2.2.

Les ressources mondiales estimées par l'USGS [1] sont supérieures à 30 millions de tonnes de Li contenu, soit 1 000 années de production au rythme actuel. L'Amérique du Sud est le continent sur lequel le plus gros volume de ressource a été identifié. On remarque que la Bolivie, qui a des ressources très importantes, le quart des ressources mondiales identifiées, n'a pas encore commencé leur exploitation ; des projets sont à l'étude.

Figure 24 : Estimation des ressources mondiales de lithium [1]

Ressources (t de Li contenu)	
USA	4 000 000
Autres pays	30 000 000
<i>dont Bolivie</i>	9 000 000
<i>Chili</i>	> 7 500 000
<i>Chine</i>	5 400 000
<i>Argentine</i>	2 600 000
<i>Australie</i>	1 800 000
<i>Brésil</i>	≈ 1 000 000
<i>Congo (Kins)</i>	≈ 1 000 000
<i>Serbie</i>	≈ 1 000 000
<i>Canada</i>	360 000

3.2 Projets d'extension des producteurs existants

Comme indiqué précédemment, Rockwood Lithium est en train de doubler sa capacité pour l'amener à 50 000 t/an d'équivalent carbonate fin 2013 ; FMC vient d'augmenter sa capacité à 22 000 t/an ; Talison Lithium est en train de doubler sa capacité de spodumène pour atteindre 100 000 t/an d'équivalent carbonate et prévoit une usine de carbonate de 20 000 t/an d'ici 2015 ; Rincon Lithium démarre une capacité de 10 000 t/an. Galaxy Resources va démarrer son usine de carbonate de 17 000 t/an, approvisionnée par la mine de Mt Cattlin.

La capacité totale de ces producteurs serait donc portée à 199 000 t/an dans les deux années à venir, ce qui est plus au moins 45 000 t de plus que le marché 2011.

3.3 Nouveaux projets miniers

En raison des perspectives de croissance de la demande, de nombreux projets de développement sont à l'étude.

Les coûts d'investissement sont élevés. Deux exemples :

- Canada Lithium Corp. [14] annonce un coût d'investissement de 207 M US\$ pour 20 000 t/an de carbonate produit à partir de minerai de pegmatite, soit 10 350 US\$ par tonne de capacité ; cette société estime son futur coût de production à 3 165 US\$/t de carbonate ;
- Rodinia Lithium Inc. [15] annonce un coût d'investissement de 144 M US\$ pour une capacité de 15 000 t/an de carbonate extrait de saumures, soit 9 600 US\$ par tonne de capacité (baissant à 8 800 US\$ par tonne pour une capacité de 25 000 t/an) ; cette société estime son futur coût de production à 1 519 US\$/t de carbonate, mais il y a des coproduits (chlorure de potassium, acide borique).

Des projets existent en Chine, mais difficiles à cerner.

La figure suivante donne une liste (non exhaustive) des projets annoncés.

Figure 25 : Projets d'exploitation de lithium (source : sites internet des sociétés concernées)

Société	Pays	Site	Date de démarrage annoncée	Capacité (t/an éq. Carbonate)	Produit	Saumure / Minéral	Commentaires
Orocobre	Argentine	Salar de Olaroz	début 2014	16 400	Carbonate qualité batteries	S	Partenariat avec Toyota Tsusho. Projets sur autres sites
Lithium Americas Corp	Argentine	Cauchari-Olaroz	2015	20 000	Carbonate qualité batteries	S	Partenariat avec Mitsubishi Corp. et Magna International. Construction seconde phase 40 000 t à partir de 2018
Galaxy Resources	Argentine	Sal de Vida	2015	25 000	Carbonate	S	Projet de Lithium One, que Galaxy vient de racheter pour 109 M€
Rodinia Lithium	Argentine	Diablillos	2015	15 ou 25 000	Carbonate qualité batteries	S	Process mis au point au Qinghai Inst. of Salt Lakes. Partenariat avec Shanshan pour matériaux pour batteries. Projets sur 3 autres salins en Argentine et un dans le Nevada (Clayton Valley)
Reed Resources et Mineral Resources	Australie	Mt Marion	?	20 000	Concentré spodumène à 6,5 %	M	Capacité visée de 200 000 t/an de concentré à 6 % de Li2O. Une usine de carbonate de 17 000 t/an est envisagée
New World Resources Corp.	Bolivie	Pastos Grandes	?	?	?	S	Au stade de l'exploration
Comibol-Kores-Posco	Bolivie	Salar de Uyuni	?	?	?	S	Partenariat état bolivien (Comibol), compagnie nationale coréenne (Kores) et aciériste Posco
Canada Lithium Corp	Canada	Val d'Or (Québec)	Fin 2013	20 000 t	Carbonate qualité batteries	M	Energie bas coût. Potentiel de production supplémentaire : 20 000 t/an de spodumène, 2 000 t/an d'hydroxyde, éventuellement métal
Channel Resources	Canada	Fox Creek (Alberta)	?	?	Carbonate	S	Saumure extraite d'aquifères associés à des gisements de pétrole et de gaz. Etudes en cours.
Galaxy Resources	Canada	James Bay (Québec)	?	?	Concentré ou carbonate	M	Projet de Lithium One, que Galaxy vient de racheter pour 109 M€. La carbonate de qualité batteries sera produit sur place ou dans l'usine de Galaxy en Chine
Nemaska Lithium	Canada	Whabouchi (Québec)	?	30 000	Carbonate et hydroxyde	M	Usine de carbonate et d'hydroxyde sera implantée à Valleyfield. Extraction de 202 000 t/an de concentré à 6 % de Li2O
Critical Elements	Canada	Rose (Québec)	Fin 2014	26 600	Carbonate batteries et hydroxyde	M	Tantalite co-produit
Talison Lithium	Chili	Salares 7	?	?	?	S	Provient de l'acquisition de Salares Lithium par Talison en 2010
LI3 Energy	Chili	Salar de Maricunga	?	15 000	Carbonate	S	Partenariat avec POSCO
Nordic Mining	Finlande	Keliber	Fin 2015 ?	4 000	Carbonate qualité batteries	M	
Rio Tinto	Serbie	Jadar	> 2016	?	Carbonate	M	
Simbol Materials	USA	Imperial Valley (Californie)	Fin 2012 ?	1 500	Carbonate qualité batteries	S	Extraction du lithium et autres métaux de saumures géothermales. Usine pilote (500 t/an) démarrée fin 2011
Western Lithium	USA	Kings Valley (Nevada)	2015	13 000	Carbonate	M	Gisement d'hectorite (argile) riche en lithium. Après 4 ans, seconde tranche portant la capacité à 26 000 t/an
Albermarle	USA	Magnolia (Arkansas)	2013	?	Carbonate	S	Met au point un procédé de production du carbonate de lithium à partir des saumures actuellement exploitées pour en extraire le brome

4- Analyse de quelques facteurs de criticité

4.1 Rareté relative des ressources minières

Les ressources minières identifiées sont abondantes et réparties sur plusieurs continents, l'Amérique du Sud étant le principal détenteur de ressources. La Bolivie n'a pas encore commencé à exploiter ses ressources. Les pays sud-américains concernés sont à des degrés divers en proie à la tentation nationaliste, ce qui pourrait introduire quelques tensions sur le marché.

L'Europe a quelques gisements, mais rien de comparable avec l'Amérique du Sud.

4.2 Concentration dans la chaîne de production

La production des matières premières est dominée par quatre producteurs, situés au Chili, en Argentine et en Australie ; la montée en puissance rapide de la production australienne a diminué le degré de concentration à cette étape.

Sur ces quatre producteurs, deux produisent une large gamme de produits à base de lithium, les deux autres sont pour l'instant sur les matières premières de base. Il existe des usines traitant les matières premières de base (en Chine en particulier).

Les projets de nouvelles capacités sont nombreux, beaucoup intégrant la fabrication de produits correspondant aux demandes de pureté et de granulométrie des batteries lithium-ion.

4.3 Importance pour les filières aéronautique et automobile

Pour la filière aéronautique, les alliages d'aluminium ont au cours des dernières années perdu des parts de marché au profit des matériaux composites et du titane. Les producteurs d'aluminium misent sur une nouvelle génération d'alliages aluminium lithium pour reprendre des parts de marché.

Pour la filière automobile, l'importance du lithium réside dans les batteries des véhicules hybrides et électriques. La technologie lithium est en concurrence avec d'autres, soit existantes (nickel-hydrure de métal), par rapport auxquelles elle présente des avantages, soit en développement. L'incertitude qui pèse sur la filière est le rythme de développement commercial de ce type de véhicule ; les prévisions faites il y a quelques années étaient trop optimistes.

5- Scénarios²⁶ prospectifs à 10 ans

5.1 Scénario d'évolution de la demande

La difficulté majeure dans l'élaboration de scénarios de demande réside dans la prise en compte du développement des véhicules hybrides et électriques :

- Rythme de développement de ces véhicules
- Part de marché des batteries lithium-ion par rapport aux autres batteries
- Contenu en lithium des batteries (le paragraphe 1.3 montre la largeur de la fourchette des estimations de contenu en lithium par type de véhicule).

Pour le rythme de pénétration des véhicules hybrides et électriques, notre scénario de base correspondait à 14-15 % de la production 2022. Les deux-roues électriques sont pris en compte mais leur importance à l'intérieur de ce secteur est marginale en raison de la masse inférieure par véhicule.

Pour la part de marché des batteries lithium-ion, notre scénario de base suppose que 25 % des véhicules hybrides non « plug-in » sont équipés d'autres technologies, et que la batterie lithium-ion occupe le reste du marché.

En ce qui concerne le contenu en lithium des batteries, nous retiendrons dans notre scénario de base des chiffres du niveau de ceux donnés par SAFT [5], qui sont dans le bas de la fourchette du DoE [16] ; on remarquera que certaines sociétés présentant des projets de nouvelles capacités utilisent des chiffres nettement supérieurs [13].

Une variante haute du scénario de demande correspond à une percée plus rapide des véhicules hybrides et électriques ; une variante basse à une percée très lente (ou à l'élimination des batteries lithium-ion au profit d'une autre technologie sans lithium).

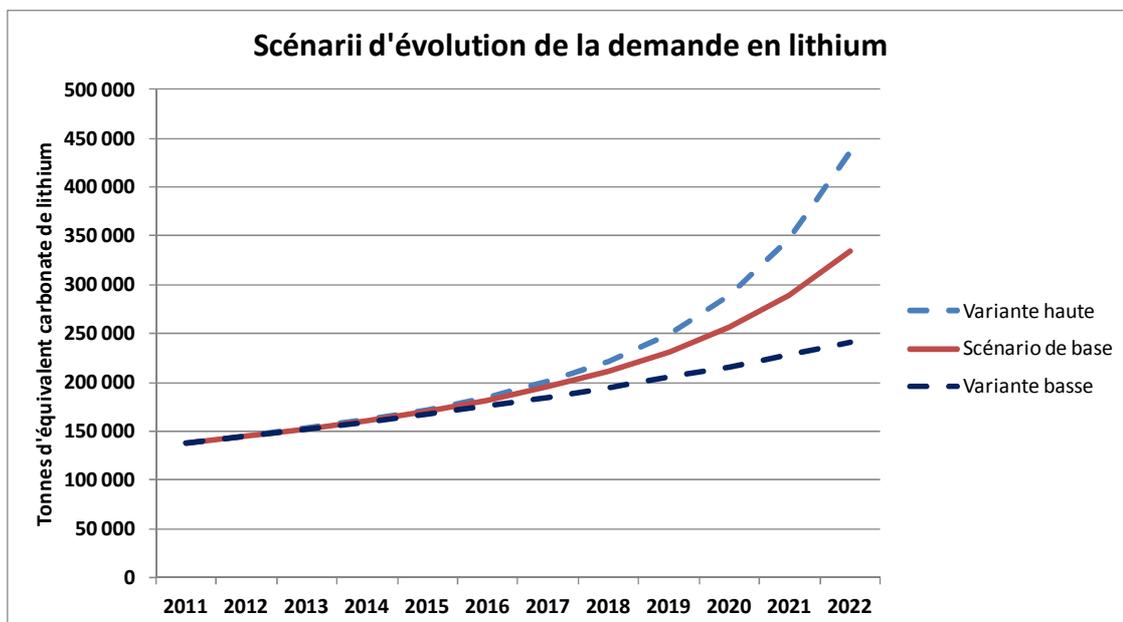
Nous n'avons pas voulu cumuler une variante haute de développement des batteries pour l'automobile avec l'utilisation des batteries lithium dans le stockage de masse de l'électricité ; sur ce dernier point des technologies concurrentes sont en développement (par exemple, mais pas uniquement, les batteries vanadium Redox).

Les alliages aluminium-lithium représentent un enjeu moindre en termes de volumes de lithium nécessaire. Selon [18], la production d'avions commerciaux devrait passer d'environ 1 340 en 2011 à environ 1 850 en 2021. La demande (départ usine) en alliages d'aluminium pour l'aéronautique a été de l'ordre de 250 kt [18] en 2010. D'après la figure extraite de [17], et compte tenu des effets d'inertie dus aux cycles de développement et de production, on peut s'attendre à une baisse de la part de l'aluminium dans les avions construits au cours des prochaines années, avec ensuite une remontée si les alliages aluminium-lithium permettent de retourner la tendance.

²⁶ Rappelons qu'un scénario n'est pas une prédiction.

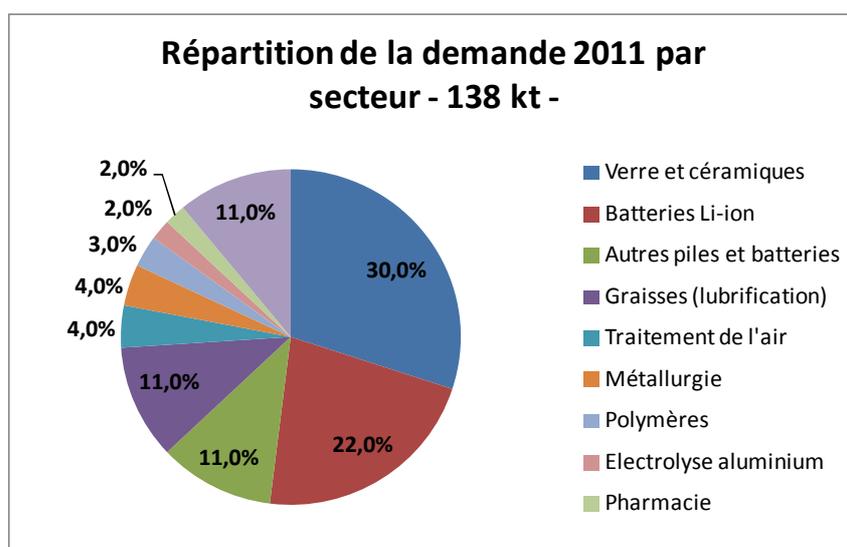
Par ailleurs le recyclage des chutes en cours de production devra permettre de récupérer une part importante du lithium des alliages. Enfin, la teneur en lithium dans les alliages est faible. Nous estimons la demande pour la production d'alliages aluminium-lithium en fin de période à moins de 10 kt/an (équivalent carbonate).

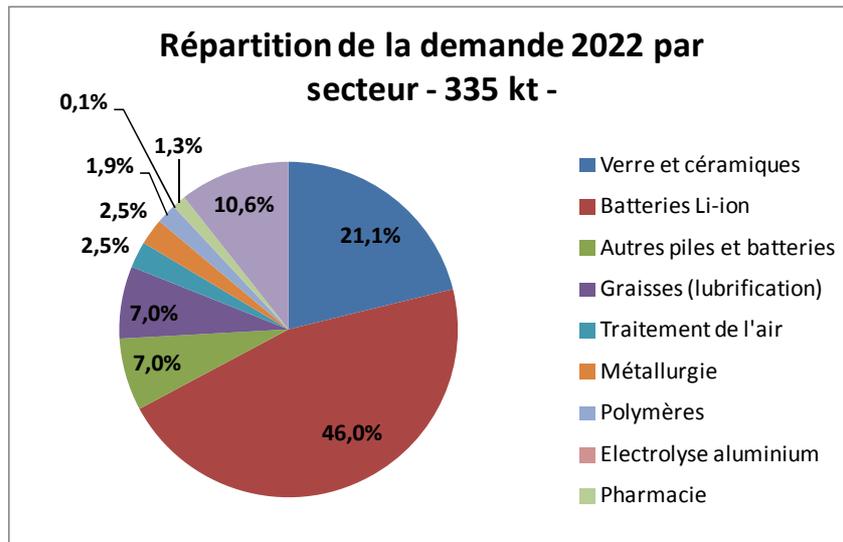
Figure 26 : Scénarios d'évolution de la demande en lithium : scénario de base, variante haute, variante basse



Dans le scénario de base, la demande de lithium en 2022 représenterait de l'ordre de 335 kt d'équivalent carbonate. La part des batteries lithium-ion (tous usages confondus, pas uniquement pour l'automobile) dans la demande croîtrait de 22 % en 2011 à 46 % en 2022.

Figure 27 : Évolution de la répartition par secteur de demande entre 2011 et 2022





Une percée vigoureuse et rapide des véhicules hybrides et électriques utilisant les batteries au lithium, ou un développement dans le stockage de masse d'électricité, pourrait conduire à une demande 2022 de l'ordre de 435 kt, et un défaut de développement à une demande de l'ordre de seulement 240 kt. La fourchette est très ouverte, à la mesure des incertitudes qui pèsent sur le rythme de développement commercial de ces véhicules.

À titre de comparaison :

- Roskill [3] présente un scénario de base avec un TMCA de 7,5 % (demande 2020 de l'ordre de 200 kt), mais avec un potentiel de 10 % (consommation 2020 de 300 kt).
- Western Lithium [19] présente un scénario haut : demande de 490 kt en 2025 et un scénario bas : demande de 310 kt en 2025.
- Nordic Mining [20] présente des scénarios conduisant à une demande comprise entre 350 et 500 kt en 2020.
- Orocobre [21] prévoit un TMCA de 10 % jusqu'en 2025, avec une consommation de 380 kt en 2022 et 500 kt en 2025.
- Li3energy [22] voit la demande excéder de 250 kt en 2020.
- Critical Elements [25] un scénario moyen à 270 kt en 2020, avec une hypothèse basse à 187 kt et une hypothèse haute à 500 kt.

Figure 28 : Comparaison de nos scénarios avec d'autres sources

Comparaisons	Demande 2020	Demande 2022	TMCA
Notre scénario de base	256	335	8,4%
Variante haute	289	436	11,0%
Variante basse	216	240	5,2%
Roskill [3] base	200	231	7,5%
Roskill variante haute	300	363	10%
Western Lithium [19]		375	
Western Lithium var basse		260	
Nordic Mining [20]	350		
Nordic Mining var haute	500		
Orocobre [21]		380	10%
Li3energy [22]	> 250		
Critical Elements [25]	270		>10 %
Critical Elements variante haute	500		
Critical Elements variante basse	187		

Notre scénario de base se trouve globalement dans la fourchette des autres sources ; Nordic Mining et Critical Elements ont des variantes hautes très nettement supérieures aux autres.

5.2 Scénario d'évolution de l'offre

Les projets de nouvelles capacités d'extraction de lithium, aussi bien de salins que de minerais, sont nombreux, même sans tenir compte de projets chinois.

Beaucoup d'entre eux visent à produire du carbonate, et le plus souvent de qualité batteries en raison du fort développement attendu de ce secteur de la demande ; pour les autres la conversion en carbonate et autres produits dérivés du lithium peut s'effectuer dans les usines de clients, comme c'est le cas actuellement pour la production de concentré de Talison. De plus, une partie de la consommation pour le verre et les céramiques s'effectue sous forme de concentré de spodumène et n'a pas besoin d'être convertie en carbonate.

Par ailleurs, les volumes nécessaires pour l'aéronautique sont faibles par rapport à l'ensemble de la demande. Des constructions de capacité d'élaboration d'alliages Al-Li sont en cours chez les grands acteurs de l'aluminium.

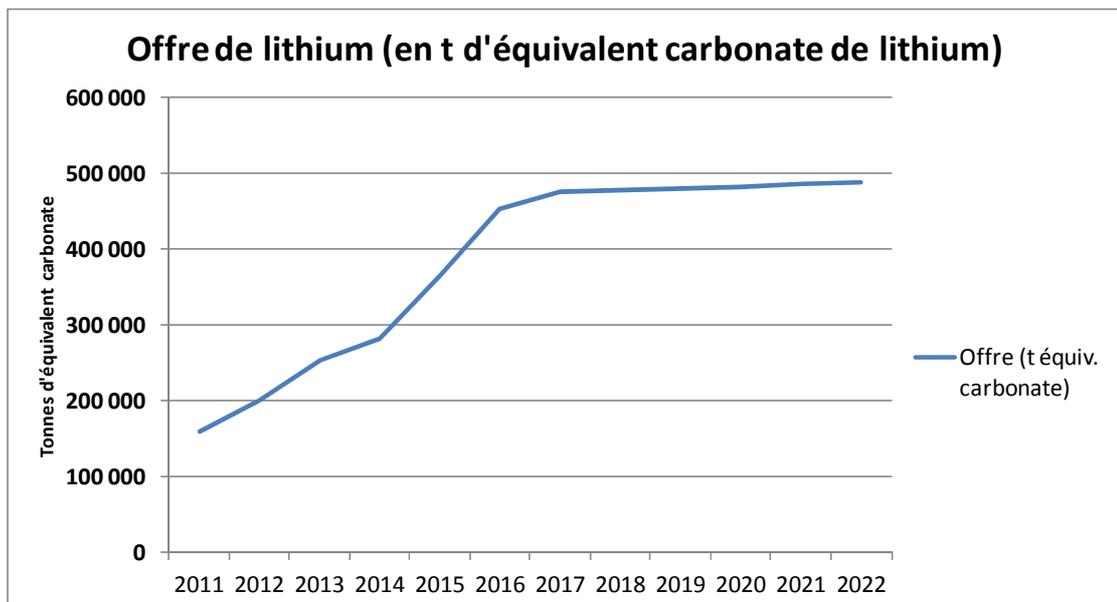
Pour ces raisons, les éventuels risques d’approvisionnement en lithium pour les batteries automobiles et pour les alliages aluminium-lithium se situeraient au stade de l’extraction.

Dans notre scénario de l’offre, nous prenons en compte les extensions des producteurs existants et les projets du paragraphe 3.3 qui semblent suffisamment mûrs pour avoir une probabilité élevée d’aboutir, et en particulier pour lesquels une capacité de production a été définie ; pour la Chine, l’hypothèse est un doublement progressif de la capacité 2011 sur la période.

La courbe montre une forte augmentation de l’offre jusqu’en 2016, puis une croissance beaucoup plus lente. Ceci appelle deux remarques :

- La forte croissance initiale provient du nombre de projets qui seraient susceptibles de démarrer dans les années qui viennent ; mais les démarrages ne trouveront leur financement complet que si, entre autres facteurs, la demande se révèle suffisamment forte pour appeler de nouvelles capacités à la hauteur de ce qui est annoncé ; sinon, certains projets seront repoussés.
- La faible croissance ultérieure est due au fait que nous n’avons pas intégré de nouveaux projets (à part une croissance chinoise progressive). Il peut se faire que la croissance chinoise soit plus agressive, ou, si la demande est suffisamment soutenue, que de nouveaux projets voient le jour, en particulier ceux de la liste du paragraphe 3.3 que nous n’avons pas intégrés dans les calculs faute de capacité définie.

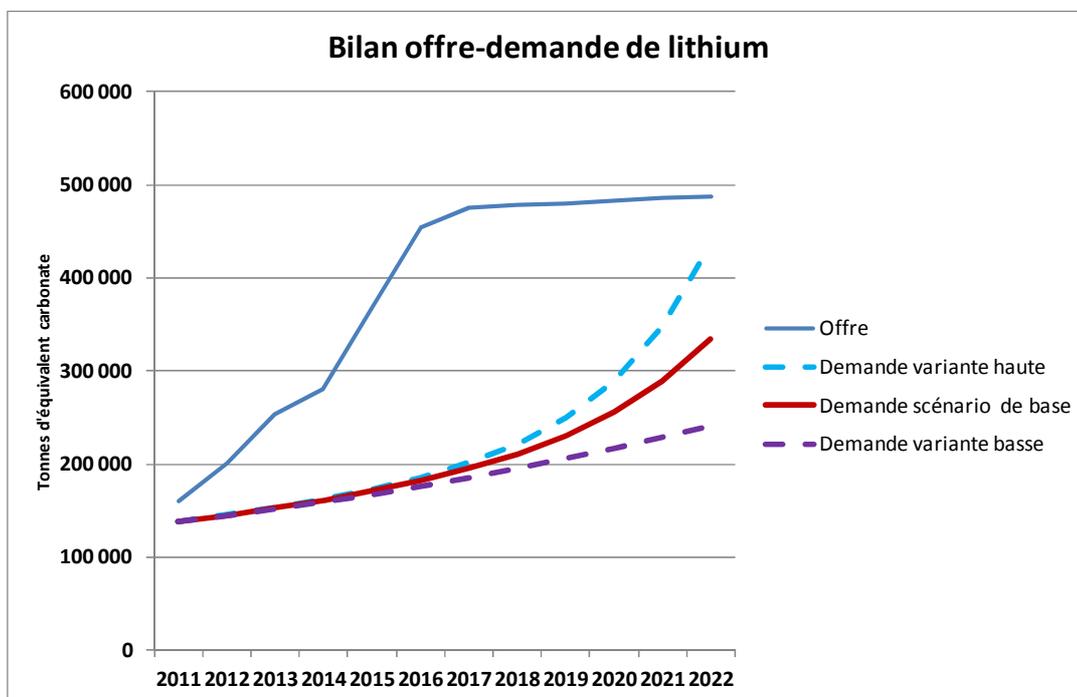
Figure 29 : Scénario d’évolution de l’offre primaire de lithium



5.3 Évolution du bilan offre-demande

La comparaison du scénario d'offre et des scénarios de demande met tout de suite en évidence un excédent considérable de l'offre, même par rapport à la variante haute du scénario de demande.

Figure 30 : Bilan offre-demande du lithium sur la période 2011-2022



5.4 Analyse du scénario et jeu des acteurs

La disponibilité en lithium ne devrait pas être un problème dans les années à venir. Au contraire, les projets annoncés ne pourront pas tous se réaliser aux dates annoncées, beaucoup devront probablement être reportés faute de demande. Ils suffisent en effet à satisfaire la demande dans la variante haute à l'horizon 2022, alors que les dates affichées de démarrage sont antérieures à 2017.

Les projets dont la réalisation est la plus probable sont ceux de producteurs installés, dont l'augmentation de capacité bénéficie d'infrastructures existantes, donc se fait à un coût par tonne inférieur à celui d'un projet entièrement nouveau (greenfield), et/ou ceux dont le coût de revient est bas, en particulier lorsque le lithium est un coproduit (ce qui est le plus souvent le cas dans les exploitations partant de la saumure).

Les autres projets devraient avoir du mal à trouver un financement avant que les perspectives de la demande se clarifient.

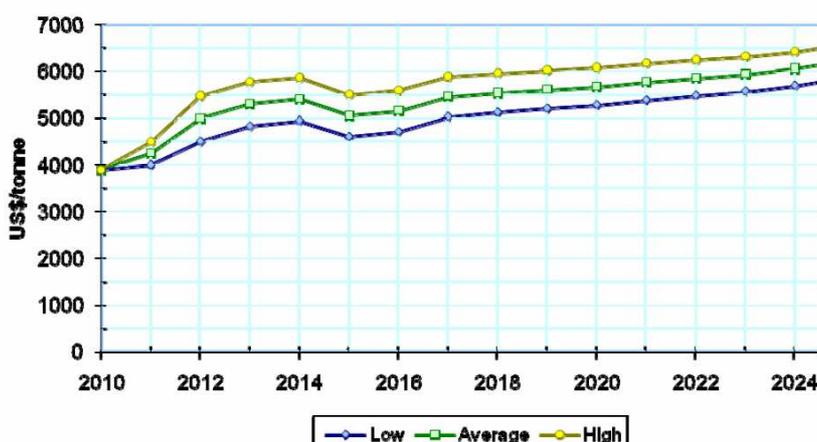
Les prix devraient augmenter progressivement (en raison des augmentations de coûts et des investissements à réaliser), et pourraient même baisser si trop de projets voyaient le jour. Si la demande « explosait » de façon imprévue, les prix

augmenteraient plus rapidement et de nouveaux projets accèderaient à une rentabilité suffisante pour démarrer.

À titre d'exemple, l'étude économique préliminaire effectuée par Lithium One / Galaxy Resources pour le projet Sal de Vida utilise des scénarios de prix représentés sur la figure suivante.

Figure 31 : Scénarios de prix du carbonate pour batteries, FOB Chili, utilisés par Lithium One dans l'estimation économique préliminaire du projet Sal de Vida [23]

Figure 32: Li₂CO₃ Battery-Grade FOB Chile High, Medium, & Low Price Scenarios



Après 2022, si le développement des véhicules hybrides et électriques utilisant les batteries au lithium se confirme et qu'une part significative du marché du stockage de masse de l'électricité est prise par ces batteries (hors utilisation en seconde vie), d'autres projets miniers seront nécessaires ; mais le développement du recyclage du lithium des batteries sera à prendre en compte.

5.5 Pistes pour anticiper les risques de pénurie / tension sur les prix

Les risques de pénurie devraient être faibles sur la période considérée. Mais l'Europe restera essentiellement dépendante d'autres continents pour ses approvisionnements en matières premières à base de lithium.

Il serait de bonne politique pour les fabricants de batterie de sécuriser leurs approvisionnements, par des accords de participation ou des contrats long terme avec des producteurs de matières premières.

La « seconde vie » des batteries, ainsi que le développement du recyclage du lithium (et des autres métaux) des batteries est à promouvoir, aussi bien pour des raisons de prolongation des ressources que de protection de l'environnement. Des programmes de Recherche-Développement sur ces sujets sont encore nécessaires.

-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-

Bibliographie

Annexe 1 : Procédés de production du carbonate de lithium Li_2CO_3

Annexe 2 : Diagramme du procédé de fabrication des batteries lithium-ion pour véhicules électriques

Bibliographie

- [1] « Lithium », Mineral Commodity Summaries, U.S. Geological Survey, January 2012
Accessible en ligne :
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/mcs-2012-lithi.pdf>
- [2] « Lithium », 2010 Minerals Yearbook, U.S. Geological Survey, December 2011. Accessible en ligne :
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lithium/myb1-2010-lithi.pdf>
- [3] Baylis, R., (Roskill) « Vehicle electrification and other lithium end-uses: How big and how quickly? », 4th Lithium Supply and Markets Conference, 23-25th January 2012
- [4] INERIS, « Approche de la maîtrise des risques spécifiques de la filière véhicules électriques : données de base sur les différentes technologies de stockage d'énergie », Rapport d'étude DRA-10-111085-07180A, 16 juin 2010
- [5] De Guibert, A., (SAFT) Colloque IFP Panorama 2010, 28 janvier 2010
- [6] Dubost, B., (Constellium) « Nouvelles solutions en alliages d'aluminium pour l'allègement : structures aéronautiques et carrosserie automobile », Colloque 3M, CEA Saclay-INSTN, 21 juin 2011
- [7] Torcheux, L., (EDF) « Technologie batteries lithium pour VE », 18 juin 2010
- [8] « World Mineral Production 2006-2010 », British Geological Survey, 2012
- [9] SQM corporate presentation, June 2012
- [10] Rockwood Holdings, « Positioned for Growth », presentation to Deutsche Bank Global Industrials and Basic Materials Conference, June 13, 2012
- [11] Talison Lithium, « Investor Presentation », June 2012
- [12] « Étude de la seconde vie des batteries des véhicules électriques et hybrides rechargeables », ADEME, Juin 2011
- [13] Lithium Americas Corp, « Developing One of the World's Largest and Lowest Cost Lithium Operations », corporate presentation, June 2012
- [14] Canada Lithium Corp., « Lithium – driving our growth », corporate presentation, June 2012
- [15] Rodinia Lithium Inc., « Premier Lithium Projects in the Americas », corporate presentation, May 2012
- [16] US Department of Energy, « Critical Materials Strategy », December 2011

- [17] Alcoa, « Spacious Skies Ahead for Alcoa Aerospace », American Metal Market Sixth Annual Aerospace Materials Conference, April 25, 2012
- [18] Holland, M., (ICF International) « Aerospace Industry Dynamics – Implications for the Titanium Market », Titanium 2011, San Diego, October 2-3, 2011
- [19] Western Lithium, Corporate presentation, June 2012
- [20] Nordic Mining, presentation à Swedbank First Securities, 17 January 2012
- [21] Orocobre, « The Next Low Cost Lithium Producer », Investor presentation, July 2012
- [22] Li3energy, « Advancing the Development of Lithium & other Strategic Minerals », April 2012
- [23] Lithium One, « Preliminary Assessment and Economic Evaluation of the Sal de Vida Project », NI 43-101 Technical Report, November 18th, 2011
- [24] Gaines, L., (Argonne National Laboratory) « Comparison of Lithium Ion Battery Recycling processes », 2011 Joint US-Chine Electric Vehicle and Battery Technology Workshop, August 1-2, 2011
- [25] Critical Elements, « Technical report and preliminary economic assessment on the Rose Tantalum-Lithium project », December 10, 2011

ANNEXE 1

PROCÉDÉS DE PRODUCTION DU CARBONATE DE LITHIUM Li_2CO_3

Exemple de procédé²⁷ à partir de la saumure

Évaporation de la saumure pendant 12 à 18 mois dans des bassins peu profonds par action du soleil (principe des marais salants), jusqu'à atteindre une concentration de 3 à 6 % de chlorure de lithium. D'autres chlorures s'éliminent par précipitation au fur et à mesure de l'évaporation.

Traitement à la chaux et au chlorure de calcium pour éliminer la plus grande partie du bore, du magnésium, des sulfates par précipitation.

Concentration supplémentaire de la saumure pour atteindre 40 % de chlorure de lithium.

Élimination du bore résiduel par extraction par un solvant (acide organique).

Élimination du magnésium résiduel par dilution et ajout de carbonate de sodium (précipitation de carbonate de magnésium), puis ajout à 80 °C de carbonate de sodium et de chaux pour précipiter simultanément hydroxyde de magnésium et carbonate de calcium.

Précipitation du carbonate de lithium à 85 °C par le carbonate de soude ; lavage et séchage des cristaux de Li_2CO_3 .

Exemples de procédés à partir de spodumène

Broyage du minerai extrait. Concentration jusque vers 5 % d'oxyde de lithium Li_2O .

Grillage pour rendre le spodumène plus facilement attaquable.

Pour les étapes suivantes on utilise deux types de procédés :

Attaque acide :

Attaque du concentré grillé par l'acide sulfurique à 250 °C, pour obtenir du sulfate de lithium.

Séparation des solides, traitement de la liqueur de sulfate de lithium par la soude et le carbonate de sodium pour précipiter le carbonate de lithium Li_2CO_3 .

Méthode par le carbonate de soude :

Réaction (en température et sous pression) du concentré grillé avec le carbonate de soude pour former du carbonate de lithium.

Réaction de la pulpe avec du dioxyde de carbone sous pression pour former du bicarbonate de lithium LiHCO_3 plus soluble que le carbonate.

Filtration pour éliminer les solides (contenant silicate d'aluminium, sels de fer et de magnésium, ...).

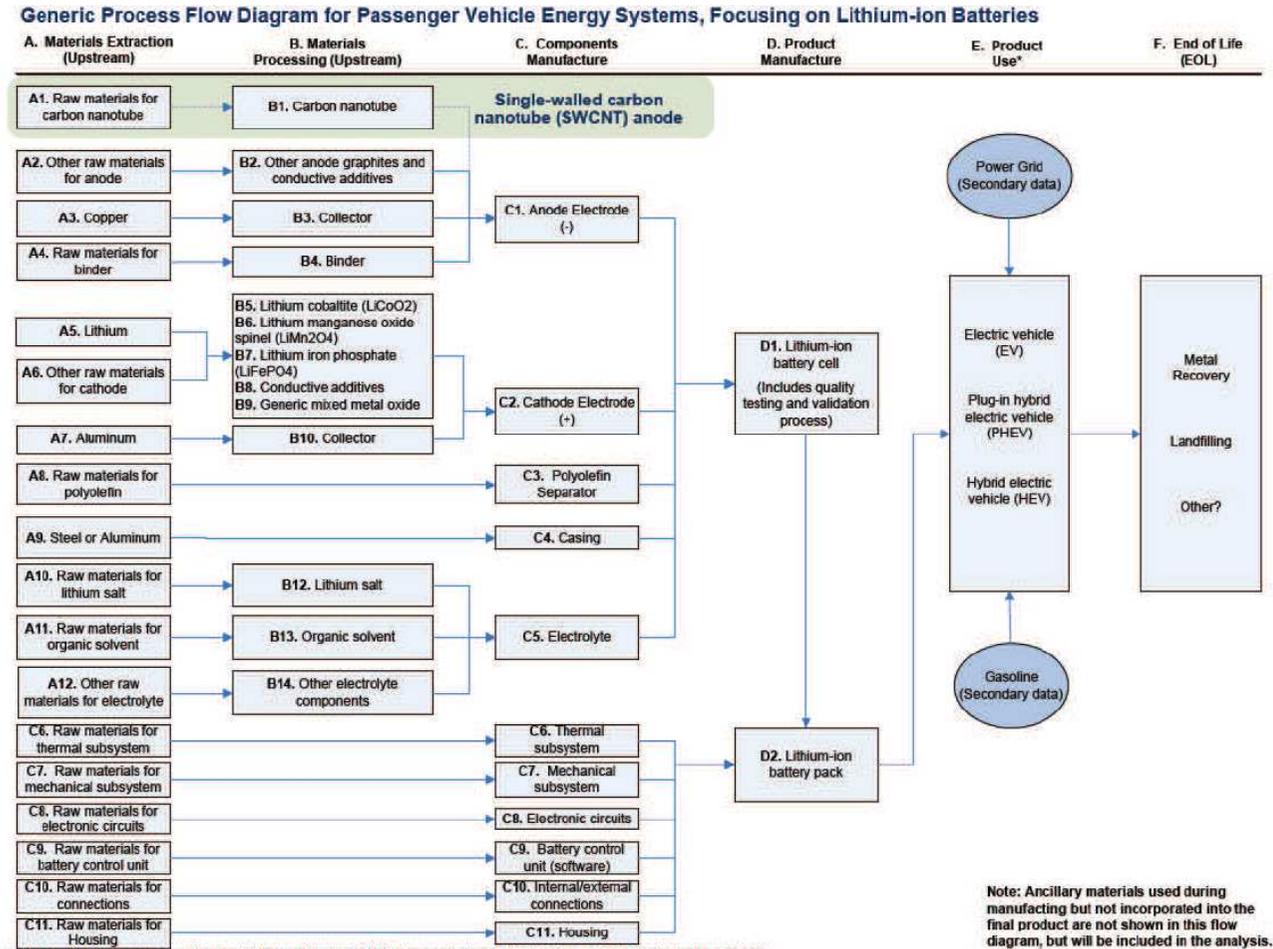
Chauffage et évaporation pour éliminer le dioxyde de carbone et précipiter le carbonate de lithium Li_2CO_3 .

Filtration pour récupérer le Li_2CO_3 .

²⁷ Selon les concentrations respectives des différents sels, des variantes de ce procédé sont utilisées.

ANNEXE 2

DIAGRAMME DU PROCEDE DE FABRICATION DES BATTERIES LITHIUM-ION POUR VEHICULES ELECTRIQUES (source [24])



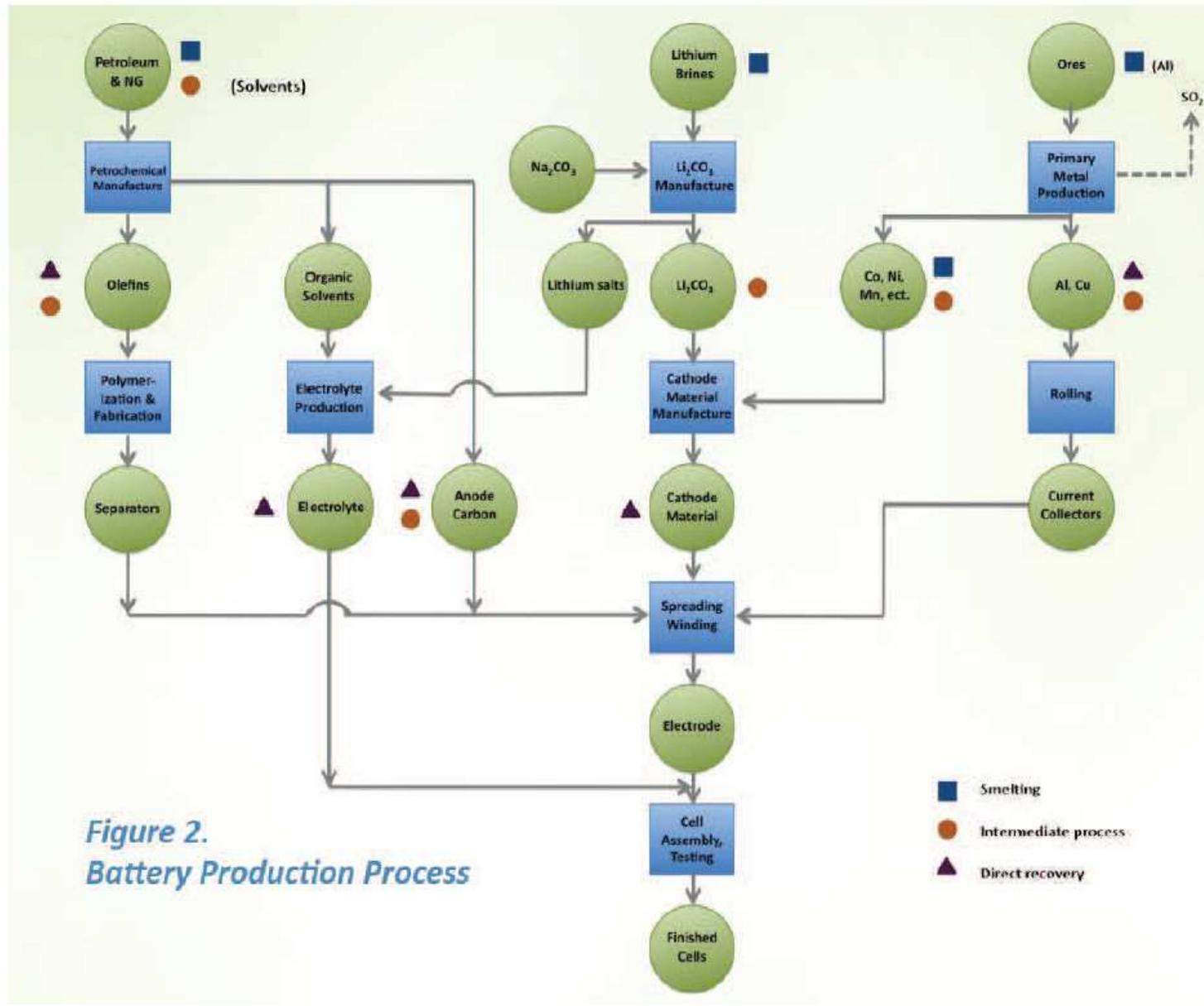


Figure 2.
Battery Production Process

CHROME MÉTAL (Cr)

9 Août 2012

Avertissement : la présente étude a pour objet principal le chrome métal pour les applications dans les superalliages ; les autres sujets relatifs au chrome seront abordés dans la mesure où ce sera pertinent pour l'objet principal de l'étude.

Résumé :

Le minerai de chrome est extrait en grandes quantités pour les besoins de l'industrie de l'acier (aciers inoxydables en particulier). L'essentiel de la production de chrome métal pour les superalliages à base nickel et cobalt passe par l'intermédiaire de l'oxyde de chrome de qualité métallurgique, qui est réduit en métal par aluminothermie.

Le marché mondial du chrome métal est de l'ordre de 42 000 t, dont un tiers pour les superalliages aéronautiques et un tiers pour les autres superalliages. La demande devrait croître régulièrement.

Deux producteurs de chrome métal sont implantés en Union européenne, dont un en France, mais leurs approvisionnements en oxyde de chrome proviennent du Kazakhstan et des USA.

Les risques d'approvisionnement proviennent moins de l'étape d'extraction minière que du petit nombre d'acteurs de la production d'oxyde métallurgique et de chrome métal.

Les deux points qu'il conviendrait de suivre particulièrement seraient :

- le contrôle de la société française et la volonté des actionnaires de conserver une position forte dans la production de chrome pour superalliages aéronautiques ;
- la fragilité de son approvisionnement en oxyde.

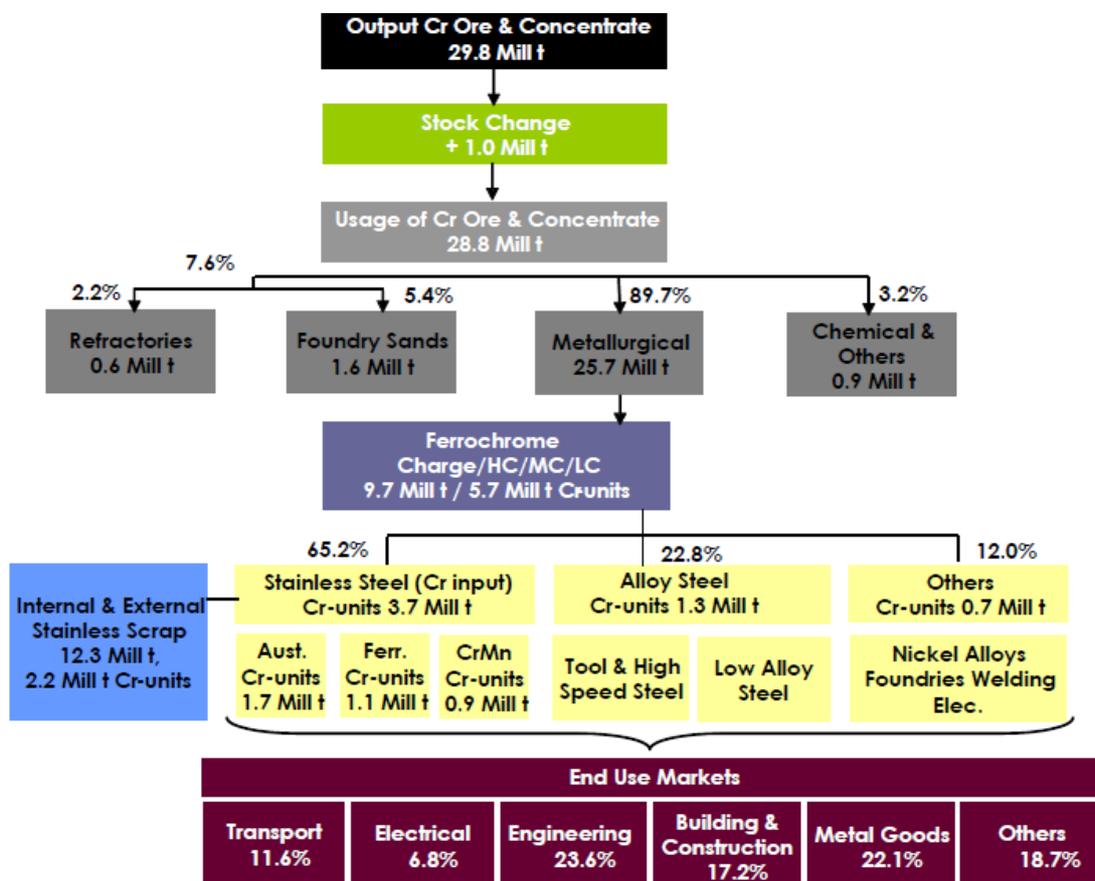
1- Demande : produits et utilisations

1.1 Produits intermédiaires et utilisations²⁸

Le chrome est produit à partir du minerai de chromite (oxyde de fer et de chrome de formule chimique FeCr_2O_4 , contenant en masse 46,46 % de l'élément chrome).

La référence [4] donne une tentative de décomposition des flux des produits à base de chrome en 2010, pour une production estimée de l'ordre de 29,8 Mt de minerais et concentrés.

Figure 1 : Flux des produits à base de chrome en 2010 (source [4])



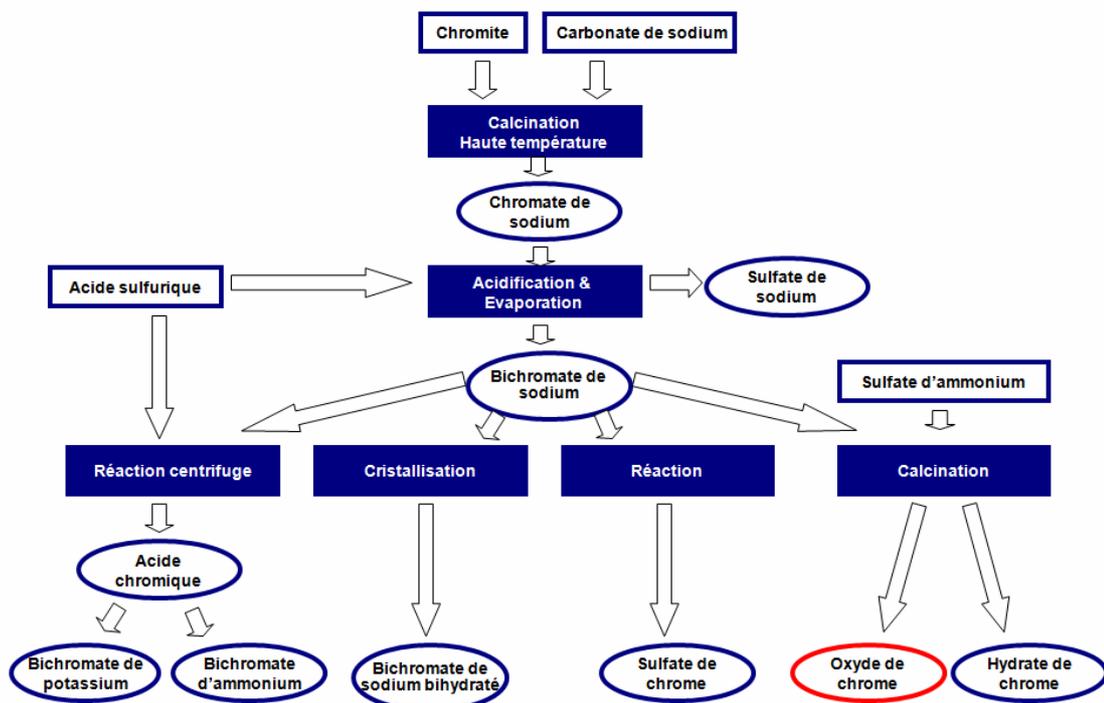
90 % de la chromite est convertie (dans des fours à arc) en ferrochrome, utilisé dans l'élaboration des aciers inoxydables. Par teneur en carbone décroissante et teneur en chrome croissante, on distingue trois grands types de qualité : charge-chrome, ferrochrome carburé, ferrochrome bas carbone

²⁸ Les informations de ce paragraphe sont issues du site de l'International Chromium Development Association, www.icdacr.com

Autour de 5 % de la chromite extraite seraient employés dans les sables de fonderie (métaux ferreux et non ferreux). Environ 2 % seraient utilisés dans l'industrie des réfractaires (une basse teneur en silice, de l'ordre de 0,7 %, est nécessaire).

Environ 3 % de la chromite est convertie en produits chimiques ; la première étape est la production du chromate de sodium, que l'on obtient par calcination de la chromite avec du carbonate de sodium. Le chromate de sodium est la matière première pour toute une famille de produits chimiques : bichromates de sodium, de potassium, d'ammonium, acide chromique, oxyde de chrome, sulfate de chrome. La principale utilisation actuelle est le tannage des cuirs, qui utilise le sulfate de chrome ; la seconde utilisation est le traitement de surface des plastiques et des métaux (on distingue le chromage décoratif et le chromage dur ; citons aussi la passivation du zinc) ; une autre application des dérivés du chrome est constituée par les pigments (peintures, plastiques, céramiques) ; l'oxyde de chrome pur est utilisé pour des réfractaires de haute performance, seul ou combiné à de la zircone, de l'alumine ou de la silice ; certains catalyseurs et oxydants utilisés dans la chimie sont à base de dérivés du chrome.

Figure 2 : Chaîne de production des produits chimiques à base de chrome (source [3])



Le chrome métal, qui est du chrome pratiquement pur, est produit soit par aluminothermie de l'oxyde de chrome (réduction de l'oxyde chromique Cr_2O_3 par l'aluminium), soit par électrolyse (à partir d'une solution produite par attaque à l'acide sulfurique de ferrochrome ou de chromite). Actuellement le procédé aluminothermique représente la plus grande partie de la production La pureté est

supérieure à 99 %, les impuretés étant Fe, Al, Si. Les qualités vont des qualités standards (99 à 99,4 % de Cr) aux qualités supérieures (99,6 % de Cr) et dégazées (99,8 % de Cr et faible teneur en gaz).

Toxicité : Les principaux composés courants du chrome ayant un degré de toxicité élevé sont ceux qui présentent un degré d'oxydation de 3 (chrome trivalent Cr(III) comme dans l'oxyde chromique Cr_2O_3), et surtout de 6 (chrome hexavalent Cr(VI) comme dans le trioxyde CrO_3 / acide chromique H_2CrO_4) ; pour plus de détails, on consultera [8]. Le Cr(VI) est utilisé dans les pigments, le traitement de surface, les fongicides et conservateurs du bois, et dans les catalyseurs ou réactifs de synthèse organique ; il peut être présent dans les fumées produites lors de la soudure ou de l'élaboration d'alliages au chrome. La production de chrome métal par aluminothermie comprend une étape de production du bichromate, qui est un composé du Cr(VI).

1.2 Utilisations finales du chrome métal

Le volume de la consommation de chrome métal serait de l'ordre de 42 000 t en 2011 [3].

La principale utilisation du chrome métal est comme élément d'addition dans les superalliages à base nickel ou cobalt utilisés dans les parties chaudes des moteurs aéronautiques et des turbines à gaz. L'Inconel 718 est un exemple d'un tel superalliage et contient autour de 20 % de chrome.

Les superalliages incorporant du chrome sont aussi utilisés :

- dans l'industrie automobile pour les soupapes de moteurs (soupape entièrement en superalliage ou bimétallique) et les turbocompresseurs ;
- dans l'extraction du pétrole et du gaz (environnement très corrosif), dans l'industrie chimique et pétrochimique ;
- dans l'industrie nucléaire : tubes de générateurs de vapeur.

Le chrome intervient dans la fonderie d'alliages d'aluminium (pour l'automobile, les transports) comme affineur de grain et durcisseur. Il est introduit sous forme de briquettes de poudre d'aluminium et de chrome ou de tablettes d'alliages mères Cr-Al (5 à 20 % de chrome).

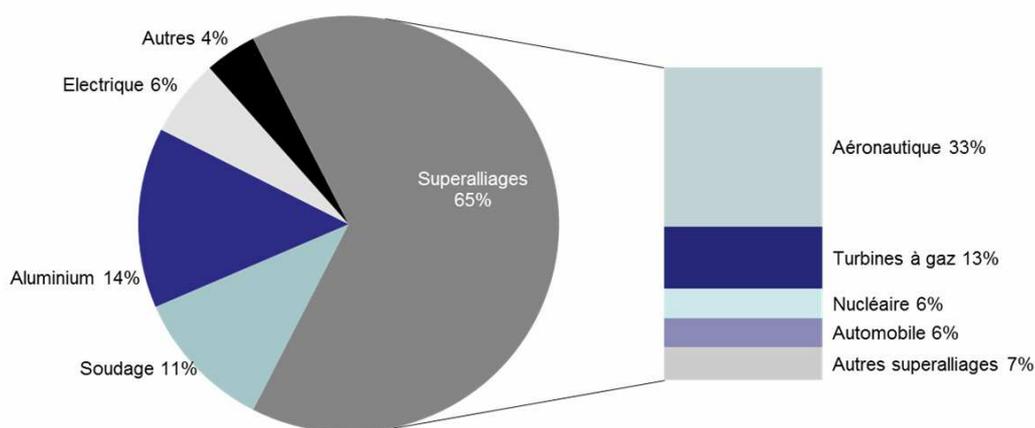
La poudre de Cr métal est utilisée pour la production de fils fourrés (méthode d'introduction d'éléments dans les alliages), d'électrodes de soudage.

Autres applications :

- Résistances électriques nickel-chrome (fours électriques, sèche-cheveux, grille-pains, ...),

- Éléments de contact dans les contacteurs sous vide pour moteurs, transformateurs, systèmes de commutation,
- Prothèses médicales en superalliages cobalt-chrome-molybdène (typiquement 62,5 % de Co, 30,5 % de Cr, 5% Mo),
- Alliages mères cuivre-chrome, aluminium-chrome,
- Piles à combustible à oxyde solide (plaques d'interconnexion Chrome-Fer-Yttrium),
- Cibles pour dépôt de chrome par PVD.

Figure 3 : Répartition des utilisations du chrome métal (source : [3])

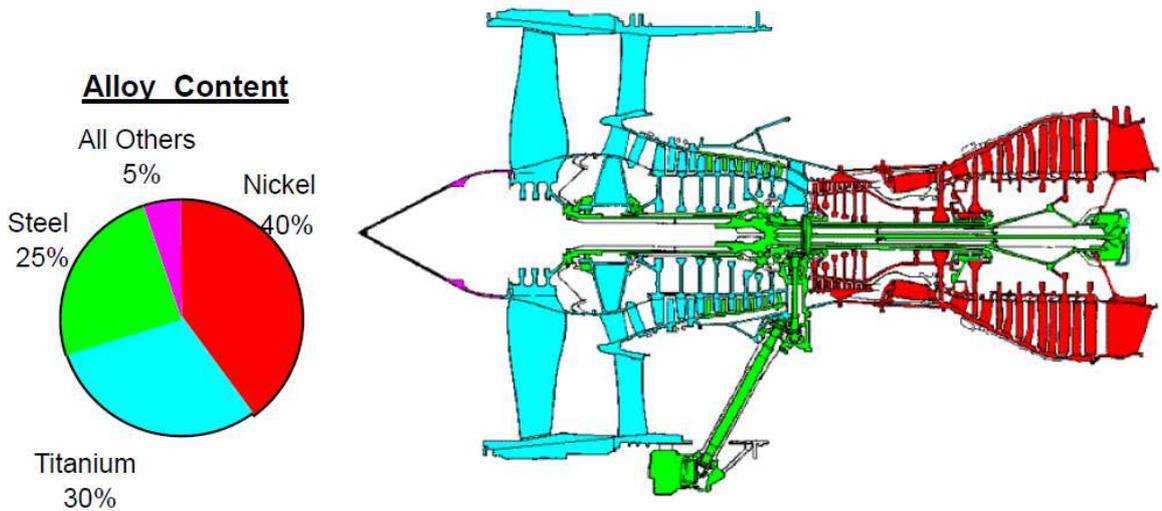


L'emploi du chrome métal dans les superalliages représenterait donc environ 27 000 t par an (65 % de 42 000 t).

1.3 Données sur l'utilisation du métal dans la filière aéronautique

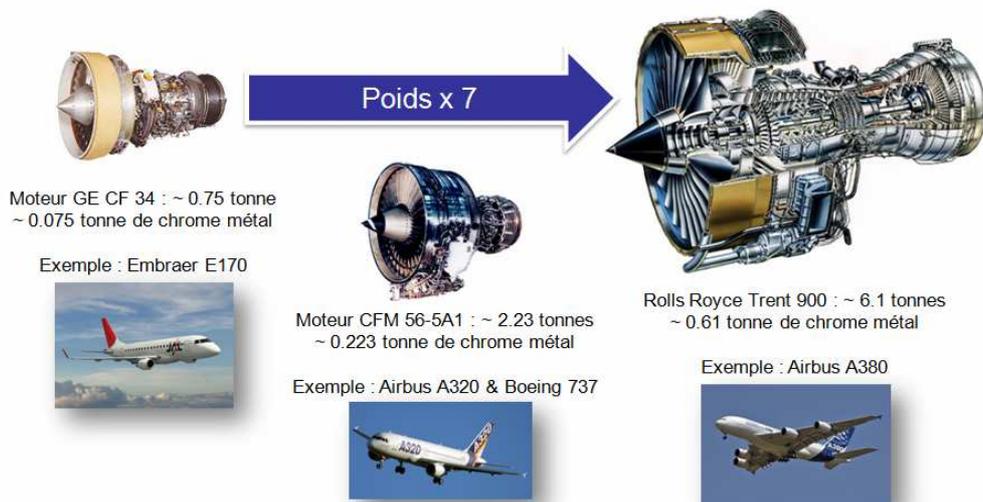
Les superalliages base nickel sont utilisés dans la partie chaude des moteurs : chambre de combustion et turbine, où la température et les risques de corrosion sont les plus élevés. La consommation de chrome pour les superalliages aéronautiques serait de 14 000 t (33 % de 42 000 t).

Figure 4 : Utilisation de différents alliages dans un moteur civil (document Rolls-Royce [5])



Selon [3], 50 % du poids des moteurs est représenté par les superalliages base nickel, dont 20 % est du chrome, le chrome représenterait donc environ 10 % du poids du moteur.

Figure 5 : Proportion de chrome dans les moteurs aéronautiques (source [3])

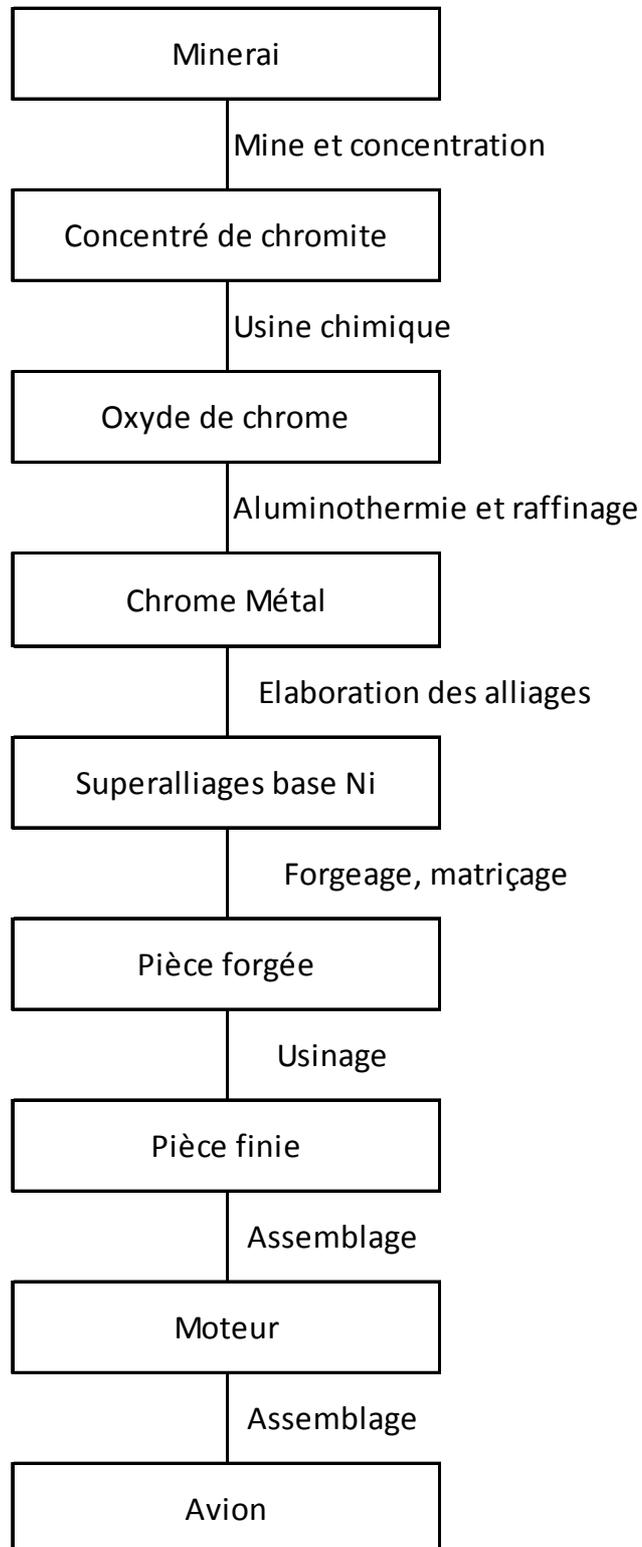


Les moteurs contiennent une proportion similaire de superalliages base nickel : **~50% du poids total du moteur**
Avec une proportion similaire de chrome métal : **~20% du poids de superalliage**

Avec un prix du chrome métal de 30 \$/kg, le coût d'achat du métal dans un moteur CFM 56-5A1 serait de l'ordre de 6 700 \$; ceci ne reflète pas exactement l'intégralité du coût lié à cette utilisation du chrome, car il faudrait prendre en compte le rapport entre la masse de superalliage achetée et celle présente sur le moteur fini, le recyclage des chutes de fabrication, etc.

Figure 6 : Chaîne simplifiée des étapes de production, depuis le minerai jusqu'à l'avion

Du minerai de chrome à l'avion : chaîne simplifiée



La production de chrome métal doit être certifiée aéronautique.

2- Offre mondiale

2.1 Volume et répartition géographique de la production minière de chromite

Le BGS [1] donne une liste de pays producteurs avec les tonnes de minerais et de concentrés produits :

Figure 7 : Pays producteurs de minerais et de concentrés de chrome

Production minerais et concentré (kt)	2009	2010
RSA	6 865	10 871
Kazakhstan	8 059	8 594
Inde	3 413	4 262
Turquie	1 770	1 904
Brésil	700	700
Oman	637	640
Finlande	247	598
Zimbabwe	194	510
<i>sous-total</i>	<i>21 885</i>	<i>28 079</i>
Autres pays (*)	1 515	1 921
Total mondial	23 400	30 000

(*) Albanie, Madagascar, Soudan, Afghanistan, Chine, Iran, Pakistan, Philippines, Australie, Russie, Vietnam, EAU, Bulgarie

L'USGS [2] a effectué la conversion des productions de minerais et concentrés en minerais de chromite de qualité commerciale (45 % de Cr₂O₃).

Figure 8 : Production mondiale en kt d'équivalent de minerai commercialisable de chromite (source [2])

Production minière chromite (kt)	2009	2010	2011	Réserves
RSA	6 870	10 900	11 000	200 000
Kazakhstan	3 330	3 830	3 900	220 000
Inde	3 760	3 800	3 800	54 000
USA				620
Autres pays	5 340	5 170	5 300	
Total	19 300	23 700	24 000	474 620

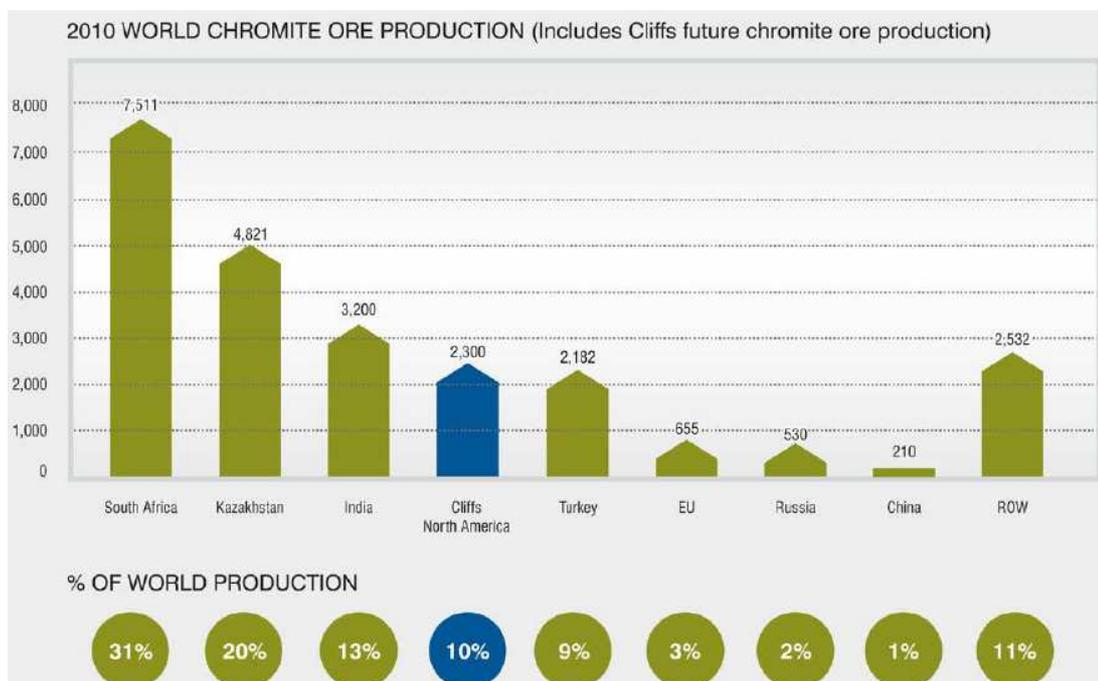
La production mondiale serait donc de l'ordre de 24 millions de tonnes (en équivalent concentré commercial). Les trois principaux pays producteurs sont la république sud-africaine (RSA), le Kazakhstan et l'Inde.

La production sud-africaine de minerai de chrome devrait croître au rythme de 10 % par an sur les années 2010-2015 [7], en grande partie en raison de la récupération du chrome contenu dans les rejets (tailings) des mines de platine.

Parmi les principaux producteurs de minerai de chromite on peut citer (liste non exhaustive) :

- Finlande : Outokumpu
- Inde : OMC, Tata Iron and Steel Corp, FACOR, Indian Metals and Ferro Alloys
- Kazakhstan :
 - o Eurasian Natural Resources Corporation (ENRC), mines de Donskoy et Saranovskaia
 - o Mechel (société russe), mine de Voskhod dans la région d'Aktyubinsk
- Afrique du Sud :
 - o Merafe Resources
 - o Samancor Chrome Ltd
 - o AMCOL
 - o African Rainbow Minerals
 - o Xstrata South Africa
 - o Norilsk Nickel Africa
 - o ASA Metals (JV entre Sinosteel et la région du Limpopo)
 - o Chromex Mining
 - o Hernic Ferrochrome
 - o International Ferro-Metals
- Turquie : ETI Krom
- Canada : Cliffs Natural Resources prévoit [6] de démarrer en 2015 une mine de 2,3 Mt/an de chromite (presque 10 % de la production mondiale actuelle).

Figure 9 : Production mondiale 2010 de chromite, telle que présentée par Cliffs Natural Resources (source [6])



On voit que les chiffres indiqués par [6] sont différents de ceux de l'USGS.

La Chine a peu de ressources et importe massivement du minerai (RSA, Inde) pour produire du ferrochrome. Les producteurs sud-africains de FeCr voient leurs coûts augmenter (salaires, électricité, Rand fort) alors qu'ils se heurtent à la concurrence sur ce produit des producteurs chinois de FeCr qui importent le minerai sud-africain.

2.2 Production de produits chimiques à base de chrome

Les principaux producteurs de produits chimiques à base de chrome sont :

- USA : Elementis Chromium
- Allemagne et RSA : Lanxess (spin-off de Bayer) ; en RSA Lanxess CISA possède la mine de chromite de Rustenberg ; forte position dans les pigments et les sels de tannage des cuirs
- Chine :
 - Chongqing Minfeng Chemical Company (capacité 2010 en chromate de sodium 70 kt/an, capacité en oxyde métallurgique 10 kt/an) ;
 - Xinjiang Sing Horn Group (producteur de métal)
- Russie :
 - Russian Chrome Chemicals 1915 ;
 - Novotroisk Plant of Chemical Compounds (producteur de métal)
- Kazakhstan : Aktymbinsk Chromium Chemicals Plant
- Japon : Nippon Chemical Industrial Company
- Turquie : Soda Sanayii

L'oxyde chromique utilisé pour la production de chrome métal par aluminothermie doit avoir une qualité spécifique (supérieure à celle de l'oxyde pour pigments ou pour réfractaires).

2.3 Production de chrome métal

Les producteurs de chrome métal sont :

- En France, Delachaux : production d'environ 9 000 t en 2011 ; capacité de production de l'ordre de 10 000 t/an (aluminothermie)
- Au Royaume-Uni, LSM (London & Scandinavian Metallurgical Group, groupe AMG) : capacité 7 000 t/an (aluminothermie)
- En Russie :
 - Kluchevsky Ferroalloy Plant : capacité de 10 000 t/an (aluminothermie)
 - Novotroitsk Plant of Chemical Compounds : capacité de 9 000 t/an (aluminothermie)
 - Polema JSC (procédé électrolytique, petite production de cibles pour dépôt type PVD)
- Au Japon :
 - JMC à Oguni ; JMC a également une filiale aux USA, JMC USA, qui produit de petites quantités de chrome ultra pur pour les cibles de PVD pour l'électronique (capacité de l'ordre de 20 t/an)
 - Nippon Denko : capacité de 1 000 t/an par aluminothermie
- En Chine, deux producteurs :
 - Xinjiang Sing Horn Group, avec une capacité de 10 000 t/an à Linghai et une petite capacité de chrome électrolytique à Turpan
 - CITIC Jinzhou Ferroalloy Plant

Toutes les capacités ne sont pas connues avec exactitude, mais la capacité actuelle semble excédentaire par rapport à la demande.

D'après [11], les deux producteurs européens de chrome métal, Delachaux et LSM, s'approvisionnent en oxyde de qualité métallurgique auprès d'Elementis Chromium (USA) et d'Aktyubinsk Chromium Chemicals Plant (Kazakhstan), alors que les producteurs russes et chinois sont intégrés à l'amont dans la production d'oxyde. Delachaux s'approvisionne majoritairement auprès du fournisseur kazakh, et minoritairement auprès de l'américain.

La qualité atteinte par les acteurs russes et chinois est inférieure à celle de Delachaux et LSM.

2.4 Production de superalliages

Parmi les principaux producteurs de superalliages, ou d'alliages-mères²⁹ comme GfE, on peut citer (liste non exhaustive) :

- En France : Aubert et Duval (groupe Eramet), Aperam (groupe ArcelorMittal).
- Au Royaume-Uni : Allvac (groupe ATI) ; Ross et Catherall (groupe Doncasters) ; Howmet (groupe Alcoa) ; Firth Rixson.
- En Allemagne : Thyssenkrup VDM ; Doncasters Bochum (groupe Doncasters) ; GfE (groupe AMG).
- En Autriche : Voestalpine Edelstahl (anciennement Böhler-Uddeholm).
- En Italie : Valbruna.
- Aux USA : PCC Energy (1^{er} producteur d'alliages base nickel) ; Carpenter Technologies ; ATI ; Haynes International ; Certified Alloys (groupe Doncasters) ; Howmet (groupe Alcoa) ; le groupe Cannon-Muskegon (et sa filiale Greenville Metals).
- En Australie : WASA Western Australia Specialty Alloys (groupe PCC).
- En Afrique du Sud : Avalloy.
- Au Japon : Hitachi Metals ; MMC Superalloy Corporation (groupe Mitsubishi Materials Corporation) ; IHI Master Metal (groupe IHI).
- En Russie : VIAM.
- En Inde (Hyderabad) : Mishra Dhatu Nigami Limited (Midhani).
- En Chine : BIAM (Beijing International Aeronautical Materials Corp.), et sa filiale BIAM Alloys spécialisée dans la refusion de scraps.

Nombre de ces producteurs élaborent aussi des alliages de titane. Le nombre d'acteurs est élevé, et beaucoup d'entre eux appartiennent à des pays pour lesquels *a priori* on peut considérer que le risque géopolitique est faible. Le savoir-faire est présent en Europe et en France.

La transformation ultérieure des superalliages (par exemple forgeage-matriçage) est effectuée soit par ces acteurs eux-mêmes, soit par des métallurgistes spécialisés.

2.5 Recyclage

Le chrome contenu dans les aciers est recyclé lors du recyclage de ces alliages. Les déchets peuvent provenir du cycle de production (aciérie ou étapes ultérieures), ou des produits en fin de vie, avec des échelles de temps différentes (quelques mois pour les déchets du cycle de production, jusqu'à 15-20 ans, voire plus, pour les produits en fin de vie).

²⁹ Un alliage mère (master alloy en anglais) est un alliage comportant 2 ou plusieurs composants de l'alliage final, mais qu'on utilise de préférence aux métaux purs parce qu'il est plus facile ou moins coûteux à élaborer, ou plus facile d'emploi.

En 2011 aux USA, le chrome recyclé dans les déchets d'aciers inoxydables représentait environ 40 % de la consommation apparente de chrome [2].

2.6 Substitution

Le chrome n'a de substitut ni dans les aciers inoxydables, ni dans les superalliages base nickel ou cobalt.

2.7 Évolution des prix

Il n'y a pas de cotation officielle du chrome sur un marché comme le LME. Certains journaux ou sites internet publient des prix, qui le plus souvent sont des prix « spot » ; les prix auxquels sont conclus les contrats entre clients et fournisseurs peuvent s'en écarter sensiblement.

Figure 10 : Prix du concentré sud-africain, départ vers le marché chinois (source : www.metal-pages.com)

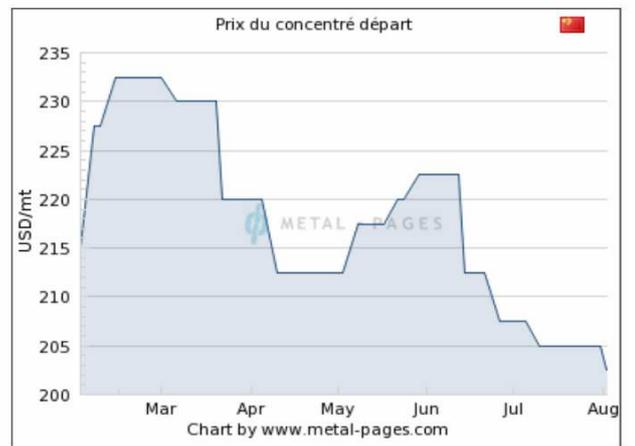


Figure 11 : Évolution des prix du ferrochrome de début 2006 à août 2012 en \$/kg (source : www.infomine.com)

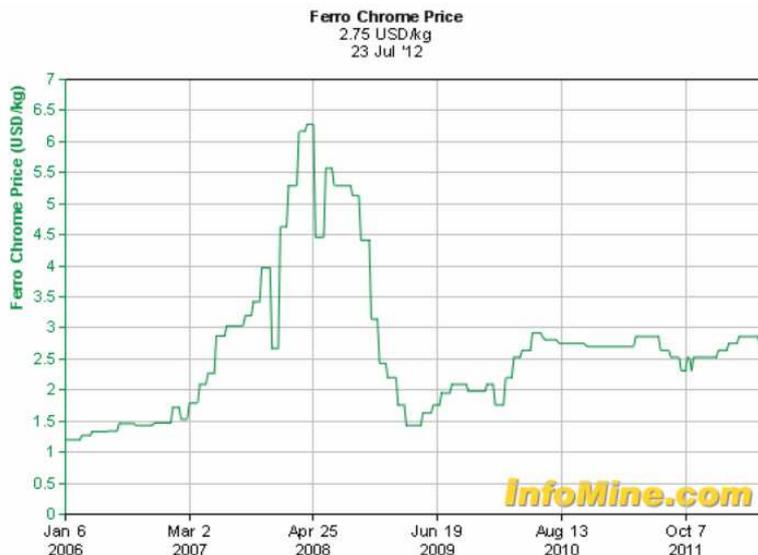


Figure 12 : Prix du chrome métal aluminothermique, minimum 99 %, marché Union européenne (source : www.metal-pages.com)



À l'unité de Cr, le chrome métal est beaucoup plus cher que le ferrochrome. Le prix dépend de la qualité ; le prix du chrome pour superalliages aéronautiques serait de l'ordre de 30 \$/kg.

3- Contraintes sur l'offre et projets de développement

Contrairement aux autres métaux utilisés dans les alliages aéronautiques que nous avons étudiés : vanadium, niobium, molybdène, nous pensons *a priori* que les risques d'approvisionnement liés à l'amont de la chaîne (extraction minière) sont réduits.

En effet, alors que pour les trois métaux cités les productions primaires sont faibles : autour de 70 000 t pour le vanadium, 60 000 t pour le niobium, 250 000 t pour le molybdène, et que de plus pour le molybdène une moitié de la production dépend de l'activité minière sur le cuivre dont il est un sous-produit, dans le cas du chrome la production minière se chiffre en millions de tonnes, et il fait l'objet d'une extraction spécifique pour une famille d'aciers extrêmement demandés. La production est répartie entre des sociétés qui ont une assise suffisante pour anticiper l'évolution de la demande.

Par ailleurs, les ressources mondiales sont importantes : selon [2] elles dépassent 12 milliards de tonnes de minerai de chromite (ramené à une qualité commerciale : au moins 45 % de chromite). Elles sont situées à plus de 95 % en Afrique du Sud et au Kazakhstan.

Les producteurs de superalliages base nickel sont en nombre suffisant et situés dans des pays ne posant pas *a priori* de problèmes géopolitiques importants, certains étant même situés sur le territoire français ou européen.

Si un risque d'approvisionnement est à rechercher, il se situe au niveau de la production d'oxyde ou de chrome métal.

4- Analyse de quelques facteurs de criticité

4.1 Rareté relative des ressources minières

Les ressources minières sont abondantes.

Elles sont cependant concentrées sur deux pays : Afrique du Sud et Kazakhstan. Des problèmes affectant l'ensemble de la filière minière sud-africaine pourraient avoir des conséquences sur l'ensemble de la chaîne chrome.

4.2 Concentration dans la chaîne de production

Le nombre de sociétés exploitant des mines est élevé (voir § 2.1) ; mais le nombre d'acteurs est plus restreint aux étapes de la production d'oxyde de chrome métallurgique et de chrome métal.

Il y a deux producteurs de chrome métal en UE, dont un en France.

4.3 Importance pour la filière aéronautique

Le chrome métal représente environ 10 % du poids des moteurs et il est irremplaçable dans les superalliages utilisés dans la partie chaude.

On peut signaler que le chrome hexavalent est utilisé pour les traitements de surface de certaines pièces, mais des solutions de remplacement, même moins performantes, devront être trouvées en raison de l'évolution des règlements concernant le Cr(VI) ; ces solutions peuvent dans certains cas utiliser encore du chrome (Cr(III) ou Cr métal déposé par PVD ou projection plasma par exemple).

5- Scénarios³⁰ prospectifs à 10 ans

5.1 Évolution de la demande

Dans le cadre de l'utilisation qui nous intéresse, la croissance de la demande est liée au nombre de moteurs aéronautiques produits, à la masse de superalliages dans chaque

³⁰ Rappelons qu'un scénario n'est pas une prédiction.

moteur et à la proportion de chrome dans les superalliages (cette dernière étant proche de 20 %).

ATI [9] et ICF International [10] ont étudié les tendances du marché des moteurs aéronautiques des années à venir :

- le nombre de moteurs pour avions commerciaux produits chaque année augmentera ;
- la flotte en service augmentant, la demande de pièces de rechange augmentera également ;
- la croissance de la poussée des nouveaux moteurs entraînera une masse de superalliages (et d'alliages de titane) plus importante par moteur.

Figure 13 : Projection de l'évolution de la production d'aéronefs 2011-2021 (source : [10])

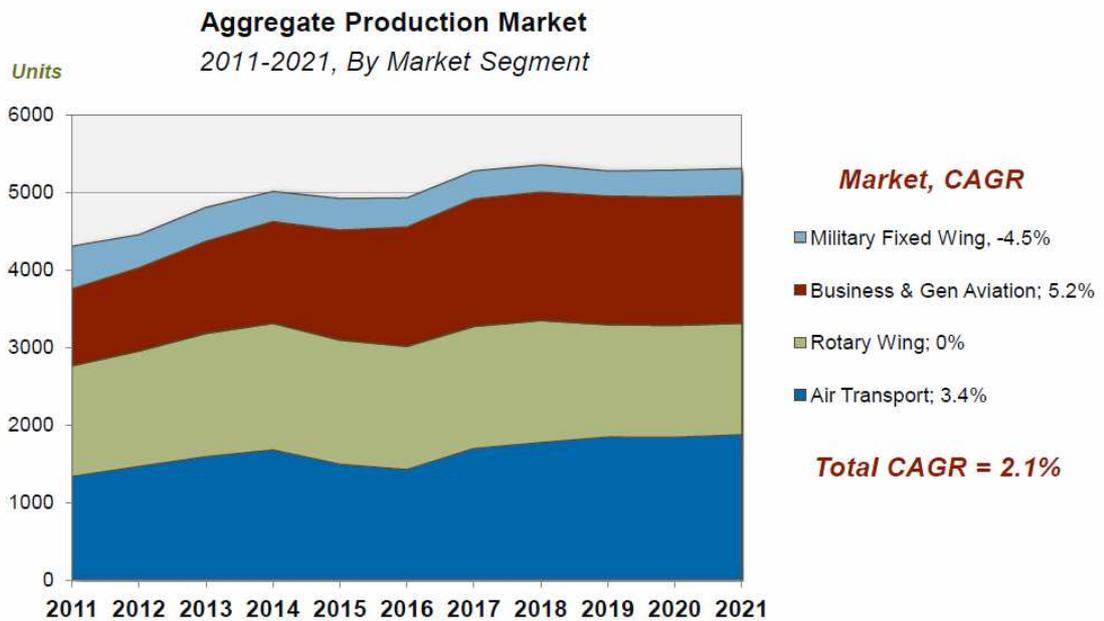
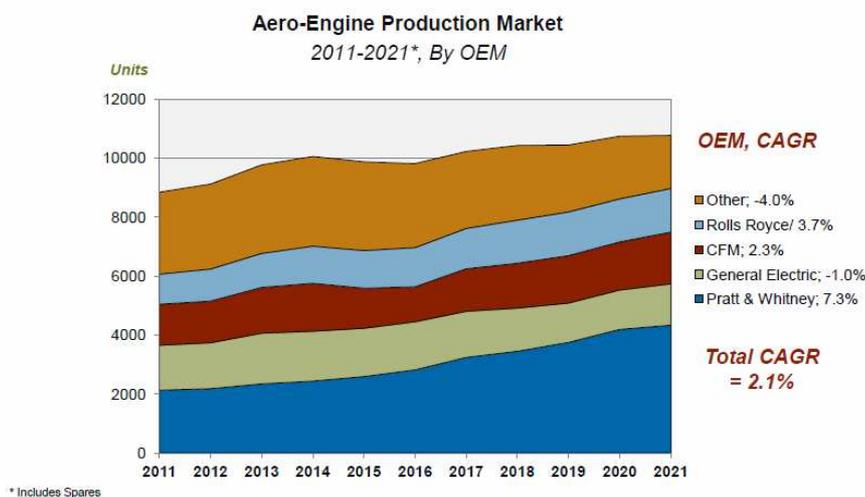


Figure 14 : Projection de l'évolution de la production de moteurs aéronautiques sur 2011-2021, incluant les remplacements (source : [10])

Annual Aero-Engine Production Should Exceed 10,000 Units By 2021, Including Production Units and Spares



Globalement, la demande de chrome métal est appelée à croître, aussi bien dans l'aéronautique que dans les turbines à gaz terrestres et les autres applications. Bien entendu il peut y avoir des fluctuations autour de la tendance, en raison de ralentissements temporaires ou d'accélération de la croissance économique globale ou d'un secteur particulier, en particulier l'aéronautique en raison de son poids (1/3) dans la demande de chrome métal.

On peut estimer la croissance à venir, en tendance, à 5-7 % par an (2 à 3 000 t supplémentaires par an).

5.2 Évolution de l'offre

L'offre de minerai de chromite, comme nous l'avons expliqué plus haut, ne semble pas être le facteur limitant pour la production de chrome métal. Le goulot d'étranglement potentiel se situe au niveau de la production d'oxyde de qualité métallurgique et de chrome métal.

Pour l'aéronautique, il faut y rajouter les contraintes de certification.

Le marché est de faible taille, il ne peut supporter un grand nombre d'acteurs. L'évolution de l'offre devrait plutôt provenir des augmentations de capacité de production de chrome des acteurs existants.

5.3 Évolution du bilan offre-demande

La croissance du marché devrait déclencher des investissements chez les producteurs d'oxyde chromique qualité métallurgique et de chrome métal. Compte tenu de la taille

du marché, des situations passagères de fourniture tendue et de surcapacité pourraient se produire, induisant des variations corrélatives des prix.

5.4 Pistes pour anticiper les risques de pénurie / tension sur les prix

La question de l'approvisionnement en chrome métal des producteurs de superalliages pour l'aéronautique se concentre donc sur les maillons production d'oxyde chromique de qualité métallurgique et production de chrome métal certifié aéronautique.

Le nombre d'acteurs européens est réduit, le leader mondial de la production de chrome pour aéronautique est la société française Delachaux, dont l'usine est à Marly. Depuis 2011 le fonds d'investissement CVC Capital Partners partage le contrôle du groupe Delachaux avec la famille André Delachaux ; sur le chiffre d'affaires du groupe (environ 820 M€), l'activité Métaux représente 10 %. Cette société s'approvisionne majoritairement auprès d'un fournisseur kazakh, dans le cadre d'une relation de long terme, et minoritairement auprès d'un américain.

Les deux points qu'il conviendrait de suivre particulièrement seraient :

- le contrôle de cette société et la volonté des actionnaires de conserver une position forte dans la production de chrome pour superalliages aéronautiques ;
- la fragilité de son approvisionnement en oxyde (actuellement assuré majoritairement par son partenariat avec un fournisseur kazakh).

-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-

Bibliographie

- [1] British Geological Survey, « World Mineral production 2006-2010 »
- [2] U.S. Geological Survey, Mineral Commodities Summaries, January 2012, accessible en ligne : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/chromium/mcs-2012-chrom.pdf>
- [3] Delachaux, Division Métaux, « Chrome Métal », 2012
- [4] Eurasian Natural Resources Corporation, « 2012 Spring Roadshow – Unlocking Value », June 2012
- [5] Amit Chatterjee, « Titanium in Aero-engines – Developments and the Way Forward », Titanium 2011 Conference, October 2-5, 2011
- [6] Cliffs Natural Resources Inc., Corporate Presentation, March 2012
- [7] Merafe Resources, Chrome ore brochure, March 2012
- [8] INERIS, « Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : chrome et ses composés », version juillet 2011
- [9] Harshman, R., (ATI Aerospace) « Titanium Demand and Trends in the Jet Engine Market », 2011
- [10] Holland, M., (ICF International) « Aerospace Industry Dynamics – Implications for the Titanium Market »
- [11] U.S. Geological Survey, « 2009 Minerals Yearbook – Chromium », December 2011

MOLYBDÈNE (Mo)

30 juin 2012

Avertissement : la présente note est rédigée dans le cadre d'une étude précise, elle ne prétend donc en aucun cas à l'exhaustivité.

Résumé :

La consommation mondiale de molybdène sous toutes ses formes est de l'ordre de 250 000 tonnes par an ; la plus grande partie (77 %) est destinée à la sidérurgie, dont le ferromolybdène ; les produits chimiques à base de molybdène, en particulier les catalyseurs, représentent 14 % de la consommation, et les applications à haute valeur ajoutée comme les superalliages ou le molybdène métal et ses alliages représentent 9 %. Les applications dans l'aéronautique et la défense ne représentent que 3 % de la demande totale.

À l'amont de la chaîne de valeur, la production minière de concentrés provient à parts à peu près égales de mines de cuivre dont le molybdène est un sous-produit et de mines de molybdène. Les acteurs sont assez nombreux ; géographiquement la production se fait essentiellement dans deux régions : les Amériques (Nord et Sud) et la Chine. L'Europe dépend des autres continents.

Le recyclage des aciers contenant du molybdène et des catalyseurs fournit environ 15 % de la consommation.

La croissance de la consommation devrait être vigoureuse dans les années à venir, en particulier sous l'effet de la montée en qualité des aciers produits en Chine et, pour les superalliages, du développement de la construction aéronautique.

La capacité de production minière devrait aussi croître régulièrement, grâce au développement de la production minière de cuivre et à l'ouverture de nouvelles mines dédiées au molybdène.

L'équilibre entre ces deux taux de croissance est délicat, de sorte qu'un risque de déficit global de l'offre de molybdène, sans être certain, ne peut être exclu.

Les pistes que l'on peut proposer pour anticiper la réalisation d'un scénario de déficit sont les suivantes :

- des prises de participation et/ou la conclusion d'accords avec l'amont de la filière pour sécuriser les approvisionnements ;
- l'accroissement de la récupération du molybdène par recyclage.

Pour la niche des produits destinés aux superalliages, on peut y ajouter :

- la constitution de stocks de précaution si l'évolution vers un déficit se confirme ;
- la prise de participation ou des accords long terme avec des industriels, non nécessairement mineurs, mais élaborant les produits type oxyde et métal ; un exemple est la participation de Plansee dans Molybmet ;

- l'amélioration de la récupération spécifique du molybdène métal et des superalliages ;
- la surveillance des acteurs détenant le savoir-faire de la production de molybdène métal et de superalliages pour s'assurer que les compétences et capacités de production sur le sol européen restent suffisantes.

1- Demande : produits et utilisations

1.1 Produits intermédiaires

Le molybdène est extrait soit de gisements où il est le principal métal, soit de gisements où il est un sous-produit de l'extraction du cuivre. Selon le recensement du BRGM [3], en 2008 sa production primaire provenait pour 46 % de gisements de cuivre (porphyres cuprifères), et pour 54 % de gisements où il est le produit principal (31 % dans les porphyres, 23 % dans des gisements sédimentaires) ; la Chine n'exploitait que des mines dont le molybdène est le produit principal, ce qui veut dire que sa production est plus sensible au prix du molybdène que celle d'autres acteurs pour lesquels c'est le prix du cuivre qui est le facteur principal.

Chaîne de production³¹ :

La première étape après l'extraction minière est l'obtention d'un concentré riche en sulfure de molybdène MoS_2 , en séparant les minéraux les plus riches du reste du minerai.

Ce concentré de sulfure est grillé pour obtenir l'oxyde de molybdène (MoO_3), qualifié d'oxyde technique car non encore purifié ; il contient au moins 57 % de molybdène, et moins de 0,2 % de soufre. 40 à 50 % du molybdène est utilisé sous cette forme, essentiellement comme élément d'addition dans les aciers et fontes.

Pour 30 à 40 % de la production d'oxyde technique, l'oxyde est mélangé avec de l'oxyde de fer et réduit par du ferrosilicium et de l'aluminium, pour obtenir le ferromolybdène (60 à 75 % de molybdène).

Environ 20 % de la production d'oxyde technique est transformée en composés chimiques tels que des molybdates et de l'oxyde MoO_3 pur.

L'oxyde pur peut être réduit par l'hydrogène en deux étapes pour obtenir de la poudre de molybdène métal.

Produits commercialisés : La chaîne de production du molybdène et ses différentes formes commercialisées sont données sous forme graphique par [3] (figure ci-après).

³¹ Voir le site de l'Association Internationale du Molybdène :
http://www.imoa.info/media_centre/molybdenum_key_facts.ph

Figure 1 : Schéma de la chaîne de production du molybdène (source : [3])

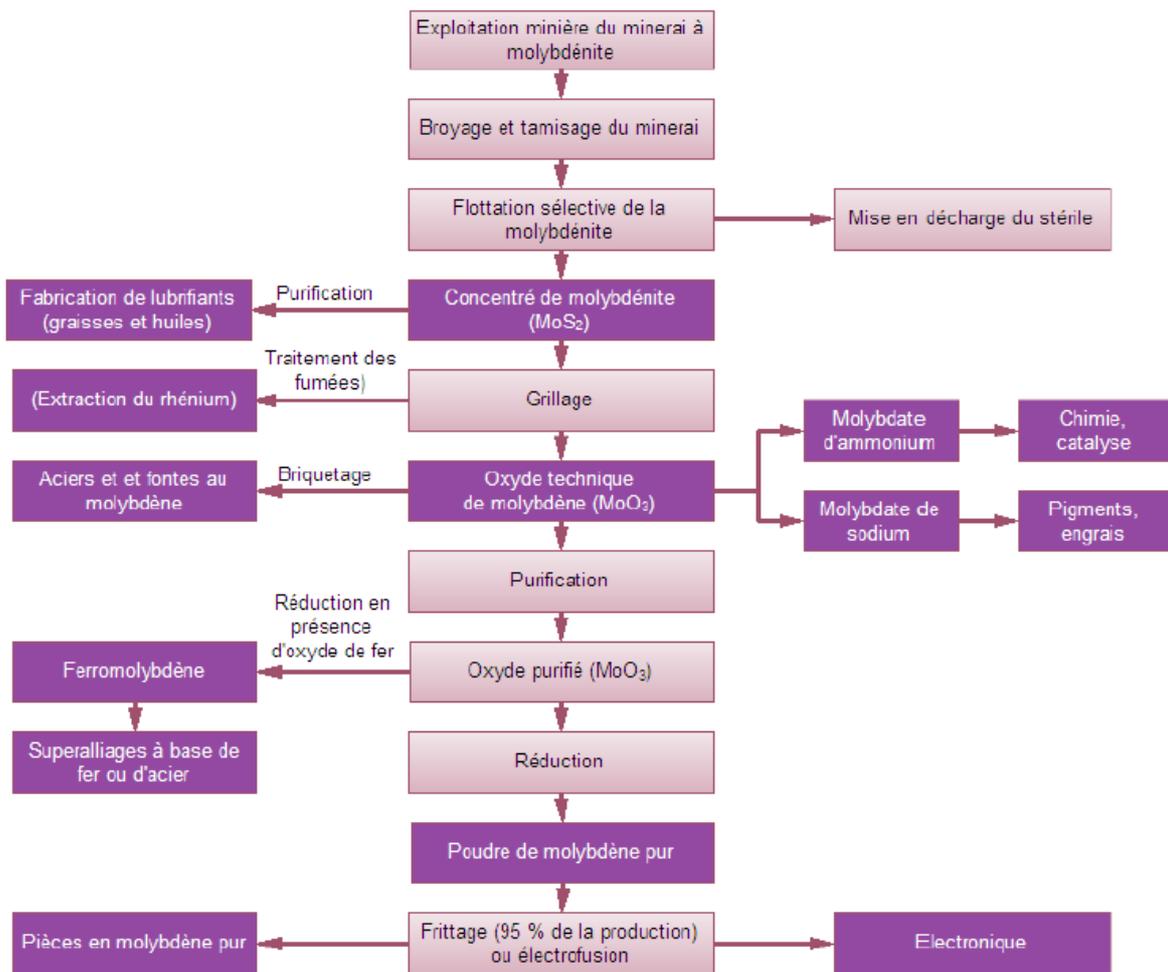


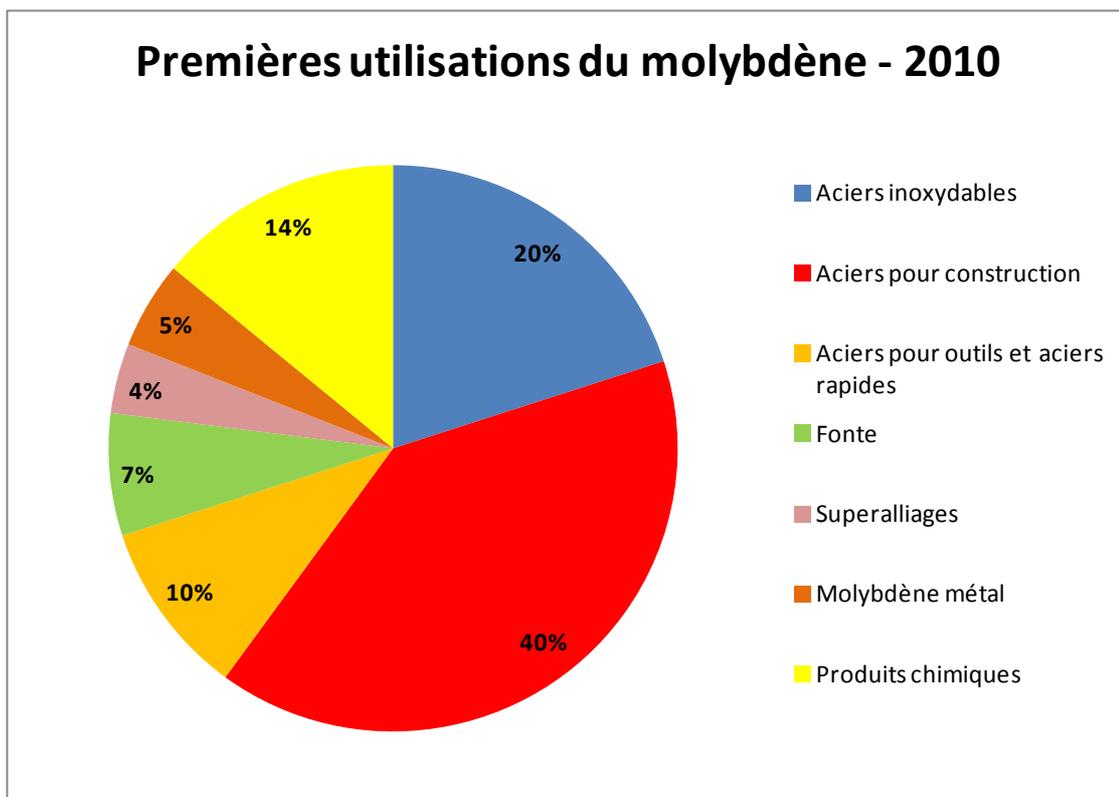
Figure 8 - Schéma de la filière de la production du molybdène à partir de la molybdénite, représentant les étapes de la production (cases roses) et les principaux produits intermédiaires commercialisés (cases violettes).

Un schéma un peu plus détaillé, mais en anglais, figure en annexe 1.

Une partie du molybdène utilisé provient du recyclage (voir § 2.4).

La figure suivante représente les formes d'utilisation du molybdène dans l'industrie ; elle ne concerne que le molybdène « neuf », c'est-à-dire hors molybdène provenant du recyclage (quantité de Mo « neuf », ou primaire, consommé en 2010 : 215 000 t). Près de 80 % du molybdène sont consommés en addition dans les fontes et aciers.

Figure 2 : Formes d'utilisation du molybdène primaire 2010 (source : site Internet de l'IMOA³²)



1.2 Utilisations finales

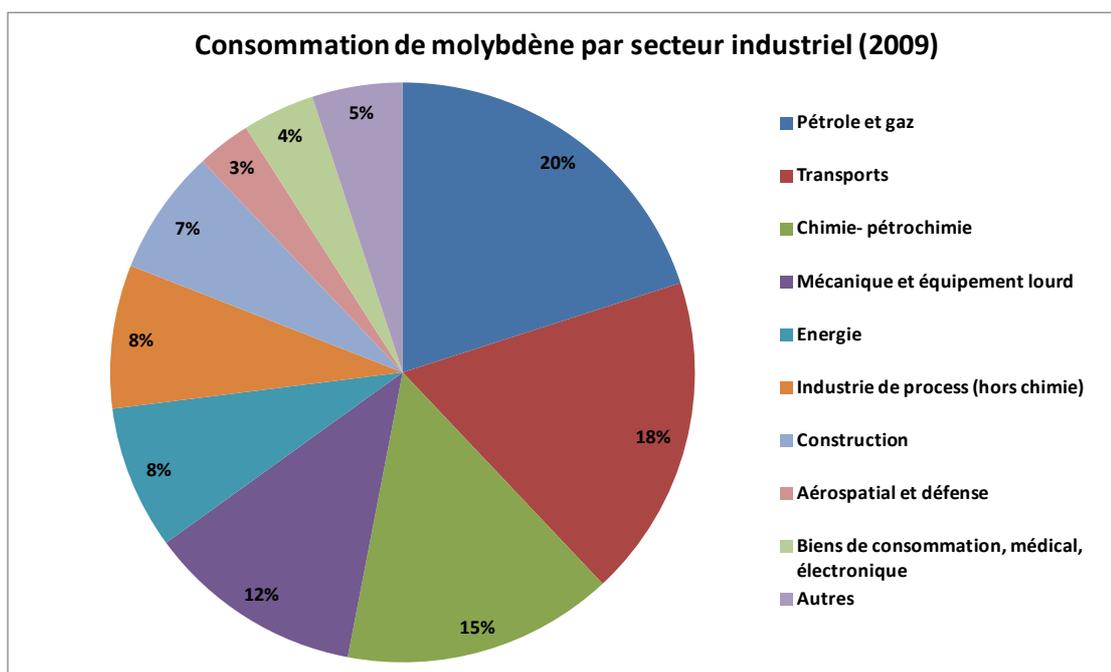
Les trois principaux domaines d'utilisation du molybdène sont :

- la filière de production des aciers, dont les aciers inoxydables, et de la fonte (environ 80 % de la consommation) ; le molybdène est introduit sous forme d'oxyde technique, de ferromolybdène, ou d'aciers de recyclage ;
- la filière des catalyseurs (environ 8 % de la consommation) ;
- la filière du molybdène métal, des alliages de molybdène, et des superalliages (environ 9 % de la consommation), à partir de molybdène métal.

L'Association Internationale du Molybdène (IMOA) présente [5] les secteurs utilisateurs de molybdène sous toutes ses formes (consommation 2009, 212 000 tonnes).

³² International Molybdenum Association : Association Internationale du Molybdène.

Figure 3 : Les secteurs industriels utilisateurs de molybdène (source : [5])



Le molybdène présente un point de fusion élevé (2 620 °C), une bonne résistance à la corrosion et à l'abrasion, et conserve ses propriétés mécaniques à haute température. Il est précieux dans les domaines métallurgiques pour les applications nécessitant le maintien de bonnes propriétés mécaniques à température élevée, et/ou en environnement corrosif.

Le molybdène est ajouté aux aciers, pour améliorer leur dureté, leur résistance à la corrosion, leurs propriétés mécaniques à haute température, leur aptitude au soudage (essentiellement dans les aciers faiblement alliés à haute limite d'élasticité), etc.

Il est également employé dans les aciers inoxydables (aciers incorporant du chrome) pour augmenter leur résistance à la corrosion.

On utilise le molybdène et ses alliages³³ pour en faire des outils d'élaboration et de travail des matériaux (métaux, verre) à température élevée : manipulation de métal liquide, extrusion, forgeage, ... ; pour le revêtement de pièces soumises à la friction ; pour des pièces d'équipement dans l'industrie chimique ; pour des fours et des éléments chauffants ; et dans l'industrie aérospatiale pour des pièces de moteurs. Son faible coefficient de dilatation thermique et sa conductivité thermique le rendent également intéressant pour les applications électriques et électroniques. L'alliage le plus courant est le TZM : base molybdène, 0,5 % de titane et 0,08 % de zirconium.

³³ Les métaux les plus couramment utilisés pour les alliages base molybdène sont le hafnium, le titane, le zirconium ; voir en annexe 2 les alliages proposés par la société Plansee (élaboration par métallurgie des poudres).

Il faut toutefois remarquer que le molybdène s'oxyde facilement en atmosphère oxydante à partir de 600 °C, ce qui interdit certaines applications et nécessite des précautions lors de sa transformation, et pour certaines utilisations la réalisation d'un revêtement protecteur (siliciure de molybdène).

Le molybdène est également utilisé comme élément d'addition dans des superalliages (en particulier base Nickel, comme l'Inconel 718³⁴, le C276³⁵ ; voir une liste en annexe 3), des alliages de titane, etc. Il est introduit sous forme de « pellets » de molybdène, obtenus par frittage sous hydrogène de poudre de molybdène.

Il apporte principalement deux fonctions aux superalliages : résistance à la corrosion, et utilisation à haute température. Les superalliages de nickel résistant à la corrosion sont utilisés dans les industries de la chimie, du pétrole et de la pétrochimie, du traitement des effluents, quand le milieu est très corrosif. Les superalliages de nickel pour hautes températures sont utilisés dans les turbines de moteurs aéronautiques ou de turbines à gaz, les équipements de combustion, de traitement thermique, etc.

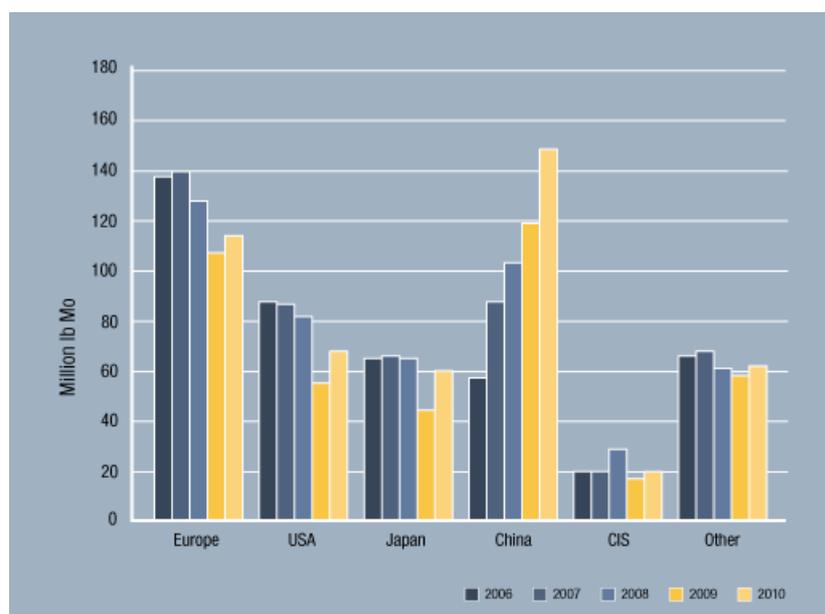
Volume de la demande : La consommation mondiale en 2009 (toutes provenances : molybdène primaire + recyclage) s'élevait à 212 000 tonnes [5]. RBC Capital Markets [12] indique que la demande globale aurait baissé de 9,9 % en 2009, aurait rebondi de 14,6 % en 2010, et estime sa croissance en 2011 à 6,2 %.

La répartition géographique de la consommation de molybdène primaire (figure ci-après) montre la forte croissance chinoise : la Chine est devenue le premier pays producteur et le premier consommateur de molybdène. En 2010, elle a consommé 32 % du molybdène primaire.

³⁴ **Inconel® 718** : 50 à 55 % de Ni ; 17-21 % de Cr ; 4,75 à 5,50 % de Nb ; 2,8 à 3,30 % de Mo ; Fe, etc.

³⁵ **C276** : Alliage base nickel, avec 15-17 % de Mo, 14,5 – 16,5 % de Cr, 4-7 % de Fe, 3-4 % de W, etc.

Figure 4 : Répartition géographique de la consommation de molybdène primaire et évolution 2006-2010 (source : site Internet IMOA ; chiffres en millions de lbs)



1.3 Données sur l'utilisation dans la filière aéronautique

L'Association Internationale du Molybdène (IMOA) a publié [7] un article listant les utilisations du molybdène à bord de l'Airbus A380.

Figure 5 : Utilisations du molybdène à bord de l'Airbus A380 [7]

System	Component	Material	Nominal composition ¹ , w-%	Mo, w-%	UNS number
Engines	Fan compressor	A 286	Fe-26Ni-15Cr-2Ti-1.25Mo-2Ti-Al	1-1.5	S66286
	Compressor disks	Ti6-3-2	Ti-6Al-3Mo-2Cr	3	NL ²
	Turbine vanes and disks	Alloy 718	Ni-19Cr-18.5Fe-5.1Nb-3Mo-Ti-Al	2.8-3.3	N07718
	Compressor and turbine bearings	M50	Fe-4.3Mo-4Cr-1V-Si-Mn	4-4.5	T11350
	Fuel tubing	Alloy 625	Ni-21.5Cr-9Mo-2.5Fe-2.6Nb	9	N06625
	Lubricants	MoS ₂	100MoS ₂	60	NL ²
	Fasteners (rivets, bolts)	A 286	Fe-26Ni-15Cr-2Ti-1.25Mo-2Ti-Al	1-1.5	S66286
Hydraulic systems	Landing gear, braking, flight control tubing	Type 316 SS	Fe-18Cr-12Ni-2.5Mo-Mn-Si	2-3	S31600
Power generation	Heat exchangers	Alloy 718	Ni-21.5Cr-9Mo-2.5Fe-2.6Nb	2.8-3.3	N07718
		Alloy 625	Fe-25Co-Mo	9	N06625
Avionics/electronics	Generators rotors and stators	25 Co	Fe-50Co-Mo	0.5	NL ²
		50 Co	Fe-80Ni-4.2Mo	0,5	NL ²
	Shielding	A753 Alloy 4	Fe-25Co-Mo	4.2	N14080
	Displays	Mo	99.95Mo min	100	NL ²
Landing gear	Landing gear boxes	300 M	Fe-1.8Ni-1.67Si-0.8Cr-0.8Mn-Mo-V	0.3-0.65	K44220
	Potential new alloy	X1CrNiMoAlTi 12-11-12	Fe-12Cr-11Ni-2Mo-1.5Al-Ti	2	NL ²

¹ Alloying elements with less than 1 weight per cent are listed by name only
² Not listed

On y trouve des aciers : inoxydables (A286, 316L), aciers semi-rapides M50, aciers à haute résistance 300 M ; des alliages base nickel, type Inconel 718 et 625, A753 Alloy 4 (N14080) ; des alliages base titane : Ti6-3-2 ; des alliages fer-cobalt ou fer-nickel ; du molybdène pur pour le traitement du verre des écrans d'affichage du cockpit.

2- Offre mondiale

2.1 Volume de production primaire

La production mondiale de molybdène dans les concentrés était de l'ordre de 242 000 t en 2010 et de 250 000 t en 2011 selon l'USGS ([1], [2]). Le BRGM [3] l'estime à 233 000 t en 2010. Le BGS à 250 000 t en 2010 [4].

2.2 Répartition géographique de la production de molybdène dans les concentrés

La Chine est le premier producteur mondial avec 38 % de la production minière, suivie par les USA (26 %) et le Chili (15 %).

Figure 6 : Répartition de la production minière 2009-2011 ([1], [2]), tonnes de molybdène dans les concentrés

t	2009	2010	2011	Part dans production 2011	Réserves (kt)	Années de réserves
Source	[1]	[2]	[2]	Calcul	[2]	Calcul
Chine	93 500	93 600	94 000	37,7%	4 300	46
USA	47 800	59 400	64 000	25,7%	2 700	42
Chili	34 900	37 200	38 000	15,3%	1 200	32
Pérou	12 300	17 000	18 000	7,2%	450	25
Mexique	7 800	10 900	12 000	4,8%	130	11
Canada	8 840	8 260	8 300	3,3%	220	27
Arménie	4 150	4 150	4 200	1,7%	200	48
Russie	3 800	3 800	3 800	1,5%	250	66
Iran	3 700	3 700	3 700	1,5%	50	14
Mongolie	3 000	2 500	2 000	0,8%	160	80
Ouzbekistan	550	550	550	0,2%	60	109
Kazakhstan	380	360	360	0,1%	130	361
Kyrgyzstan	250	250	250	0,1%	100	400
Autres pays	ND	ND	ND		ND	
Total	220 970	241 670	249 160	100,0%	9 950	40

2.3 Les trois principaux producteurs

Entreprises minières

1- Freeport McMoRan [8] produit des concentrés de molybdène à partir de mines de cuivre en Amérique du Nord (production 2011 : 35 M lb³⁶) et Amérique du Sud (10 M lb) ainsi que de la mine de molybdène de Henderson (Colorado :

³⁶ 1 lb = 0,453592 kg

38 M lb) ; la production 2011 a été de 83 M lb de molybdène récupérable, soit environ **38 000 t**. La mine de molybdène de Climax (Colorado) a démarré en 2012 ; le coût de la première phase de ce projet est de 700 M\$. Freeport McMoRan est un producteur intégré vers l'aval, jusqu'aux produits pour la métallurgie, aux composés chimiques du molybdène, et la poudre de molybdène ; il peut traiter des concentrés provenant de tierces parties. En 2011, la mine de Henderson avait des coûts cash de 6,34 \$/lb, pour un prix de vente moyen de 16,42 \$/lb.

2- Codelco, compagnie nationale chilienne et n°1 du cuivre, a produit en 2010 **21 677 t** de molybdène [9]. En 2011, il aurait vendu 22 800 t de molybdène, et projette de construire une usine de traitement du concentré pour capter une part de valeur plus importante qu'en vendant simplement le concentré [16]. Il étudie également l'ouverture d'une division souterraine dans sa mine à ciel ouvert de Chuquicamata ; cette nouvelle division pourrait produire 18 000 t de molybdène par an.

3- GrupoMexico a produit en 2011 **18 570 t** de molybdène dans des mines de cuivre au Mexique et au Pérou [10].

On peut également citer : **ThompsonCreek** qui exploite deux mines de molybdène aux USA et au Canada (production 2011 de **12 837 t** [11]) et produit de l'oxyde technique, du ferromolybdène, et de l'oxyde pur dans son usine de Langeloth ; les grands groupes miniers « généralistes » Rio Tinto (Kennecott), BHP Billiton, AngloAmerican, Xstrata ; Teck (non intégré), Molycorp, Montana Resources, Chevron Mining, Kennecott... En Chine : JDC (Jinduicheng Molybdenum Group Mining Corp.) qui est le plus gros opérateur chinois du secteur du molybdène (intégré vers l'ensemble de l'aval) ; Luoyang Molybdenum Group (intégré vers l'aval) ; China Molybdenum (intégré) ; Daheishan (mines seulement) ; etc. En Russie SMR (intégré de la mine au ferromolybdène : production de 6 900 t de FeMo en 2011).

Produits industriels : à côté des sociétés minières intégrées, on trouve des sociétés qui n'ont pas d'exploitation minière mais sont spécialisées dans l'élaboration des produits industriels à base de molybdène ; ces sociétés se fournissent en concentré ou oxyde (technique ou pur) auprès des sociétés minières ou d'autres transformateurs ; on peut citer (liste non exhaustive) :

Molymet (Chili), numéro 1 avec une capacité annoncée de 80 000 t/an (soit 1/3 de la demande mondiale) répartie sur 5 usines : 2 au Chili, 1 au Mexique (Molymex), 1 en Allemagne (Chemimetall, Mo métal), et 1 en Belgique (Sadaci)

Bear Metallurgical (USA) : producteur de ferromolybdène, numéro 1 aux USA

American Flux and Metal (USA) : producteurs de poudre de Mo et de « pellets »

Global Tungsten and Powders Corp (USA) : poudre de Mo

HC Starck (USA) : composés chimiques du molybdène, poudre de Mo, lubrifiants MoS₂

Chem-Met (USA) : composés chimiques du molybdène

Plansee (Autriche) : Mo métal et composés chimiques

Treibacher (Autriche) : producteur d'oxyde technique et de ferromolybdène

Taenaka Kogyo (Japon) : producteur d'oxyde technique et de ferromolybdène
THH Molyprocessing (Thaïlande) : grillage de concentrés miniers en oxyde technique
Woojin Metal Co (Corée) : producteur d'oxyde technique et de ferromolybdène
Il ya aussi des productions de ferromolybdène en Arménie et en Inde [4].

Des statistiques publiques détaillées sur la production de ces produits par pays n'ont pu être trouvées.

2.4 Recyclage

Selon l'IMOA [5], environ 15 % de l'ensemble du molybdène consommé dans le monde provient du recyclage.

Métallurgie : La quantité de molybdène récupéré en recyclant du molybdène métal ou des superalliages est faible. Le molybdène recyclé provient essentiellement du recyclage de l'acier ; le molybdène n'est pas récupéré en tant que tel, mais par incorporation des ferrailles en contenant dans le processus d'élaboration. La proportion est plus élevée que la moyenne dans les aciers inoxydables : 25 à 30 % du molybdène utilisé pour produire ces aciers est issu du recyclage. Selon [2], la proportion de molybdène provenant du recyclage peut atteindre jusqu'à 30 % de la quantité consommée.

Catalyseurs : Les catalyseurs usés donnent lieu à la récupération du molybdène et des autres métaux (tels vanadium, cobalt, nickel,...). Le groupe français Eramet a deux filiales actives dans le recyclage des catalyseurs : Gulf Chemical and Metallurgical Corporation - GCMC (USA), numéro 1 de la récupération des catalyseurs pétroliers, et Valdi (France) ; GCMC produit de l'oxyde de molybdène pur ; sa filiale Bear Metallurgical est le plus gros producteur de ferromolybdène à partir d'oxyde aux USA. Citons aussi la société française Eurecat.

2.5 Substitution

Les superalliages incorporant du molybdène sont indispensables à la filière aéronautique, en particulier dans les parties chaudes des moteurs et, compte tenu des temps de développement et de certification, toute possibilité de substitution notable dans les 10 prochaines années ne semble pas envisageable.

Il y a peu de substitution possible au molybdène dans les applications sidérurgiques, au contraire les industriels ont cherché à développer de nouvelles formulations permettant de tirer profit des propriétés de cet élément d'alliage ; dans une faible mesure, des substitutions partielles par d'autres éléments comme le chrome, le vanadium, le niobium, le bore, le tungstène pourraient être envisagées.

2.6 Évolution des prix

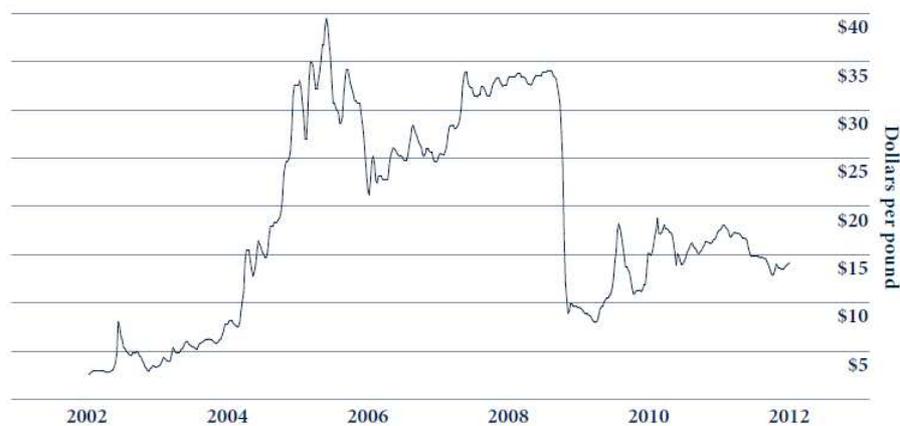
Les concentrés et l'oxyde technique sont vendus dans le cadre de contrats moyen ou long terme, dont les conditions restent généralement confidentielles, ou sur le marché spot, où les prix sont extrêmement réactifs.

Les prix sont exprimés par rapport à l'unité de masse (kg sur le marché européen, lb pour le marché US) de molybdène contenu dans le produit. Par rapport au prix du marché, il peut y avoir des pénalités en fonction des impuretés contenues.

Le prix de l'oxyde de molybdène a fortement monté entre 2002 et 2008, puis s'est effondré au second semestre 2008 suite aux problèmes économiques et financiers globaux, et depuis le point bas, inférieur à 10 \$/lb, est remonté lentement aux alentours de 15 \$/lb [8], soit environ 33 \$/kg.

Figure 7 : Évolution du prix de l'oxyde de molybdène de 2002 à début 2012 [8]

Metals Week Molybdenum Dealer Oxide Prices
Through January 31, 2012



Le molybdène a été introduit dans les cotations du LME en 2010. Depuis cette introduction, le cours s'est situé entre 37,2 \$/kg (en avril 2011) et 27 \$/kg (en octobre 2011). Fin juin 2012, le prix (27,7 \$/kg le 27 juin) est orienté à la baisse.

Figure 8 : Cotation LME du molybdène de février 2010 au 27 juin 2012 (cash Buyer)



2.7 Producteurs de superalliages

Parmi les principaux producteurs de superalliages, ou d'alliages-mères³⁷ comme GfE et Reading Alloys, on peut citer (liste non exhaustive) :

- En France : Aubert et Duval (groupe Eramet), Aperam (groupe ArcelorMittal).
- Au Royaume-Uni : Allvac (groupe ATI) ; Ross et Catherall (groupe Doncasters) ; Howmet (groupe Alcoa) ; Firth Rixson.
- En Allemagne : Thyssenkrup VDM ; Doncasters Bochum (groupe Doncasters) ; GfE (groupe AMG).
- En Autriche : Voestalpine Edelstahl (anciennement Böhler-Uddeholm).
- En Italie : Valbruna.
- Aux USA : PCC Energy (1^{er} producteur d'alliages base nickel) ; Carpenter Technologies ; ATI ; Haynes International ; Certified Alloys (groupe Doncasters) ; Howmet (groupe Alcoa) ; le groupe Cannon-Muskegon (et sa filiale Greenville Metals) ; Reading Alloys (groupe Ametek).
- En Australie : WASA Western Australia Specialty Alloys (groupe PCC).
- En Afrique du Sud : Avalloy.
- Au Japon : Hitachi Metals ; MMC Superalloy Corporation (groupe Mitsubishi Materials Corporation) ; IHI Master Metal (groupe IHI).
- En Russie : VIAM.
- En Inde (Hyderabad) : Mishra Dhatu Nigami Limited (Midhani).
- En Chine : BIAM (Beijing International Aeronautical Materials Corp.), et sa filiale BIAM Alloys spécialisée dans la refusion de scraps.

Nombre de ces producteurs élaborent aussi des alliages de titane.

La transformation ultérieure des superalliages (par exemple forgeage-matriçage) est effectuée soit par ces acteurs eux-mêmes, soit par des métallurgistes spécialisés.

Le nombre d'acteurs est élevé, et beaucoup d'entre eux appartiennent à des pays pour lesquels *a priori* on peut considérer que le risque géopolitique est faible. Le savoir-faire est présent en Europe et en France.

Eramet présente [15] un tableau montrant ses principaux concurrents dans le domaine de l'élaboration et de la transformation de certains alliages, en particulier les superalliages.

³⁷ Un alliage mère (master alloy en anglais) est un alliage comportant deux ou plusieurs composants de l'alliage final, mais qu'on utilise de préférence aux métaux purs parce qu'il est plus facile ou moins coûteux à élaborer, ou plus facile d'emploi.

Figure 9 : Élaborateurs et transformateurs d'alliages spéciaux (source : [15])

Sociétés	Métaux élaborés					Mode d'élaboration			Matriçage de grande puissance				Forge libre
	Aciers rapides	Aciers à outils	Aciers spéciaux de hautes performances	Super-alliages	Titane	Air	Vide	Poudre	Aciers spéciaux de hautes performances	Super-alliages	Aluminium	Titane	
Alcoa (États-Unis & Russie)													
ATI - Ladish (États-Unis)													
Böhler + Buderus (Autriche/Allemagne) voestAlpine													
BGH (Allemagne)													
Carpenter - Latrobe (États-Unis)													
Cogne (Italie)													
Tata Steel (Inde et Royaume-Uni)													
Ellwood (États-Unis)													
ERAMET ALLIAGES													
Firth Rixson (États-Unis et Royaume-Uni)													
Gloria (Taïwan)													
Kalyani (Inde)													
HeYe (Chine)													
Hitachi Metals (Japon)													
Midhani (Inde)													
Nachi Fujikoshi (Japon)													
Otto Fuchs (RFA)/Weber (États-Unis)													
PCC (Wyman Gordon & SMC)													
Shultz (États-Unis)													
Shanghai Baosteel (Chine)													
Schmolz & Bickenbach (Allemagne et États-Unis)													
Snecma (France)													
Thyssen Krupp (Allemagne)													
Tiangong (Chine)													
Valbruna (Italie)													
VSMPO (Russie)													

3- Contraintes sur l'offre et projets de développement

3.1 Réserves et ressources mondiales, répartition

Selon une étude Roskill de 2009 citée par le BRGM ([3], page 38), la capacité de production mondiale de molybdène primaire était de l'ordre de 300 000 t, dont à peu près la moitié de mines de molybdène et la moitié de mines où le molybdène est un sous-produit de l'extraction du cuivre. On voit que la capacité disponible est loin d'être utilisée à pleine capacité, puisque la production de molybdène primaire en 2011 était de 250 kt³⁸.

³⁸ Abréviations : kt = milliers de tonnes ; Mt = millions de tonnes.

L'USGS [2] estime :

- Les réserves (voir détail plus haut) à près de 10 Mt, soit 40 années de la production actuelle, avec la répartition géographique donnée par la figure 6 ;
- Les ressources à 5,4 Mt aux USA et 14 Mt dans le reste du monde.

Le recensement du BRGM [3] ne mentionne pas de ressources dont l'exploitation pourrait être économiquement envisagée en Union européenne. Éventuellement, des résidus d'extraction du cuivre en Allemagne et Pologne pourraient être exploités, mais un procédé de traitement reste à mettre au point.

3.2 Projets miniers

Une moitié de la production de molybdène dépend de la production de cuivre ; l'augmentation de capacité des mines de cuivre entraîne l'augmentation de la capacité de production de molybdène.

Le BRGM [3] a dressé une liste de projets miniers annoncés en 2009. La liste a évolué depuis, certains projets ont pu être suspendus devant la baisse des cours. L'exploitation de Mt. Hope (Nevada) de General Moly devrait démarrer fin 2014 (capacité visée 17 000 t/an). D'autres ont été réalisés : le redémarrage de la mine de Climax par Freeport McMoRan, indiqué comme suspendu, a été effectif début mai 2012 [13], avec comme objectif d'atteindre une production de 9 000 t/an en 2013, et de monter à 13 500 t/an si les conditions du marché sont favorables ; Freeport précise qu'il gèrera la production de ses mines de façon flexible pour suivre les besoins du marché. D'autres enfin sont apparus : Quadra FNX, repris par KGHM, devrait démarrer la mine de cuivre-molybdène-or de Sierra Gorda au Chili (capacité molybdène visée 11 000 t/an).

Figure 10 : Liste de projets miniers molybdène ou cuivre-molybdène 2009 [3]

	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 Alumbra				Minera alumbra	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

Le BRGM prévoyait une augmentation de la production minière de 4 à 6 % par an sur les prochaines années ; à plus long terme la croissance sera soutenue par :

- le développement de gisements dont le molybdène est le produit principal ;
- l'augmentation de la récupération du molybdène des gisements de cuivre ;
- la récupération du molybdène des gisements de sables bitumineux, car les minéraux lourds auxquels le molybdène est associé doivent être récupérés pour des raisons environnementales.

4- Analyse de quelques facteurs de criticité

4.1 Rareté relative des ressources minières

Les réserves et ressources minières actuellement recensées sont relativement abondantes : 40 années de réserves identifiées au rythme de production actuel, 80 années de ressources. Selon [12] le marché a été excédentaire en 2011 pour la quatrième année consécutive, et la capacité de production minière devrait croître rapidement au cours des prochaines années.

4.2 Concentration dans la chaîne de production

La production et les projets miniers sont concentrés sur la Chine et le continent américain. L'Europe et la France dépendent des exportations de ces deux continents pour les produits de base de la filière molybdène.

La capacité de grillage de concentrés pourrait représenter un goulot d'étranglement, mais les investissements d'augmentation de capacité peuvent être réalisés rapidement. Plus en aval, pour l'élaboration des produits industriels, les industriels sont mieux répartis, avec en particulier des usines d'élaboration de molybdène métal pour les superalliages en Europe. Il en est de même pour la production de superalliages, mais il convient de rester vigilant quant au devenir des sociétés possédant le savoir-faire.

4.3 Importance pour la filière aéronautique

Les alliages incorporant du molybdène sont indispensables à la filière, en particulier dans les parties chaudes des moteurs et, compte tenu des temps de développement et de certification, toute possibilité de substitution notable dans les 10 prochaines années ne semble pas envisageable.

5- Scénarios³⁹ prospectifs à 10 ans

5.1 Scénarios d'évolution de la demande

Actuellement, une proportion de près de 80 % de la consommation de molybdène est utilisée dans la sidérurgie. La proportion moyenne de molybdène par tonne d'acier est inférieure en Chine à ce qu'elle est dans les pays comme l'Europe, les USA, le Japon ; il en résulte qu'en 2010 la Chine représentait 45 % de la production d'acier mondiale, mais consommait seulement 32 % du molybdène primaire. On peut donc s'attendre à ce que la Chine, montant en gamme dans la qualité des aciers produits au fur et à mesure de son développement, augmente son intensité d'usage du molybdène. Un calcul grossier montre que si la Chine avait la même intensité d'usage que l'Europe, pour le volume 2010 de sa production d'acier, cela représenterait 100-120 kt de consommation de molybdène primaire supplémentaire, soit la moitié de la consommation mondiale.

La demande de molybdène devrait donc continuer à progresser rapidement, en raison :

- de la croissance de la production d'acier et de la montée en gamme de la consommation d'acier des pays émergents, en particulier la Chine ;
- de la croissance des applications chimiques ;
- du développement de l'aéronautique ;
- de nouvelles applications dans les domaines électronique et photovoltaïque (couches minces).

L'IMOA [5] prévoit une croissance à un rythme moyen de 4,5 % par an, au moins jusqu'en 2020, avec une croissance très forte de la Chine (+5,7 % par an), la demande de l'Europe ne croissant qu'à 2,5 % par an et celle des Amériques à 2,9 %.

RBC Capital Markets [12] prévoit une croissance de 8,4 % en 2012, 8,8 % en 2013 et ensuite (2014-2015) un peu supérieure à 5 % par an.

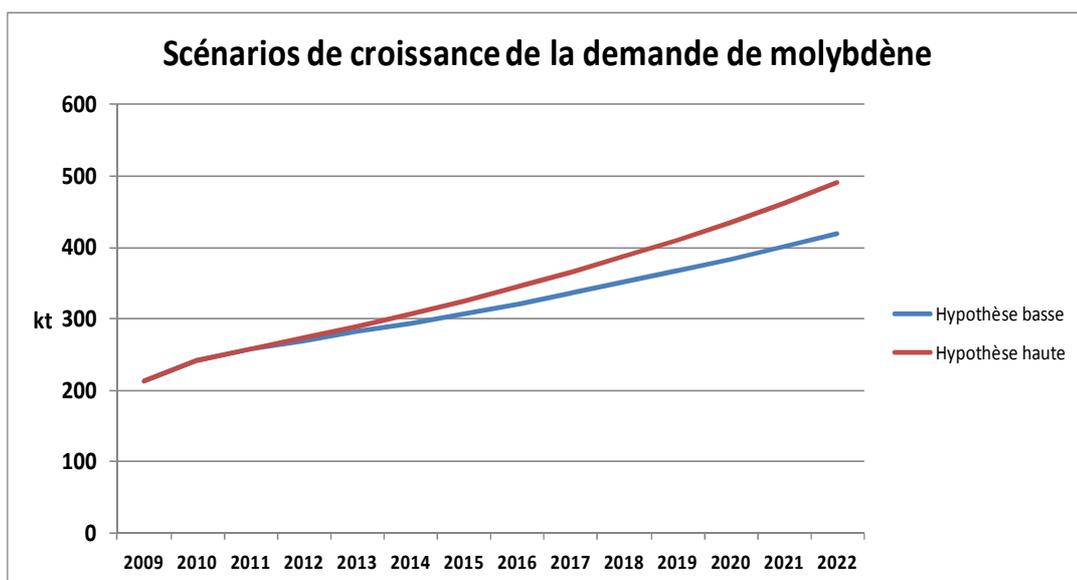
Thompson Creek [14] présente des projections avec des TMCA de 4 % (hypothèse basse) et 6 % (hypothèse haute) jusqu'en 2020.

General Moly [15], qui va ouvrir la mine de molybdène de Mt. Hope (Nevada), fait l'hypothèse d'une croissance au TMCA de 5,5 % jusqu'en 2020.

Nous étudierons les conséquences de deux scénarios : hypothèse basse de croissance de 4,5 % par an, hypothèse haute de 6 % par an. Le volume de la demande de molybdène serait, entre 2009 et 2022, multiplié par un facteur 1,6 (hypothèse basse) à 1,9 (hypothèse haute).

³⁹ Rappelons qu'un scénario n'est pas une prédiction.

Figure 11 : Scénarios d'évolution de la demande mondiale de molybdène



5.2 Scénario d'évolution de l'offre

L'offre de molybdène est composée de l'offre primaire (molybdène neuf, provenant de l'extraction minière) et de l'offre secondaire (recyclage).

Offre primaire : La croissance de l'offre minière repose en grande partie sur le développement de l'extraction du cuivre, le molybdène étant un sous-produit de certaines mines de cuivre pour environ 50 % de sa production. Les sociétés minières travaillent à l'amélioration du taux de récupération du molybdène des gisements de cuivre. Par ailleurs, des projets de mines de molybdène vont être réalisés.

La Chine a classé le molybdène dans les produits soumis à quotas d'exportation ; compte tenu de la production et de la demande chinoises, et de l'offre en provenance des autres pays, l'impact sur le marché devrait être mineur.

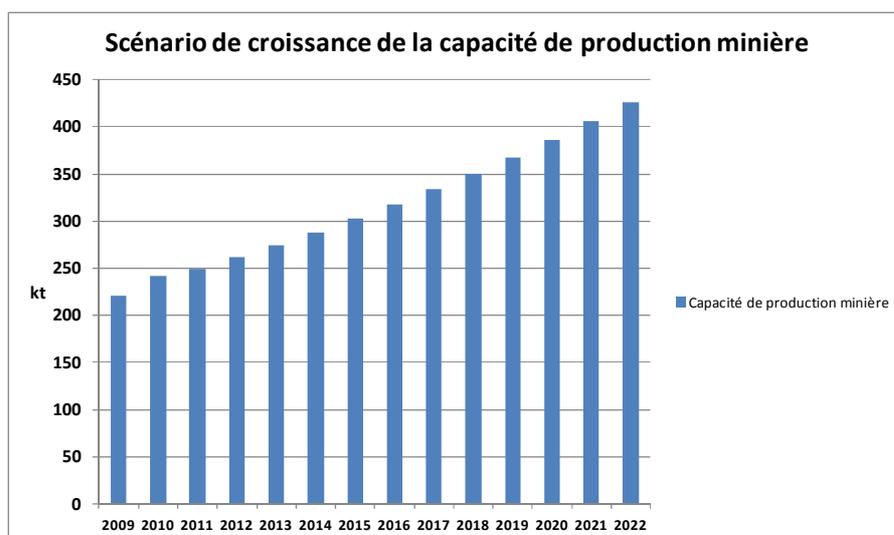
Les prochaines nouvelles mines à entrer en production devraient être Climax (Freeport McMoRan, redémarrée en mai 2012, capacité 9 à 13,5 kt/an) ; Mt. Hope (General Moly, fin 2014, 17 kt/an) ; Sierra Gorda au Chili (Quadra FNX repris par KGHM, début 2015, 11 kt/an).

Le BRGM, déjà cité, prévoit une croissance soutenue de la capacité de production minière de molybdène.

RBC Capital Markets prévoit une augmentation de la capacité de production minière de 5 % en 2012, 3,4 % en 2013, 8,6 % en 2014 et 8,9 % en 2015.

Notre scénario de base repose sur un TMCA de l'offre minière (taux moyen sur les 10 prochaines années) de 5 % :

Figure 12 : Scénario de croissance de la capacité de production minière

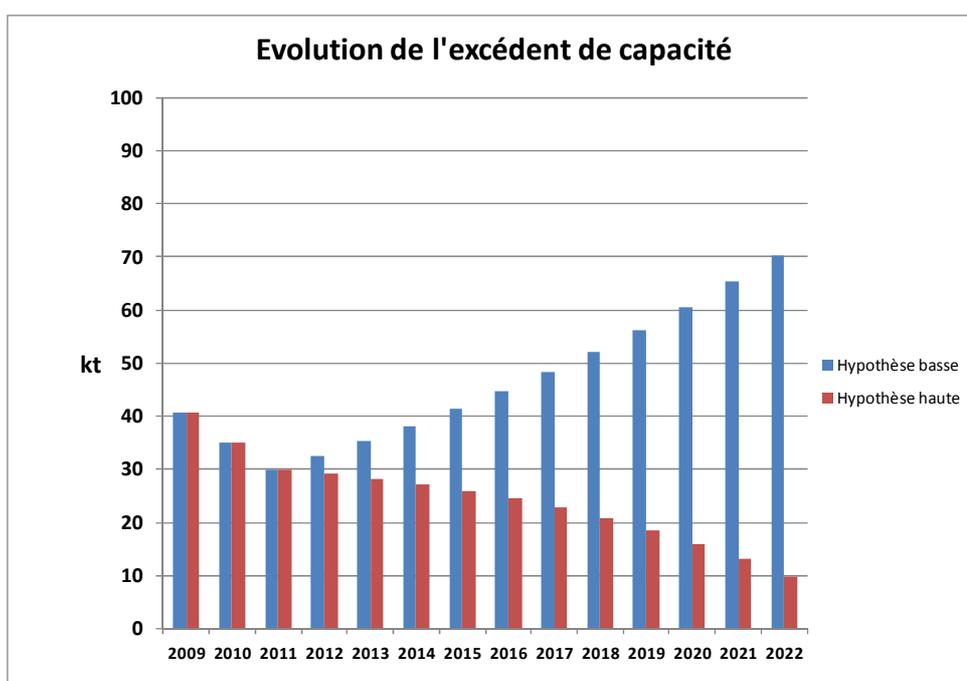


Recyclage : Il faut ajouter à la production primaire la quantité de molybdène provenant du recyclage, actuellement estimée à 15 % de la demande.

5.3 Évolution du bilan offre-demande

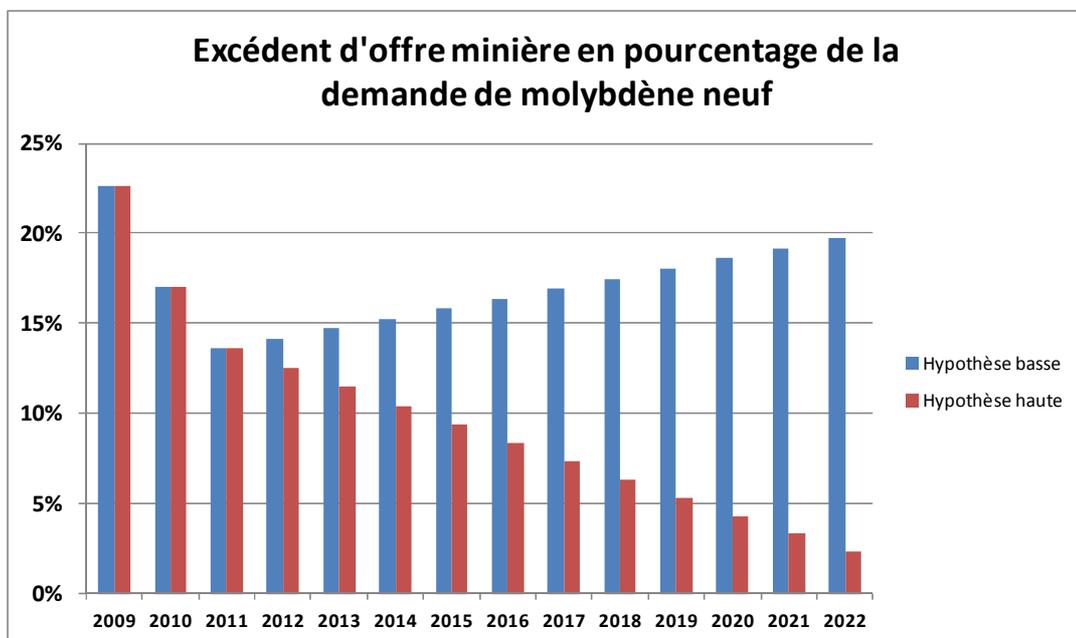
Avec l'hypothèse que le recyclage représente toujours 15 % de la demande, et la croissance de la production minière, le marché global serait en excédent de capacité de production, que ce soit dans l'hypothèse haute ou l'hypothèse basse de croissance de la demande.

Figure 13 : Évolution de l'excédent de l'offre en fonction du scénario de croissance



Dans le cas de l'hypothèse basse de croissance, l'excédent d'offre minière croîtrait de façon continue pour atteindre 17 % de la demande de métal neuf en 2022 ; dans le cas de l'hypothèse haute, il se réduirait progressivement pour ne plus représenter que 2 % de la demande en 2022.

Figure 14 : Excédent de l'offre minière en pourcentage de la demande globale de molybdène neuf



5.4 Analyse du scénario

En fonction de la croissance de la demande, le marché pourrait se trouver dans deux situations opposées :

- Dans le cas d'une demande ne croissant qu'à 4,5 % par an, l'excédent croissant de l'offre pèserait sur les prix, et très vraisemblablement certains projets miniers seraient annulés ou repoussés ; il s'agirait en premier lieu de projets où le molybdène est le produit principal, à moins que la demande en cuivre faiblisse simultanément.
- Dans le cas d'une demande croissant à 6 % par an, l'excédent en fin de période serait insuffisant pour faire face aux aléas de la production ou aux accélérations subites de la demande. Le marché serait en situation de pénurie potentielle dès le milieu de la période considérée. Les prix seraient orientés à la hausse, peut-être dès 2013-2014 : de nouveaux projets d'extension de capacité seraient lancés, et le recyclage encouragé.

Nous avons supposé que le recyclage continuait à représenter 15 % de la demande. Il est clair que si le pourcentage assuré par le recyclage augmentait, cette ressource secondaire supplémentaire aggraverait l'excédent dans le cas de l'hypothèse basse, et soulagerait le déficit dans le cas de l'hypothèse haute.

5.5 Pistes pour anticiper les risques de pénurie / tension sur les prix

Le molybdène est un produit important pour la métallurgie et en particulier les alliages pour l'aéronautique. La croissance de la demande devrait être vigoureuse. La croissance de l'offre minière devrait elle aussi être forte, tirée en proportion notable par celle de la production de cuivre. La situation du marché dépend du différentiel entre ces deux taux de croissance, et de la part du recyclage. L'équilibre est délicat et la situation pourrait facilement basculer, dans un sens ou dans l'autre.

Un risque de déficit à moyen terme, sans être certain, n'est pas à exclure. Les pistes que l'on peut envisager pour anticiper une telle situation seraient les suivantes :

- Prises de participation et/ou conclusion d'accords avec l'amont de la filière pour sécuriser les approvisionnements ; on citera comme exemple :
 - o L'accord entre Aperam et General Moly, sur le projet Mt. Hope, qui prévoit l'enlèvement de 3 000 t par an sur 5 ans (et une option pour 1 400 t/an sur les 10 années suivantes), avec une formule de prix offrant au mineur la garantie d'un prix plancher (le prix plancher moyen est de l'ordre de 14,5-15,0 \$/lb pour les contrats conclus par General Moly) ;
- Accroissement de la proportion globale de molybdène récupéré par recyclage.

Les pistes ci-dessus concernent le marché du molybdène dans son ensemble. Pour la niche des produits destinés aux superalliages, on peut y ajouter :

- la constitution de stocks de précaution si l'évolution vers un déficit se confirme (ceci ne peut être qu'une mesure à portée provisoire) ;
- la prise de participation ou des accords long terme avec des industriels, non nécessairement mineurs, mais élaborant les produits type oxyde et métal ; un exemple est la participation de Plansee dans Molytmet ;
- l'amélioration de la récupération du molybdène métal et des superalliages ;
- la surveillance des acteurs détenant le savoir-faire de la production de molybdène métal et de superalliages pour s'assurer que les compétences et capacités de production sur le sol européen restent suffisantes.

-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-

Bibliographie

Annexe 1 : Chaîne de valeur du molybdène

Annexe 2 : Alliages base molybdène proposés par la société Plansee

Annexe 3 : Superalliages base nickel incorporant du molybdène

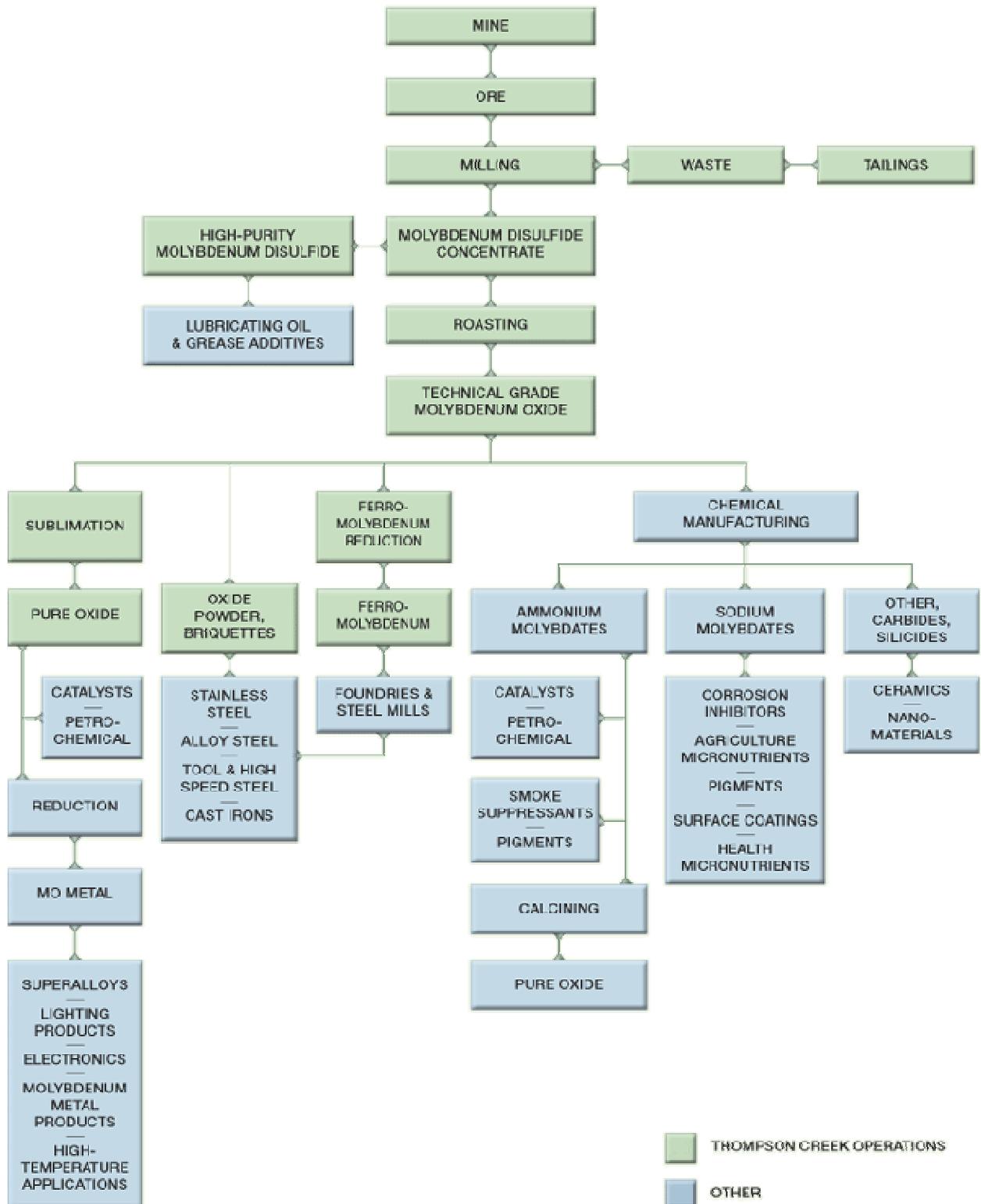
Bibliographie

- [1] « Molybdenum », USGS Mineral Commodities Summary 2011, January 2011. Accessible en ligne : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/molybdenum/mcs-2011-molyb.pdf>
- [2] « Molybdenum », USGS Mineral Commodities Summary 2012, January 2012. Accessible en ligne : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/molybdenum/mcs-2012-molyb.pdf>
- [3] « Panorama 2010 du marché du molybdène », Rapport final BRGM/RP-60204-FR, octobre 2011
- [4] « World Mineral Production 2006-2010 », British Geological Survey, 2012
- [5] « Molybdenum markets - an end-use analysis », Molyreview, International Molybdenum Association, July 2011
- [6] « Materials : Molybdenum », site Internet de la société Plansee
<http://www.plansee.com/en/Materials-Molybdenum-402.htm>
- [7] « Moly takes off on Super Jumbo », Molyreview, IMO, July 2009
- [8] Freeport McMoRan, Annual report 2011
- [9] Codelco, Annual Report 2010
- [10] GrupoMexico, Informe Anual 2011
- [11] ThompsonCreek, Annual report 2011
- [12] « Nickel, copper, molybdenum and zinc demand all trending up », International Mining, 27th January, 2012
- [13] « Climax Restarts : Molybdenum Mine Starts Commercial Production », communiqué de presse Climax Molybdenum, May 10,2012
- [14] ThompsonCreek fact sheet, June 2012
- [15] General Moly, Toronto Marketing Presentation, June 2012
- [16] Jamasmie, C., « Chile's Codelco to invest \$400 million in molybdenum plant », www.mining.com, July 3, 2012

ANNEXE 1

CHAÎNE DE VALEUR DU MOLYBDENE

Source : ThompsonCreek http://www.thompsoncreekmetals.com/s/About_Moly.asp



ANNEXE 2

ALLIAGES BASE MOLYBDÈNE PROPOSÉS PAR LA SOCIÉTÉ PLANSEE

Source : [6]

Molybdène pur	> 99,97 %											
Type d'alliages	Composition de l'alliage (base = molybdène)											
	Titane	Zirconium	Hafnium	Oxyde de lanthane	Oxyde d'yttrium	Oxyde de cérium	Rhénium	Tungstène	Cuivre	Zircone	Tantale	Carbone
TZM	0,50%	0,08%	1,20%	0,03 - 0,7 %	0,47%	0,08%	5 % et 41 %	20, 30, 50 %	15 et 30 %	1,70%	11%	0,01-0,04 %
MHC												0,05-0,12 %
ML												
MY												
MoRe												
MoW												
MoCu												
MoZrO2												
MoTa												

Exemples d'applications des différents types d'alliages :

TZM	Outils de forgeage, électrodes tournantes pour tubes à rayons X
MHC	Outils pour transformation de métaux (extrusion par ex)
ML	Eléments de fours, creusets, éclairage
MY	Creusets de vaporisation pour revêtement ; lampes quartz
MoRe	Thermocouples
MoW	Equipements pour industries du zinc, du verre ; cibles pour revêtement des écrans plats ; transistors couche mince
MoCu	Puits de chaleur de composants électroniques
MoZrO2	Electrodes pour fusion du verre
MoTa	Cibles pour écrans tactiles

ANNEXE 3

SUPERALLIAGES BASE NICKEL INCORPORANT DU MOLYBDÈNE

Source : site Internet IMO A

http://www.imoa.info/moly_uses/molybdenum_grade_superalloys.php

Corrosion-resistant nickel-base alloys									
Alloy	UNS No	EN No	Ni	Cr	Fe	Mo	W	C	Cu
B-3®	N10675	2.4600	65**	1.5	1.5	28.5	3*	0.01*	0.2*
C-276	N10276	2.4819	57	16	5	16.0	4	0.01*	0.5*
C-22®	N06022	2.4602	56	22	3	13.0	3	0.01*	0.5*
C-2000®	N06200	2.4675	59	23	3*	16.0	-	0.01*	1.6
G-30®	N06030	2.4603	43	30	15	5.5	2.5	0.03*	2
G-35®	N06035	2.4643	58	33.2	2*	8.1	0.6*	0.05*	0.3*
* Maximum ** Minimum									

High temperature alloys											
Alloy	UNS No	EN No	Ni	Co	Fe	Cr	Mo	W	Al	Ti	C
Solid-Solution Strengthened											
X	N06002	2.4665	47	1.5	18	22	9	0.6	0.5*	0.15*	0.10
S	N06635	-	67	2*	3*	16	15	1*	0.25	-	0.02*
625	N06625	2.4856	62	1*	5*	21	9	-	0.4*	0.4*	0.10*
617	N06617	2.4663	54	12.5	1	22	9	-	1.2	0.3	0.07
230®	N06230	2.4733	57	5*	3*	22	2	14	0.5*	0.1*	0.10
Age-Hardenable											
718	N07718	2.4668	52	1*	19	18	3	-	0.5	0.9	0.05
263	N07263	2.4650	52	20	0.7*	20	6	-	0.6*	2.4*	0.06
282®	-	-	57	10	1.5*	20	8.5	-	1.5	2.1	0.06
Waspaloy	N07001	2.4654	58	13.5	2*	19	4.3	-	1.5	3	0.08
R-41	N07041	2.4973	52	11	5*	19	10	-	1.5	3.1	0.09
242®™	N10242	-	65	1*	2*	8	25	-	0.5*	-	0.03*
* Maximum											

NIObIUM (Nb) et ferroniobium

24 juin 2012

Avertissement : la présente note est rédigée dans le cadre d'une étude précise, elle ne prétend donc en aucun cas à l'exhaustivité.

Résumé :

La consommation mondiale de niobium est estimée à environ 60 000 t par an. Les deux principales utilisations d'intérêt dans le cadre de la présente étude sont :

- Environ 52 000 t sous forme de ferroniobium « standard », comme élément d'addition dans les aciers : aciers faiblement alliés à haute limite d'élasticité et aciers inoxydables, la filière automobile représentant un peu moins d'un quart des applications de ce type ;
- Environ 3 000 t comme composant de superalliages, les moteurs aéronautiques représentant environ 60 % des applications de ce type.

À l'amont de la chaîne de valeur, la production est très concentrée, trois producteurs (2 au Brésil, 1 au Canada) en assurant 99 % ; le Brésilien CBMM détient une part de marché de plus de 85 %, et est en position de quasi-monopole sur les matières premières à plus haute valeur ajoutée utilisées pour les superalliages.

En cas de pénurie ou de tension extrême sur les prix, le niobium pourrait dans une certaine mesure être remplacé par le vanadium dans certaines des applications automobiles (sous réserve que le vanadium ne soit pas simultanément soumis au même phénomène), mais dans les superalliages pour moteurs aéronautiques il n'y a pas de substitution possible.

L'utilisation de niobium est appelée à croître fortement dans les années à venir :

- que ce soit sous la forme de ferroniobium, en raison de l'augmentation de la qualité des aciers qui vont être utilisés par la Chine et les pays émergents, liée entre autres à l'augmentation de leur parc automobile,
- ou sous la forme de superalliages, une des raisons étant la croissance de l'industrie aéronautique et l'utilisation de moteurs fonctionnant à plus haute température ;

des risques d'insuffisance de l'offre à moyen terme existent.

L'Europe est totalement dépendante d'autres continents pour la fourniture des matières premières incorporant du niobium et nécessaires à l'élaboration d'aciers ou de superalliages. Plusieurs pistes pourraient être envisagées pour réduire cette dépendance :

- Prises de participation par des acteurs européens chez les producteurs existants, à l'occasion du financement des extensions de capacité à venir ;
- Développement de nouveaux gisements (exemple du projet Eramet sur le gisement de Mabounié au Gabon) ; ce type d'action ne porte ses fruits qu'à long terme ;
- Étude de la faisabilité d'une filière de recyclage permettant de traiter à part les aciers et alliages incorporant du niobium.

1- Demande : produits et utilisations

1.1 Produits intermédiaires

Procédé de production simplifié :

À partir du minerai extrait du gisement, le procédé de production comporte une première étape de concentration (par flottation) puis une étape de purification (par voie hydrométallurgique ou pyrométallurgique), fournissant des concentrés d'oxyde de niobium (contenant 55-60 % de pentoxyde de niobium Nb_2O_5).

Pour certaines applications à haute valeur ajoutée, le concentré subit encore d'autres étapes de purification pour aboutir à un pentoxyde de niobium d'une pureté de l'ordre de 99 %.

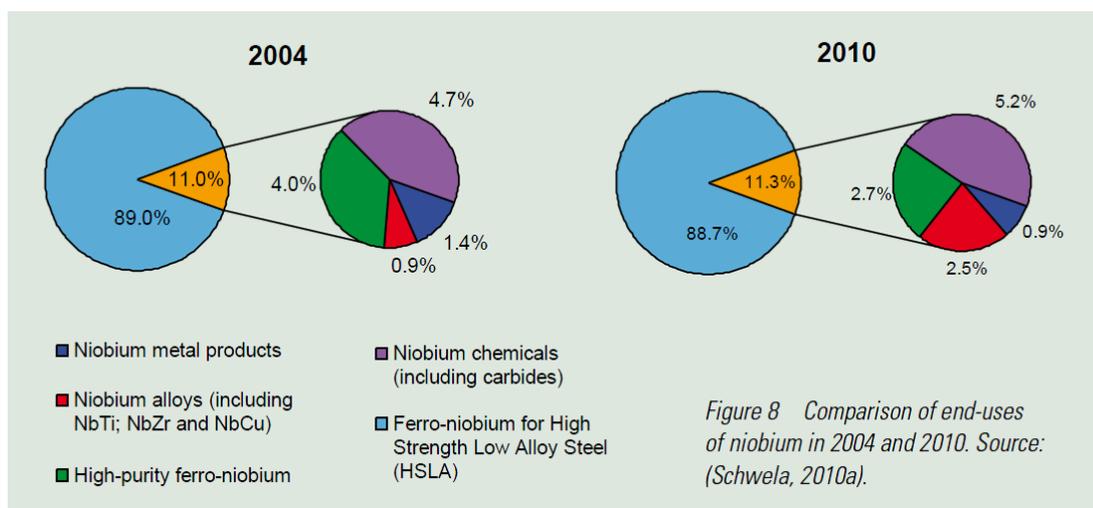
Dans le cas des concentrés mixtes niobium-tantale un procédé d'extraction liquide-liquide permet de séparer le tantale du niobium et d'obtenir du pentoxyde de niobium et du pentoxyde de tantale.

Une réaction aluminothermique (réduction par l'aluminium à haute température) de l'oxyde de niobium ou du concentré, mélangé à de l'oxyde de fer (ou à du fer, dans le procédé à l'arc électrique), permet alors d'obtenir du ferroniobium à 60-70 % de Nb. L'alliage Niobium-Nickel à environ 66 % de Nb est obtenu en remplaçant le fer par le nickel dans le procédé.

Produits : Le niobium est commercialisé sous différentes formes :

- Le Ferroniobium standard contenant entre 60 et 70 % de Nb. Une purification plus poussée peut être obtenue par fusion sous vide dans un four à arc ou sous faisceau d'électrons.
- Le Ferroniobium de haute pureté (dit VG : Vacuum Grade).
- Le pentoxyde de niobium à plus de 99 %, servant comme précurseur pour le métal, le ferroniobium de haute pureté, l'alliage Nickel-Niobium, et pour d'autres composés comme le chlorure, le carbure, le niobate de lithium, ...
- Le niobium métal (obtenu par réduction aluminothermique de Nb_2O_5 purifié, et purification sous faisceau d'électrons).
- Des alliages à base de Nb, comme Niobium-Nickel,...
- La poudre de niobium.
- Le carbure de niobium, céramique réfractaire très dure.
- Le niobate de lithium.

Figure 1 : Formes d'utilisation du niobium, évolution 2004-2010 (source : [2])



Les principaux producteurs miniers transforment eux-mêmes les concentrés en ferroniobium standard. Le brésilien CBMM est le seul à couvrir l'ensemble de la gamme : ferroniobium (standard et haute pureté), niobium métal et alliage nickel niobium, Nb₂O₅ et dérivés chimiques du niobium.

Les clients sont les aciéristes (ferroniobium), les métallurgistes spécialisés dans l'élaboration d'alliages spéciaux, les producteurs d'autres composés chimiques.

1.2 Utilisations finales

- Métallurgie :

- environ 89 % du niobium produit (chiffre 2010) est employé sous la forme de ferroniobium standard (à 60-70 % de Nb), pour produire des **aciers micro-alliés à haute limite d'élasticité HLE**⁴⁰ (entre 0,025 et 0,050 % de Nb), utilisés pour fabriquer des tôles pour l'automobile, des coques de navires, des rails, des pipelines, des éléments pour la construction (ponts⁴¹), etc., ainsi que dans des **aciers inoxydables** (0,4 à 0,7 % de Nb). Environ 10 % de la production d'acier utilise le niobium.
- le ferroniobium de haute pureté dit Vacuum Grade (2,7 % de la production de Nb) et le nickel-niobium entrent dans la composition de **superalliages** pour les applications à haute température et contrainte élevée (par exemple les aubes de turbines pour moteurs aéronautiques et turbines à gaz). Le Nb est alors associé à d'autres éléments comme Ni, Co, Ni-Fe, ainsi qu'à Cr, Al, Mo, Ti, Ru, ...
Deux exemples :

⁴⁰ En anglais High Strength Low Alloy (HSLA) steel.

⁴¹ Par exemple tablier du viaduc de Millau.

- Inconel® 718⁴², alliage à base nickel et à ≈ 5 % de Nb ; c'est le plus utilisé des superalliages et il est actuellement présent dans la plupart des moteurs de jets, aussi bien civils que militaires ;
 - C103, alliage à base niobium pour les tuyères de fusée et du moteur Pratt et Whitney F100 équipant les chasseurs F15 et F16, à 89 % de Nb⁴³.
 - d'autres métaux sont utilisés en alliage avec le Nb (2,5 % de la production de Nb) : Zirconium, Titane, Etain, Hafnium ; extrêmement résistants aux attaques chimiques ces alliages servent dans la fabrication **d'équipements chimiques** ; les alliages Niobium-Etain et Niobium-Titane permettent d'obtenir des **aimants supraconducteurs** pour l'imagerie médicale.
 - la poudre de Nb est un précurseur pour des alliages, des revêtements, des céramiques.
- Céramiques - carbures : le **carbure de niobium**, comme le carbure de tantale, est une céramique extrêmement dure et réfractaire, utilisée dans les applications à haute température et sous contraintes élevées. Le carbure de niobium et de tantale TaNbC, éventuellement associé au carbure de tungstène sous forme de WTiTaNbC, est utilisé dans les **outils industriels** d'usinage et de perçage à haute vitesse, les dents de bennes d'excavateurs, les têtes de forage pour l'industrie minière. On produit aussi des revêtements de carbure dans l'industrie nucléaire, ou pour les outils de coupe, par CVD ou PVD.
- Autres composés chimiques : **L'oxyde de Nb** est utilisé dans la production de **verres de spécialité** (lentilles par ex.) et de **céramiques** (paliers, condensateurs). Le niobate de lithium a des propriétés optiques, piézoélectriques, pyroélectriques⁴⁴ exceptionnelles et est utilisé dans des **composants électroniques** pour téléphones mobiles, détecteurs de mouvement, écrans sensibles, etc. Le nitrure de niobium est un élément important des **supraconducteurs** pour imagerie médicale.

⁴² Inconel® 718 : 50 à 55 % de Ni ; 17-21 % de Cr ; 4,75 à 5,50 % de Nb ; 2,8 à 3,30 % de Mo ; Fe, etc.

⁴³ C103 : 89 % de Nb ; 10 % de Hf ; 1% de Ti.

⁴⁴ Pyroélectricité : capacité d'un matériau de produire une différence de potentiel électrique temporaire lorsqu'il est chauffé ou refroidi.

Figure 2 : Grands domaines d'utilisation finale du Niobium (source : [2])⁴⁵

Industry	Usage	Niobium product
Automotive	Vehicle bodies	HSLA ferro-niobium (60% Nb)
Ceramics and surface coatings	Ceramic capacitors, glass coatings and camera lenses	Niobium oxide
Chemicals	Chemical processing equipment and oil and gas pipelines	HSLA ferro-niobium (60% Nb), niobium metal and niobium-1% zirconium alloy
Construction	Architectural steels and cathode protection systems for large steel structures	HSLA ferro-niobium (60% Nb), niobium metal
Engineering	Cutting tools, railway tracks and ship hulls	Niobium carbide
Electronics	Capacitors, street lighting systems and surface acoustic wave filters for sensor and touchscreen technologies	Niobium powder, niobium oxide and lithium niobate
Medicine	Superconducting magnetic coils in MRI scanners and magnetoencephalography (brain activity mapping)	Niobium-titanium alloy, niobium-tin alloy and niobium nitride
Metallurgical	Superalloys for jet engines and turbine blades	Vacuum-grade ferro-niobium and vacuum-grade nickel-niobium
Physics	Particle physics research	Niobium-titanium alloy and niobium-tin alloy

Figure 3 : Formes et usages du Niobium (source : [3])

Type of Niobium Products

Product	Key Producers	% of Nb Market	Applications	Principal Markets
Standard-Grade Ferroniobium (HSLA FeNb) ~60% Nb content	<ul style="list-style-type: none"> ■ CBMM ■ Anglo American ■ IAMGOLD / Niobec 	90.2%	<ul style="list-style-type: none"> ■ High strength low alloy steel (HSLA) ■ Stainless steel ■ Heat-resistant steels 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Automotive industry ■ Heavy engineering and infrastructure ■ Petrochemical sector ■ Power plants ■ Oil and gas linepipe
Vacuum Grade Ferroniobium (VG FeNb) 99% Nb content	<ul style="list-style-type: none"> ■ CBMM 	3.0%	<ul style="list-style-type: none"> ■ Superalloys 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Aircraft engines ■ Power generation ■ Petrochemical sector
Niobium Metals and Alloys ~50-65% Nb content	<ul style="list-style-type: none"> ■ CBMM 	3.4%	<ul style="list-style-type: none"> ■ Superconductors 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Particle accelerators ■ Magnetic resonance imaging ■ Various small-tonnage uses
Niobium Chemicals >99% Nb content	<ul style="list-style-type: none"> ■ CBMM 	3.4%	<ul style="list-style-type: none"> ■ Functional ceramics ■ Catalysts 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Optical ■ Electronics

Utilisations du ferroniobium :

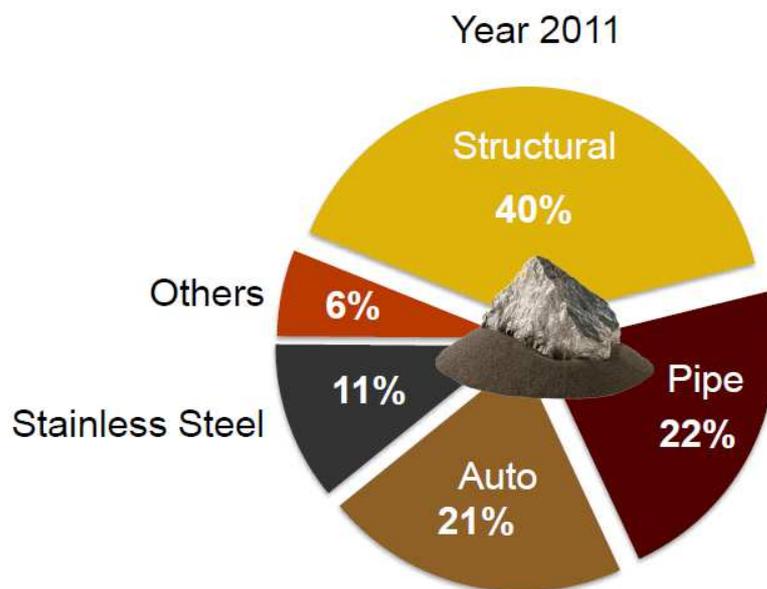
En 2010, la production mondiale d'acier est estimée à 1 414 Mt ; la consommation de ferroniobium a été de 78 kt⁴⁶. Cela représente en moyenne 55 g/t de ferroniobium par

⁴⁵ HSLA = High Strength Low Alloy.

tonne d'acier produite (légère baisse par rapport au niveau 2007-2008, voisin de 63 g/t), ou environ 35 g de niobium par tonne d'acier.

Il existe une forte disparité entre la consommation moyenne de ferroniobium entre les pays développés (autour de 105 g/t en Amérique, 80 g/t en Europe et au Japon) et la Chine (30 g/t) [13], ce qui permet de penser que l'intensité mondiale moyenne va encore croître. La Chine ayant produit environ 680 Mt d'acier en 2011, la seule augmentation d'intensité d'usage du ferroniobium de 50 g/t, amenant la Chine au niveau européen ou japonais, représenterait un accroissement de consommation du niobium de 21 400 t, soit un tiers de la consommation actuelle ; il faudrait bien entendu y rajouter l'impact de la croissance de la production chinoise d'acier.

Figure 4 : Utilisations du ferroniobium par secteur industriel (source : [13])



En résumé, on peut donc distinguer deux grandes filières d'utilisation du niobium :

- Les aciéristes (acier au carbone, acier inoxydable), qui utilisent le ferroniobium standard ;
- La fabrication de produits plus spécifiques : superalliages, niobium métal, verres spéciaux, etc., nécessitant des ressources plus élaborées en niobium : ferroniobium Vacuum Grade, alliages complexes, niobium métal, composés chimiques purs, ...

Pour les deux filières automobile et aéronautique, la chaîne de valeur est composée de trois grandes étapes :

- À l'amont, les producteurs miniers intégrés vers l'aval, produisant le ferroniobium standard et (pour CBMM) les produits de plus grande pureté et les alliages mères (nickel-niobium) destinés, entre autres, à la production de superalliages ;

⁴⁶ Abréviations : kt = 1000 t ; Mt = 1 000 000 t.

- Puis les aciéristes d'un côté, les producteurs de superalliages (cf. § 2.7) de l'autre, fournissant les produits semi-finis ;
- Enfin les constructeurs automobiles et leurs équipementiers, ou les motoristes et leurs sous-traitants.

1.3 Données sur l'utilisation dans les filières automobile et aéronautique

Le niobium est particulièrement important pour les industries automobile et aéronautique : son addition en faible proportion à l'acier permet d'en augmenter la résistance, donc de réduire la masse d'acier utilisée pour remplir la même fonction ; il permet également d'élaborer des aciers inoxydables résistant à la corrosion à haute température, et des superalliages pour les zones chaudes des moteurs aéronautiques.

Automobile : Ce secteur représente un peu moins du quart des utilisations du ferroniobium. Selon [9], l'utilisation de 9 \$ de niobium par automobile permet de réduire sa masse de 100 kg, et d'augmenter de 5 % la distance parcourue par litre de carburant. Les aciers micro-alliés HLE sont utilisés en produits plats (carrosseries) mais aussi pour les roues et pare-chocs.

Les alliages inoxydables ferritiques incorporant du niobium sont utilisés dans les systèmes d'échappement automobile, améliorant leur durée de vie grâce à une meilleure résistance à la corrosion à haute température.

Globalement, la masse de niobium par véhicule est faible ; à titre de calcul d'ordre de grandeur très grossier, si on estime la masse de tôles plates d'aciers alliés au niobium à 300-400 kg, pour une teneur maximale de 0,05 %, le contenu en niobium est de l'ordre de 200 g, et même si on rajoute le niobium contenu dans diverses pièces et les aciers inoxydables du système d'échappement, on voit qu'il y a moins d'1 kg de niobium par véhicule.

Aéronautique : Les moteurs d'avion fonctionnent à des températures de plus en plus élevées pour améliorer le rendement et réduire la consommation de carburant. Les superalliages permettent aux turbines (situées en aval de la chambre de combustion) de supporter ces températures.

Le plus courant de ces superalliages est l'Inconel 718 (voir 1.2 supra : alliage base nickel, environ 5 % de niobium). L'élaboration de ces alliages utilise surtout l'alliage mère nickel-niobium de haute pureté ; le ferroniobium haute pureté VG est de moins en moins utilisé.

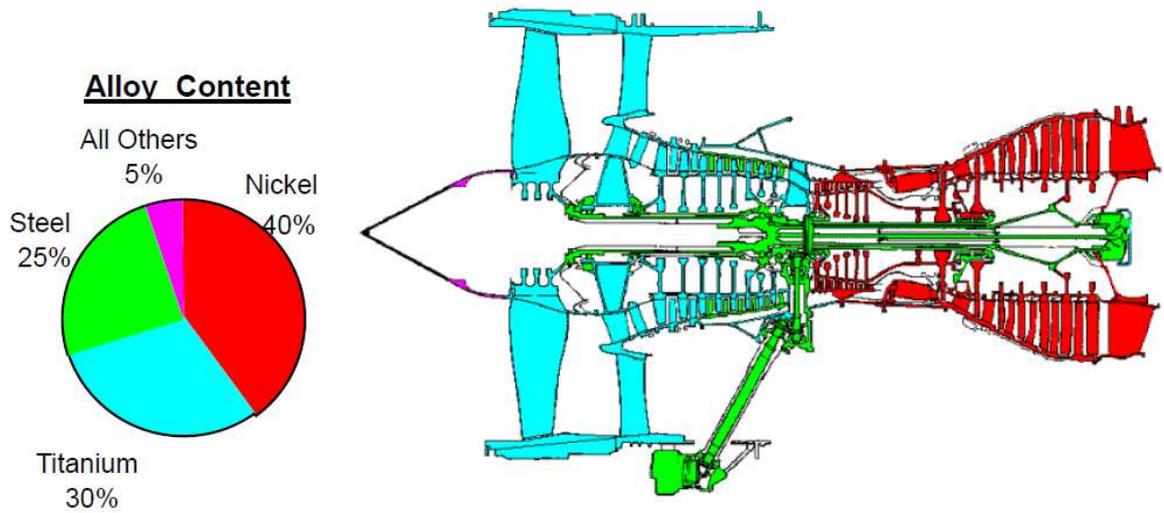
L'aéronautique représente environ 60 % du marché des superalliages incorporant du niobium, dont le volume total est estimé [10] à environ 3 000 t de Nb contenu.

Selon CBMM⁴⁷, le moteur CFM 56, produit par la JV GE/SNECMA, utilise environ 300 kg de niobium.

⁴⁷ Site CBMM, Uses and End Users of Niobium

<http://www.cbmm.com.br/english/capitulos/uses/use&user.htm#Bride>

Figure 5 : Utilisation de différents alliages dans un moteur civil (document Rolls-Royce [14])



2- Offre mondiale

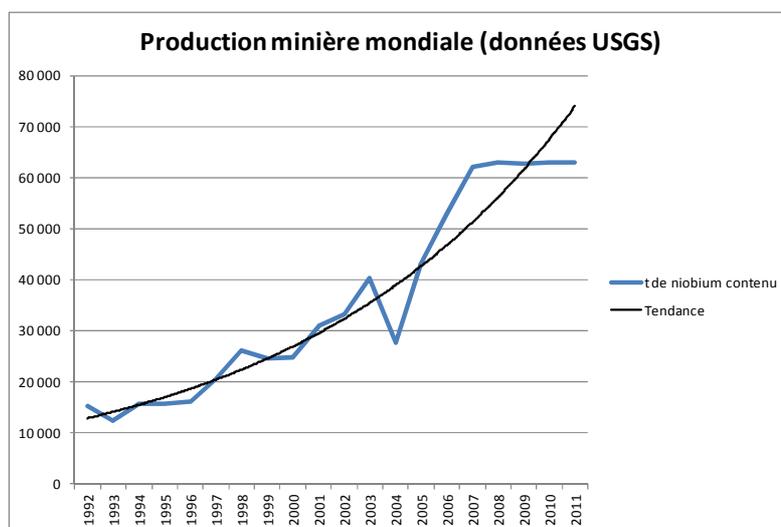
2.1 Volume de production primaire

La source principale est le Pyrochlore $(Ca,Na)_2Nb_2O_6(OH,F)$: environ 98 % [2] du total de la production primaire.

Le niobium est lié au tantale dans les colombo-tantalites et les scories d'étain, une petite partie du niobium est donc obtenue comme sous-produit du tantale et de l'étain.

La production mondiale de niobium dans les concentrés a connu sur les 20 dernières années une forte augmentation, interrompue par les crises survenues depuis 2008.

Figure 6 : Évolution de la production primaire de Niobium (Nb contenu dans les concentrés) sur les 20 dernières années (1992-2011) - données USGS



On note une disparité des données statistiques entre l'USGS et le BGS à partir de 2004.

Figure 7 : Statistiques de production primaire du niobium (Nb contenu dans les concentrés) selon BGS et UGS

Tonnes métriques	2004		2009		2010	
Données BGS [4], [12]						
Concentrés Nb-Ta		% total		% total		% total
Brésil	85 500	87,2%	251 390	95,2%	250 400	97,4%
Canada	8 409	8,6%	9 866	3,7%	4 669	1,8%
Autres	4 091	4,2%	2 744	1,0%	1 931	0,8%
Total mondial concentrés	98 000	100,0%	264 000	100,0%	257 000	100,0%
Nb dans les concentrés	27 400		110 000		107 500	
Ta dans les concentrés	1 500		900		700	
Données USGS [7], [11]						
Nb dans les concentrés	27 600		62 900		62 940	
Ta dans les concentrés	1 430		764		682	
Répartition du Nb contenu par pays producteur						
Brésil					58 000	92,2%
Canada					4420	7,0%
Autres					520	0,8%

Selon le British Geological Survey ([4], [5]), le contenu en niobium des concentrés de Nb et Nb-Ta était de 27 400 t en 2004 t et de 107 500 t en 2010⁴⁸.

⁴⁸ On note une forte réévaluation du contenu en Niobium des concentrés entre les éditions BGS 2011 et 2012 : le chiffre pour 2009 passe de 82 400 t à 110 000 t.

L'US Geological Survey ([11], [7]) indique 27 600 t en 2004⁴⁹ mais donne des chiffres très inférieurs à ceux du BGS pour les années récentes : stabilité à 63 000 t en 2008, 2009, 2010 et 2011.

Les chiffres présentés par les industriels sont plutôt cohérents avec ceux de l'USGS.

Compte tenu d'un taux de récupération du niobium contenu dans les minerais qui est de l'ordre de 95 %, 63 kt de niobium contenu dans les minerais correspondent à **environ 60 kt de niobium dans les produits intermédiaires.**

2.2 Répartition géographique de la production de niobium dans les concentrés

Le **Brésil représente 92 % de la production 2010**, le Canada 7 %. Les autres pays ont produit autour de 5-600 t de Nb contenu dans les concentrés (évaluation USGS [11]).

La Chine exploite des gisements de niobium (à Yichun et Nanping), mais sa production est faible et elle est importatrice.

Autres pays producteurs (entre parenthèses, contenu en niobium de la production 2009 selon [6]) : Burundi (16 t), RD Congo (165 t), Éthiopie (8 t), Mozambique (29 t), Nigeria (180 t), Rwanda (130 t). S'y ajoutent la Russie, l'Afrique du Sud, la Namibie.

2.3 Les trois principaux producteurs

Les trois principaux producteurs produisent à partir de gisements de pyrochlore, et sont intégrés jusqu'à la production de ferroniobium standard. Le marché est dominé par le Brésilien CBMM.

2.3.1 Brésil : CBMM Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração⁵⁰

Mine d'Araxá dans le Minas Gerais

Capacités de production :

Ferroniobium standard (Nb \approx 66,5 %, Fe \approx 30 %) : 90 000 t/an (production 2010 nettement inférieure : 64 500 t soit environ 42 900 t de Nb contenu)

Ferroniobium de haute pureté et alliage Nickel-Niobium : 3 000 t/an

Oxyde de Nb : 5 000 t/an

Niobium métal : 210 t/an

Réserves : plus de 500 Mt à 2,5 % de Nb₂O₅, soit 12,5 Mt de Nb₂O₅ contenu (8,75 Mt de Nb).

CBMM vend en Europe à travers sa filiale CBMM Europe BV, implantée aux Pays-Bas ; en Amérique du Nord à travers sa filiale Reference Metals Company Inc.

⁴⁹ Année faible par rapport aux années 2003 et 2005, toutes deux supérieures à 40 000 t.

⁵⁰ www.cbmm.com.br

(Bridgeville, Pennsylvanie) ; en Asie à travers CBMM Asia Pte Ltd (Singapour). Distributeur exclusif en Chine : Citic Metal ; en Inde : Ferro Tech India Pvt. Ltd.

Il est intéressant de noter que la famille Moreira Salles, qui détenait 55 % de la société aux côtés d'Unocal, a vendu en 2011, en deux fois, 30 % qui ont été rachetés par des industriels japonais, coréens et chinois. On remarque qu'aucun acteur européen n'a profité de cette opportunité.

2.3.2 Canada : IAMGOLD Corporation⁵¹

Mine de Niobec, au Québec.

Production de ferroniobium standard : 6 500 t en 2010 (soit environ 4 400 t de Nb contenu), 6 900 t en 2011 ; capacité annoncée : 7 500 t de ferroniobium (environ 4 700 t de Nb contenu) [13].

Le ferroniobium (minimum 63 % Nb) est commercialisé en Europe auprès des aciéristes par la société Camet Metallurgie GmbH⁵², soit tel quel soit sous forme de fils fourrés.

Réserves au 31/12/2010 (prouvées + probables) : 45,7 Mt à 0,53 % de Nb₂O₅, soit 243,8 kt de Nb₂O₅ contenu (170 kt de Nb). En 2011, les réserves ont fortement augmenté, passant à 1 746 kt de Nb₂O₅ contenu (1 222 kt de Nb), soit plus de 240 années à la capacité de production actuelle.

2.3.3 Brésil : Mineração Catalão de Goiás (groupe Anglo American⁵³)

Mine de Catalão, Goiás.

Production 2010 de ferroniobium standard : 6 160 t (≈ 4 000 t de Nb contenu).

Réserves : 16 Mt à 1,2 % de Nb₂O₅, soit 192 kt de Nb₂O₅ contenu (134 kt de Nb).

Les trois principaux producteurs représentent actuellement environ 99 % de la production mondiale ; l'industrie de la production primaire est donc fortement concentrée. Pour les produits destinés aux superalliages, CBMM est en position de monopole.

Une société russe, OAO Stalmag, possède une mine et une usine de production de niobium et ferroniobium. En 2009, alors filiale de l'aciériste Severstal, elle a produit 296 t de ferroniobium. Le gisement de phosphate-niobium est situé dans la région de Krasnoyarsk.

⁵¹ www.iamgold.com

⁵² www.camet.de/fr/

⁵³ www.angloamerican.com

2.4 Recyclage

Lors du recyclage des aciers, le niobium, trop dilué, n'est pas séparé pour être récupéré en tant que tel ; on estime que la sidérurgie américaine recyclerait environ 20 % du niobium utilisé. Environ 12 % du Nb utilisé dans les superalliages serait récupéré⁵⁴.

Au total, le recyclage représenterait à peu près 20 % de la production primaire [8], [1]. Toutefois, on peut se demander si l'extrapolation des données US est valable pour les autres pays.

2.5 Substitution

Dans les applications sidérurgiques, le niobium peut être remplacé par d'autres matériaux, au prix d'un surcoût et/ou d'une perte de performance :

- Molybdène et Vanadium, pour les aciers micro-alliés à haute résistance ; pour les utilisateurs le ferrovandium a un cours trop fluctuant, qui le pénalise par rapport au ferroniobium ; dans certaines applications, un arbitrage peut toutefois être réalisé lorsque le prix du ferrovandium baisse ;
- Tantale et Titane, dans les aciers inoxydables et à haute résistance ;
- Céramiques, Molybdène, Tantale, Tungstène dans les applications à haute température.

Dans les moteurs d'avion, le niobium n'est pas substituable à court et moyen terme, compte tenu de sa présence dans les superalliages à la base des moteurs actuels ; dans le futur la recherche permanente de températures plus élevées pourrait conduire au remplacement partiel de l'alliage 718, à base nickel, par des aluminures de titane incorporant du niobium, d'autres alliages de titane sans niobium, des alliages base cobalt, des alliages base niobium ...

2.6 Évolution des prix

Il n'y a pas de marché transparent pour le prix du niobium.

Jusqu'en 2006, les prix du niobium sont restés inférieurs à 14,5 US\$/kg⁵⁵.

Puis, en raison de la croissance de la demande (croissance des BRIC et augmentation de l'intensité moyenne du Nb dans les aciers, de 40 g/t en 2000 à 63 g/t en 2008), les prix sont montés à 32,6 \$/kg en moyenne 2007, 36,7 \$/kg en moyenne 2008 et sont restés supérieurs à 31 \$/kg en 2009 et 2010 (informations IAMGOLD).

En 2011 ils ont encore fortement augmenté : les prix du FeNb à 65 % importé en UE sont montés à plus de 46 \$/kg de Nb contenu à l'été pour redescendre autour de 43 \$/kg en octobre-novembre. Actuellement (mai 2012), le prix est de 43 \$/kg de Nb contenu.

⁵⁴ Les Techniques de l'ingénieur, juin 2009.

⁵⁵ Prix au kg de Niobium contenu dans le ferroniobium.

2.7 Producteurs d'alliages mères

À côté de CBMM, des producteurs d'alliages mères⁵⁶ proposent aussi du nickel-niobium et/ou du ferroniobium pour élaboration d'alliages :

- KBM Affilips (Pays-Bas),
- LSM (groupe AMG ; produit du ferroniobium au Royaume-Uni par aluminothermie d'oxyde V₂O₅)
- GfE (Allemagne ; groupe AMG)
- H.C. Starck (Allemagne)
- Reading Alloys (USA ; groupe Ametek)
- Kluchevsky Ferroalloys Plant (Russie)
- Nippon Denko (Japon ; ferroniobium)
- IHI Master Metal (Japon ; groupe IHI, constructeur de moteurs aérospatiaux et turbines à gaz)
- Konik Industries (Chine)

2.8 Producteurs de superalliages

Parmi les principaux producteurs de superalliages, on peut citer (liste non exhaustive) :

- En France : Aubert et Duval (groupe Eramet), Aperam (groupe ArcelorMittal).
- Au Royaume-Uni : Allvac (groupe ATI) ; Ross et Catherall (groupe Doncasters) ; Howmet (groupe Alcoa) ; Firth Rixson.
- En Allemagne : Thyssenkrup VDM ; Doncasters Bochum (groupe Doncasters).
- En Autriche : Voestalpine Edelstahl (anciennement Böhler-Uddeholm).
- En Italie : Valbruna.
- Aux USA : PCC Energy (1^{er} producteur d'alliages base nickel) ; Carpenter Technologies ; ATI ; Haynes International ; Certified Alloys (groupe Doncasters) ; Howmet (groupe Alcoa) ; le groupe Cannon-Muskegon (et sa filiale Greenville Metals).
- En Australie : WASA Western Australia Specialty Alloys (groupe PCC).
- En Afrique du Sud : Avalloy.
- Au Japon : Hitachi Metals ; MMC Superalloy Corporation (groupe Mitsubishi Materials Corporation).
- En Russie : VIAM.
- En Inde (Hyderabad) : Mishra Dhatu Nigami Limited (Midhani).
- En Chine : BIAM (Beijing International Aeronautical Materials Corp.), et sa filiale BIAM Alloys spécialisée dans la refusion de scrap.

Nombre de ces producteurs élaborent aussi des alliages de titane.

⁵⁶ Un alliage mère (master alloy en anglais) est un alliage comportant deux ou plusieurs composants de l'alliage final, mais qu'on utilise de préférence aux métaux purs parce qu'il est plus facile ou moins coûteux à élaborer, ou plus facile d'emploi.

La transformation ultérieure des superalliages (par exemple forgeage-matriçage) est effectuée soit par ces acteurs eux-mêmes, soit par des métallurgistes spécialisés. Le nombre d'acteurs est plus élevé à ce stade de la chaîne de valeur niobium qu'à l'amont, et beaucoup d'entre eux appartiennent à des pays pour lesquels *a priori* on peut considérer que le risque géopolitique est faible. Le savoir-faire est présent en Europe et en France.

Eramet présente [15] un tableau montrant ses principaux concurrents dans le domaine de l'élaboration et de la transformation de certains alliages, en particulier les superalliages.

Figure 8 : Élaborateurs et transformateurs d'alliages spéciaux (source : [15])

Sociétés	Métaux élaborés					Mode d'élaboration			Matriçage de grande puissance				Forge libre
	Aciers rapides	Aciers à outils	Aciers spéciaux de hautes performances	Super-alliages	Titane	Air	Vide	Poudre	Aciers spéciaux de hautes performances	Super-alliages	Aluminium	Titane	
Aloca (États-Unis & Russie)													
ATI – Ladish (États-Unis)													
Böhler + Buderus (Autriche/Allemagne) voestalpine													
BGH (Allemagne)													
Carpenter – Latrobe (États-Unis)													
Cogne (Italie)													
Tata Steel (Inde et Royaume-Uni)													
Ellwood (États-Unis)													
ERAMET ALLIAGES													
Firth Rixson (États-Unis et Royaume-Uni)													
Gloria (Taiwan)													
Kalyani (Inde)													
HeYe (Chine)													
Hitachi Metals (Japon)													
Midhani (Inde)													
Nachi Fujikoshi (Japon)													
Otto Fuchs (RFA)/Weber (États-Unis)													
PCC (Wyman Gordon & SMC)													
Shultz (États-Unis)													
Shanghai Baosteel (Chine)													
Schmolz & Bickenbach (Allemagne et États-Unis)													
Snecma (France)													
Thyssen Krupp (Allemagne)													
Tiangong (Chine)													
Valbruna (Italie)													
VSMPO (Russie)													

3- Contraintes sur l'offre et projets de développement

3.1 Réserves et ressources mondiales, répartition

Les réserves et ressources en niobium ne sont pas toutes très bien documentées. Les mieux connues sont situées au Brésil et au Canada, les principaux producteurs actuels. Les réserves identifiées dans ces seuls pays permettent d'assurer la production pour de nombreuses années.

Figure 9 : Réserves prouvées et probables selon [13]

Réserves prouvées et probables	CBMM	Catalao (31/12/2010)	Niobec (31/12/2011)
Tonnage de minerai (kt)	829 000	5 100	419 208
Teneur en Nb ₂ O ₅ (%)	2,50%	1,07%	0,42%
Tonnage de Nb ₂ O ₅ contenu (kt)	20 725	55	1 761
Tonnage de Nb contenu (kt)	14 492	38	1 231

L'étude BGS [2] donne des chiffres du même ordre de grandeur, mais néanmoins sensiblement inférieurs : au total 11 322 kt de Nb₂O₅ contenu (7 900 kt de Niobium contenu) ; mais cette étude est antérieure et ne prend pas en compte les réévaluations de réserves au 31/12/2011. De façon surprenante, l'USGS [11] donne pour le total Brésil + Canada + USA des réserves de seulement 3 Mt de Nb.

Selon [11], les USA ont environ 150 000 t de ressources dans des gisements identifiés, mais ces ressources ne sont pas exploitables économiquement aux niveaux actuels de prix.

D'autres pays possèdent des gisements de niobium, éventuellement associé au tantale : Chine, Congo, Gabon, Égypte, Tanzanie, Malawi, Arabie Saoudite, Groenland,....

L'Union européenne ne compte actuellement aucun gisement identifié comme exploitable sur son territoire. Le potentiel français et européen est estimé limité par le BRGM [10].

3.2 Projets d'extension des producteurs existants

Au vu de la croissance rapide de la consommation de niobium, les producteurs existants ont des projets de développement. La mise en œuvre de ces projets sera plus courte que l'ouverture d'une nouvelle mine.

CBMM projette de porter sa capacité de production de ferroniobium à 130 000, voire 150 000 t/an d'ici 2016 (environ 95 000 t de Nb contenu), et de doubler sa capacité en oxyde de niobium pour la porter à 10 000 t/an en 2012 (soit 7 000 t de Nb contenu).

IAMGOLD [9] a pour la mine de Niobec un projet conduisant d'ici 2017 à multiplier par plus de 4 le volume de minerai traité et à porter la capacité de production à 24 000 t/an de ferroniobium (15 000 t Nb/an), pour un coût en capital de l'ordre de 976 M\$, dont une partie financée par la cession de 10 à 20 % de participation et par une IPO. L'étude de préfaisabilité a été présentée en décembre 2011.

3.3 Nouveaux projets miniers

Une étude récente⁵⁷ identifie des projets miniers à différents stades d'étude :

Figure 10 : Projets miniers niobium (2011)

Location	Operation Name	Owner	Resource Size		Ore Grade	Status
			Mt of Ore (mm)	Mt of Nb (000's)	%Nb ₂ O ₅	
Canada	Oka complex	Niocan Inc	14	61	0.63	Feasibility
Malawi	Kanyika	Globe Metals	55	116	0.30	Feasibility
Saudi Arabia	Ghurayyah	Tertiary Minerals	385	754	0.28	Feasibility
Gabon	Mabounié	Eramet	22	242	1.60	Pre-feasibility
Australia	Mt. Weld	Lynas Corp.	38	282	1.07	Pre-feasibility
Canada	Thor Lake	Avalon Rare Metals	375	577	0.22	Pre-feasibility
Canada	Blue River	Commerce Resources	29	22	0.11	Pre-feasibility
Canada	Aley	Taseko Mines	25	131	0.75	Drilling
Canada	Georges River	Quest Uranium Corp.	62	225	0.52	Drilling
Canada	Nemegonsenda	Sarissa Resources	45	136	0.43	Drilling
Canada	Brent & Ionnie	American Manganese	40	56	0.20	Drilling
Greenland	Sarfartoq	New Millenium Res.	4	15	0.61	No recent activity
Greenland	Motzfeldt	Angus and Ross	15	63	0.60	No recent activity
Tanzania	Panda Hill	n/a	125	288	0.33	No recent activity

On note en particulier que le groupe français Eramet envisage de développer au Gabon un gisement (Mabounié) Niobium + Tantale + Terres rares + Uranium. Un procédé de traitement spécifique doit être mis au point, et une usine pilote pourrait voir le jour en 2015. Dans le meilleur des cas, ce projet commencerait à produire au plus tôt en 2019. Globe annonce un démarrage de son projet de Kanyika au Malawi en 2015 avec une production initiale de FeNb de 4 500 t/an, correspondant à 3 000 t/an de Nb contenu.

4- Analyse de quelques facteurs de criticité

4.1 Rareté relative des ressources minières

L'abondance du Nb dans la croûte terrestre est faible, de l'ordre de 8 ppm en moyenne. Mais les réserves et ressources identifiées couvrent la production actuelle pour de nombreuses années (cf. paragraphes 3.1 et 3.3).

4.2 Concentration dans la chaîne de production

Amont de la filière :

Comme indiqué plus haut, 92 % de la production primaire de niobium provient du Brésil, avec un producteur largement dominant : CBMM. Les 3 principaux producteurs détiennent 99 % du marché. Ils sont intégrés vers l'aval, produisant le ferroniobium standard et, dans le cas de CBMM, les matières premières pour les superalliages.

⁵⁷ Roskill, cité par [3].

Quand on regarde plus particulièrement le créneau des superalliages, la situation est encore plus critique puisque CBMM est en position de monopole pour les produits précurseurs.

L'Union européenne, et *a fortiori* la France, ne comptent actuellement aucun producteur de matières premières à base de Nb.

CBMM se comporte en producteur responsable et adapte sa capacité et sa production aux besoins du marché. Toutefois l'entrée en 2011 de consortiums asiatiques dans son capital, avec des accords de take-off, fait qu'une partie de sa production est préemptée. Par ailleurs, on ne peut exclure que le Brésil cherche un jour à limiter les exportations de matières premières pour favoriser le développement de son industrie.

La mise en production à échelle significative de nouvelles mines (voir 3.3) pourrait conduire à desserrer l'étau du quasi-monopole de CBMM, mais ne pourra guère se réaliser avant la fin de la décennie en cours.

Aval de la filière :

À partir de la production d'acier ou de superalliages, le nombre d'acteurs est plus élevé, et un nombre suffisant d'entre eux sont basés dans des pays pour lesquels le risque géopolitique est faible.

4.3 Importance pour la filière aéronautique et/ou automobile

L'apport du niobium en termes d'allègement pour les tôles automobiles est important. Si jamais l'approvisionnement en niobium venait à se tarir, on peut cependant penser que le vanadium lui serait substitué dans la production de ces tôles.

Par contre, pour le secteur aéronautique, si le niobium venait à disparaître, la production de moteurs et de pièces de rechange pour les moteurs serait interrompue : le niobium est **indispensable**.

5- Scénarios⁵⁸ prospectifs à 10 ans

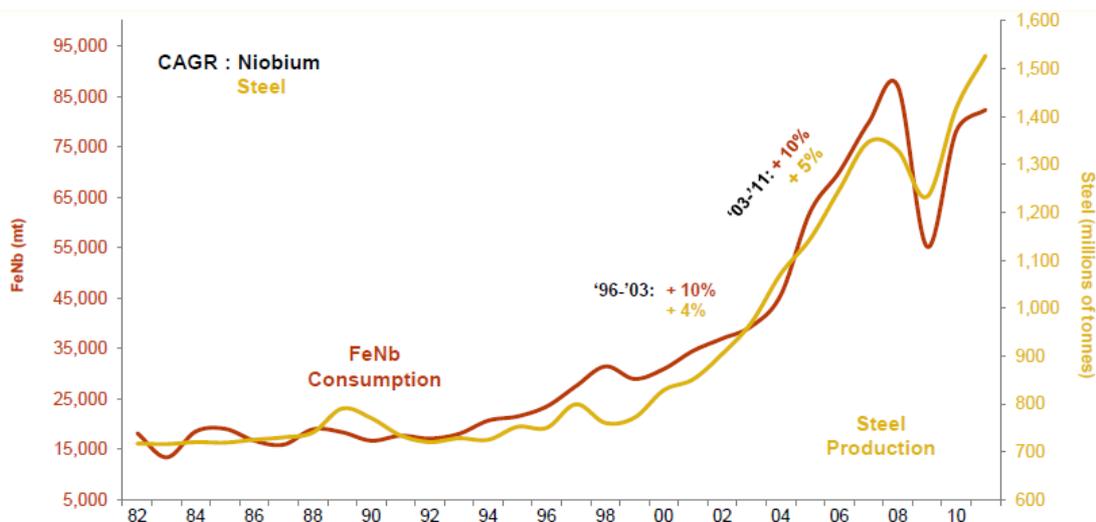
Compte tenu de ce qui précède, les risques sur l'approvisionnement se situent à l'amont de la filière ; c'est donc le point sur lequel se concentrera notre analyse prospective.

5.1 Scénario d'évolution de la demande

L'évolution de la consommation de ferroniobium (qui représente actuellement autour de 90 % de la consommation de niobium) est assez bien corrélée à la consommation d'acier :

⁵⁸ Rappelons qu'un scénario n'est pas une prédiction.

Figure 11 : Évolutions comparées des consommations mondiales d'acier et de ferroniobium [13]



Les « drivers » de la croissance de la demande de ferroniobium sont :

- la croissance de la consommation mondiale d'acier ;
- l'augmentation de l'intensité d'usage du niobium (g/t d'acier consommé), en particulier la croissance de la part des aciers faiblement alliés à haute limite d'élasticité.

L'exposé [13] prévoit un taux annuel moyen de croissance de la consommation de ferroniobium de 10 à 11 % sur les 5 prochaines années.

Pour les autres produits (superalliages incorporant du niobium, produits chimiques, ... : voir 1.2), les « drivers » sont plus divers : croissance du nombre de pièces de moteurs aéronautiques (moteurs neufs et maintenance) et de turbines à gaz produits, du volume d'équipements chimiques et pétroliers, d'instruments utilisant les supraconducteurs, des verres et céramiques spéciaux, de l'électronique, etc. Mais les volumes concernés sont à chaque fois faibles : c'est une faible proportion de la demande globale, elle n'influe pas beaucoup sur cette dernière ; les superalliages sont cependant une niche sur laquelle les exigences sont plus élevées et demandent des outils de production et un savoir-faire particuliers.

Nos analyses nous conduisent à retenir dans le scénario de base (scénario n°1) un taux moyen de croissance annuel (TMCA) de la demande en niobium (tous produits confondus) de 8,9 % par an. Bien entendu, ce type de scénario n'intègre pas les accidents de croissance. La demande en 2022 serait de l'ordre de 160 000 t de niobium.

À titre de comparaison, l'étude Fraunhofer citée par [10] page 24 prévoit une consommation de 600 000 t/an de Nb en 2030, soit un taux de croissance annuel de 9,5 %. Mackie Research Capital Corporation [16] s'attend à une croissance au taux annuel de 12 % sur les 5 prochaines années.

5.2 Scénario d'évolution de l'offre

Dans le scénario de base, dit scénario 1, nous prenons en compte les augmentations de capacité annoncées par deux des trois principaux producteurs :

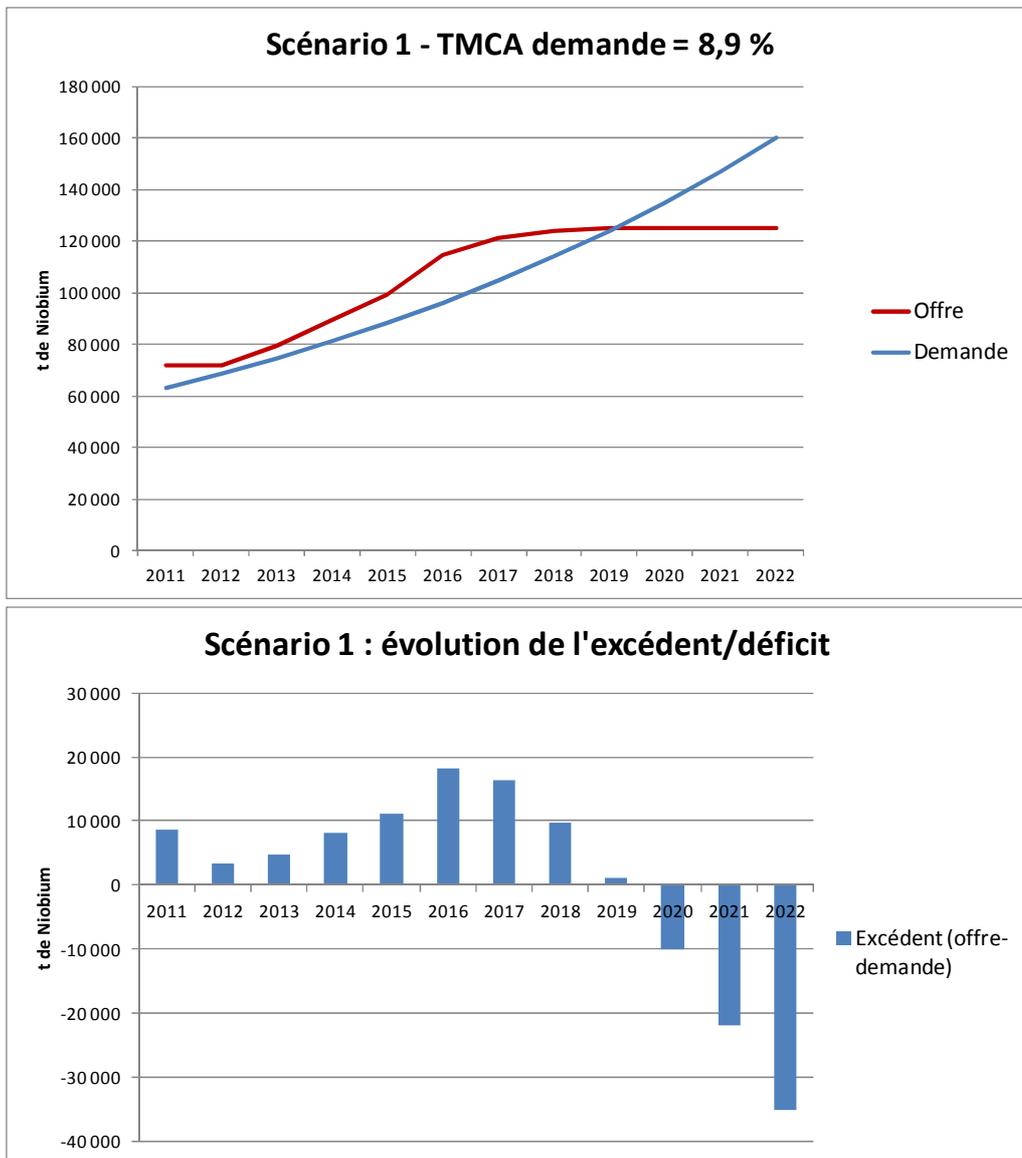
- CBMM atteindrait une capacité de 102 000 t de Nb contenu en 2016, au terme d'une montée en puissance débutant en 2013 ; dans cette capacité est incluse l'augmentation de sa capacité en produits précurseurs pour superalliages.
- Niobec /Iamgold atteindrait une capacité d'environ 15 000 t/an en 2018.

Nous supposons aussi que les réserves et ressources minières de Catalão lui permettent de continuer à produire au rythme actuel sur la période.

Nous prenons en compte le projet de Globe au Malawi, pour 3 000 t à partir de 2016.

5.3 Évolution du bilan offre-demande

Figure 12 : Scénario 1 – Scénario de base : projets annoncés. Évolution du bilan offre-demande et de l'excédent/déficit du marché



Le marché évoluerait en surcapacité jusqu'en 2018, la surcapacité passant par un pic en 2016 compte tenu de la mise en service des extensions de CBMM et du démarrage de Globe. En 2019 le marché serait à peu près équilibré.

Mais en l'absence d'autres projets que ceux listés ci-dessus, à partir de 2020, le marché serait en situation de déficit et ce déficit s'accroîtrait rapidement pour atteindre 35 000 t/an à la fin de la période.

D'autres projets, démarrant à partir de 2018-2019, seraient donc indispensables pour répondre à la demande.

5.4 Autres considérations

En ce qui concerne les produits de plus haute valeur ajoutée que le ferroniobium standard, CBMM prévoit d'investir dans des augmentations de capacité permettant de répondre à l'accroissement de la demande, visant ainsi à conserver son quasi-monopole. Pour cette raison nos scénarios concernent globalement la demande et la production de l'ensemble des produits à base de niobium.

Mais si aucun nouveau projet n'incorpore d'unité de production de produits à haute valeur ajoutée, les utilisateurs seront toujours confrontés au monopole de CBMM. Par ailleurs, en cas de pénurie globale, ils seront amenés à payer des prix plus élevés pour avoir accès à leur matière première.

5.5 Analyse du scénario et jeu des acteurs

Dans le scénario 1, on verrait donc apparaître une surcapacité de production notable à partir de 2014, en raison des augmentations de capacité chez CBMM. En 2016 apparaîtrait la capacité de Globe au Malawi, et en 2017-2018 la montée en puissance de Niobec. Si cela se produisait, les prix auraient tendance à baisser et à rester relativement faibles sur la période 2014 - 2017.

La surcapacité serait résorbée en 2019. Et hors tout nouveau développement de la production, à partir de 2020 le marché se trouverait face à un déficit de production croissant, avec des risques croissants de manque de matériau et une forte tension sur les prix.

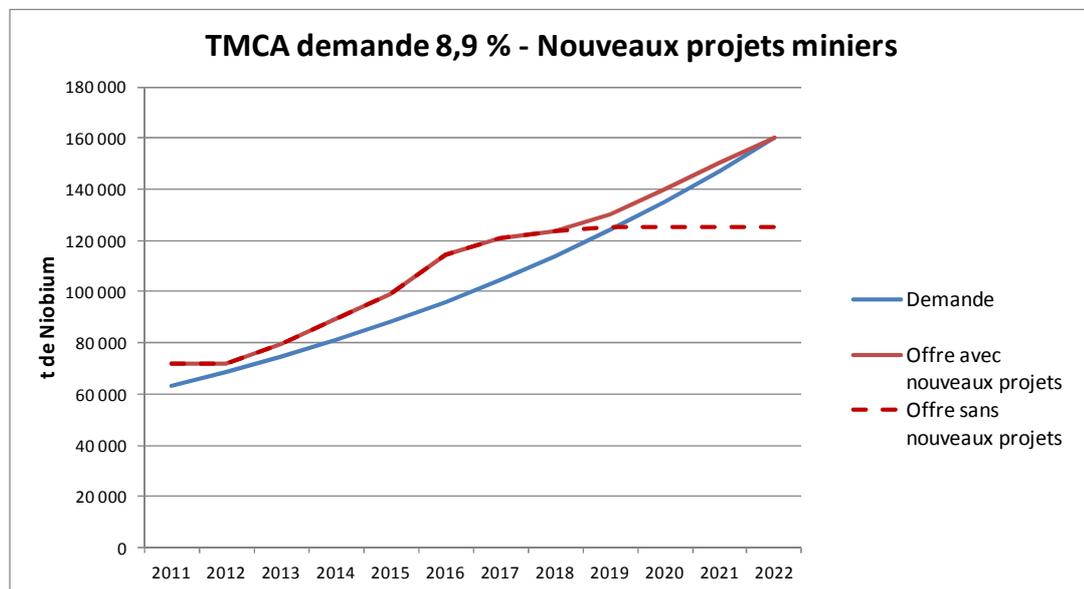
Toutefois, il nous semble peu probable que ce scénario puisse se dérouler tel quel, car il faut prendre en compte le fait que les acteurs industriels réagiront en fonction des évolutions constatées et adapteront leur stratégie. CBMM en particulier, grâce à ses importantes réserves et ressources et fort de sa position ultradominante actuelle, a une capacité certaine à réguler le marché.

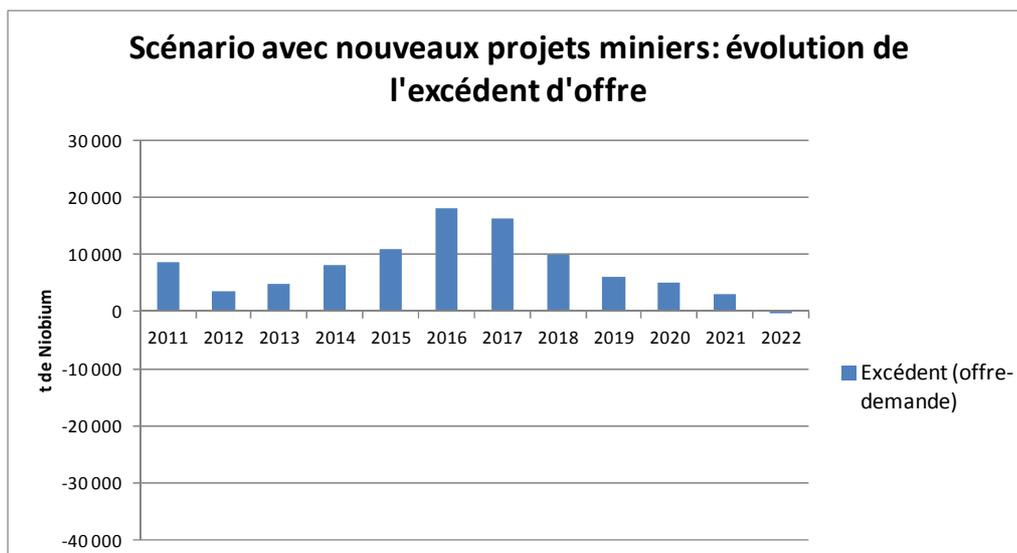
Face à un tel scénario, il est vraisemblable que les producteurs installés retarderaient un peu leurs extensions ou brideraient leur production sur 2015-2017 pour réduire l'excédent et conserver des prix rémunérateurs. Ensuite, si le rythme de croissance de

la demande se confirmait (et en l'absence de crise altérant cette croissance), la perspective de tension sur les prix après 2018 susciterait de nouveaux investissements : chez les producteurs installés, et/ou sur les projets miniers déjà étudiés. Il est là encore probable que les producteurs installés disposant des réserves et ressources nécessaires réaliseraient des extensions de capacité et éviteraient un envol excessif des prix pour décourager les nouveaux entrants, ou une substitution du ferroniobium par le ferovanadium.

Nous avons donc élaboré une variante 1bis de ce scénario, en introduisant de nouveaux projets miniers qui seraient mis en service chaque année à partir de 2019 ; pour l'instant la localisation de ces projets est difficile puisque les projets des nouveaux entrants sont soumis à beaucoup d'incertitudes et que les producteurs existants n'ont encore rien annoncé à cette échéance. Cette hypothèse nous semble cependant raisonnable, dans la mesure où le marché a besoin de ces capacités et où les ressources minières existent ; les conditions de réalisation sont le financement de ces capacités supplémentaires et la croissance effective de la demande. Ces nouveaux projets représenteraient une capacité de production additionnelle de 35 kt/an en 2022, et le marché serait à peu près équilibré en 2022 ; mais le besoin de nouvelles capacités à partir de 2022 pour accompagner la poursuite de la croissance subsisterait.

Figure 13 : Scénario 1bis – Scénario avec nouveaux projets miniers à partir de 2019. Évolution du bilan offre-demande et de l'excédent de production.





Là encore, les acteurs échelonneraient les augmentations de production de façon à lisser l'excédent de production des années 2015-2018. Les prix, ainsi « pilotés » par les acteurs installés, auraient tendance à augmenter régulièrement sur la période, de façon à financer les investissements de capacité nécessaires.

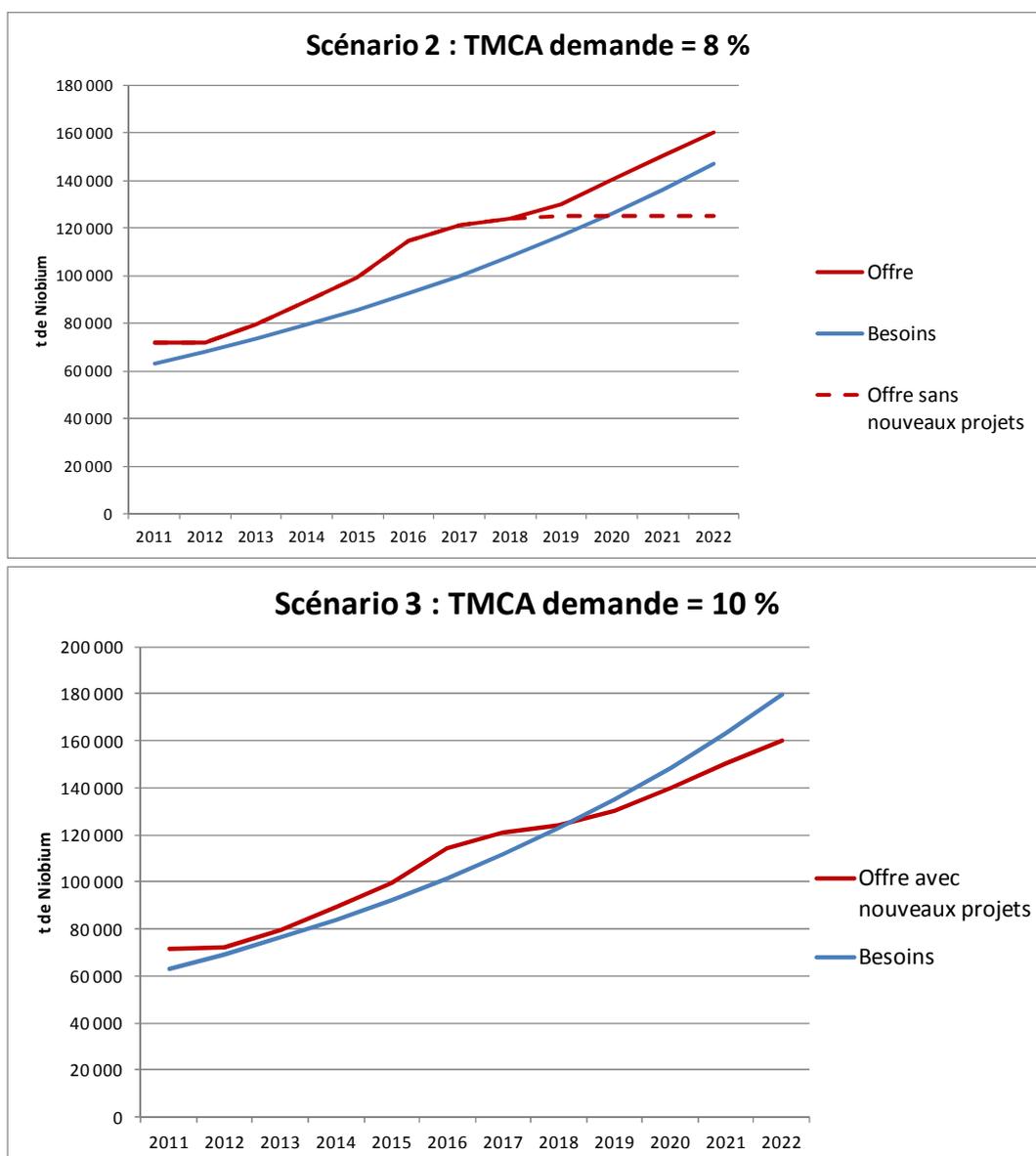
5.6 Étude de la sensibilité au taux de croissance :

Nous raisonnons sur la base du **scénario 1bis**, incluant les nouveaux projets non identifiés mais indispensables à partir de 2019.

La situation est très sensible au taux de croissance :

- Si pour une raison ou une autre (ralentissement de la croissance mondiale par exemple) la croissance était un peu moins forte que les hypothèses formulées, conduisant à un TMCA de 8 %, l'excédent de capacité correspondant aux projets retenus ne se résorberait pas d'ici 2022. Dans ce scénario 2, les prix augmenteraient moins vite que dans le scénario de base ; de nouvelles capacités resteraient nécessaires à partir de 2019-2020, mais pour des volumes inférieurs à ceux du scénario de base.
- Inversement si la croissance de la demande de niobium accélérât pour atteindre 10 %, le marché serait en sous-capacité dès 2019 et même avec les nouveaux projets pris en compte cette sous-capacité atteindrait 20 000 t en 2022, soit 11 % de la demande. Dans ce scénario 3, les prix augmenteraient plus rapidement que dans le scénario de base, en particulier à l'approche des années 2017-2018, ce qui favoriserait les projets de nouvelles capacités.

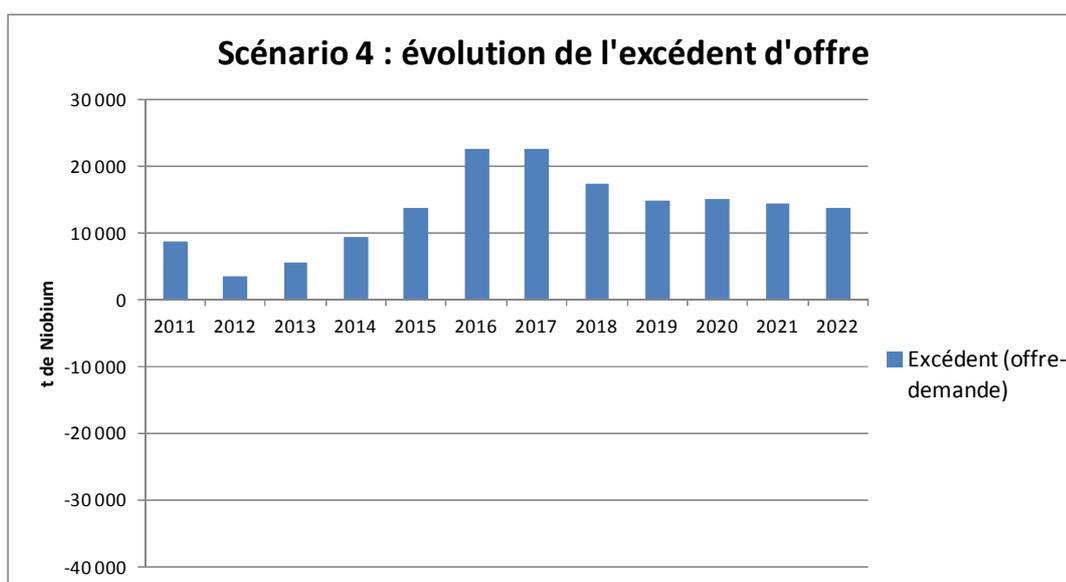
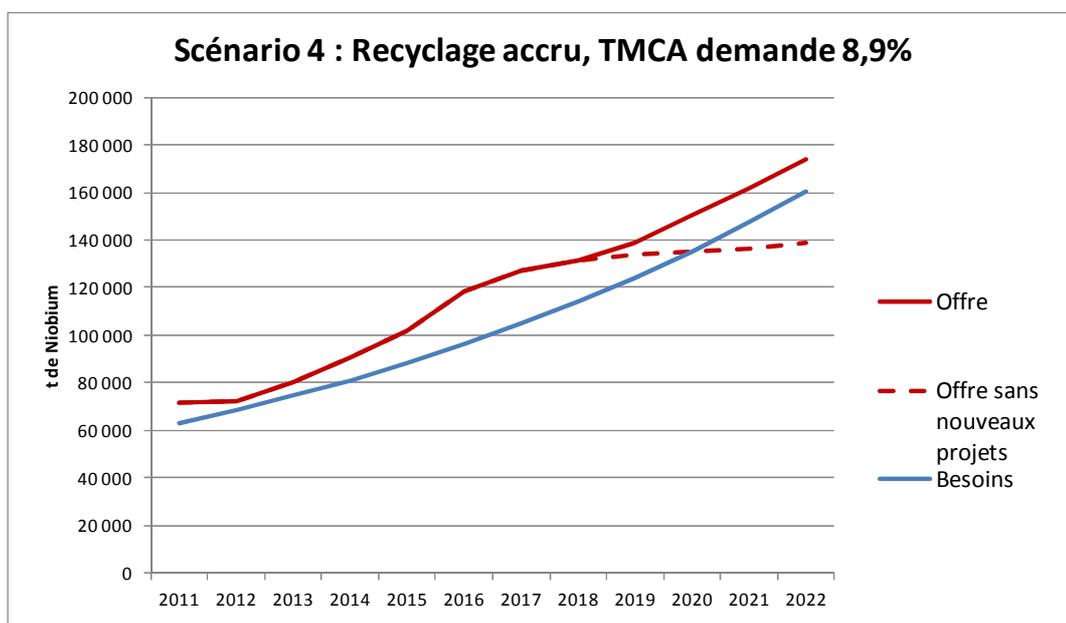
Figure 14 : Bilan offre-demande dans le cas de taux de croissance annuels plus faibles (scénario 2 : 8 %) ou plus forts (scénario 3 : 10 %)



5.7 Étude de l'impact d'un accroissement du taux de recyclage.

Les chiffres disponibles sur le taux de recyclage nous semblent sujets à caution. Le scénario 1bis raisonne à structure de production primaire et de recyclage constante, mais nous avons élaboré un scénario 4, dans lequel nous étudions l'impact que pourrait avoir un accroissement progressif du taux de recyclage du niobium : chaque année à partir de 2013, l'industrie réaliserait 2 % de taux de recyclage supplémentaire, soit 20 % de recyclage supplémentaire en 2022 ; cependant compte tenu de la durée de vie des produits, ce taux de recyclage ne s'appliquerait qu'à la consommation enregistrée plusieurs années avant, au minimum 10 ans dans la mesure où nous sommes sur des produits à cycle long (nous avons pour les calculs retenu la durée de 10 ans).

Figure 15 : Scénario 4 – Recyclage accru. Évolution du bilan offre-demande et de la surcapacité avec un taux de recyclage s’accroissant progressivement.



On constate qu’avec cette amélioration du taux de recyclage, de nouveaux projets ne seraient pas nécessaires avant 2020, et en volume inférieurs à ceux prévus au scénario 1bis. La surcapacité passerait par un maximum plus élevé en 2016, et les prix n’augmenteraient que lentement, voire pourraient baisser temporairement, sous réserve là encore d’ajustement de l’offre primaire par les industriels concernés.

5.8 Pistes pour anticiper les risques de pénurie / tension sur les prix

L’amont de la filière du niobium et de ses alliages et produits dérivés est actuellement entre les mains d’un oligopole, et même d’un quasi-monopole pour les produits nécessaires aux superalliages pour les moteurs aéronautiques.

La demande va continuer à se développer à un rythme soutenu et des augmentations de capacité et/ou des créations de capacités nouvelles seront nécessaires.

Le jeu des acteurs installés (et en particulier de CBMM) va probablement consister à chercher à maintenir leur contrôle du marché par des investissements programmés pour :

- d'une part maintenir des prix rémunérateurs, et permettant de financer leurs augmentations de production,
- d'autre part éviter d'atteindre durablement des niveaux de prix exagérés qui encourageraient les nouveaux entrants potentiels à démarrer leurs projets, ainsi qu'une substitution par le vanadium.

Les nouveaux entrants de leur côté vont se trouver confrontés à des incertitudes quant à la rentabilité de leurs projets.

Pour réduire la vulnérabilité de la France et de l'Europe, qui ne contrôlent aucune capacité de production, on peut envisager en particulier :

- **L'association d'acteurs européens aux extensions de capacité des producteurs existants**, avec contrat d'enlèvement d'une part de la production ; 30 % des parts du producteur n° 1, CBMM, ont été vendues en 2011 au profit d'acteurs asiatiques ; des possibilités restent, en particulier chez Iamgold/Niobec, qui cherche précisément à associer d'autres acteurs au financement de son augmentation de capacité. CBMM lui-même peut avoir besoin de renforcer ses moyens financiers pour faire face aux augmentations de capacité à venir.
- **La poursuite de la recherche de nouveaux gisements à développer**, comme le fait Eramet au Gabon ou Globe au Malawi ; toutefois, il faut prendre en compte le fait que l'ouverture d'une nouvelle mine est toujours longue et que c'est un pari sur le long terme ; des incertitudes pèsent sur la demande, donc sur les prix futurs, donc sur la rentabilité d'une nouvelle mine (dans le scénario n° 2 par exemple, les capacités créées sont excédentaires sur la période considérée) : de quelle façon un opérateur européen envisageant d'ouvrir une mine d'un métal stratégique peut-il être encouragé à poursuivre ses développements même si les prix du métal passent par un creux ? Par ailleurs, afin de raccourcir les délais, il peut être intéressant de s'associer ou de prendre le contrôle d'un projet déjà suffisamment avancé.
- **L'accroissement du taux de recyclage** : c'est un élément d'appoint non négligeable, mais à la condition de mettre sur pied des filières de recyclage ne dégradant pas la valeur de l'alliage collecté. Le recyclage des aciers au niobium concerne des ferrailles dans lesquelles le niobium est fortement dilué et qui elles-mêmes ne représentent qu'une faible proportion des ferrailles ; si elles sont mélangées à d'autres types de ferrailles, la réutilisation en tant que matière

première pour la fabrication d'aciers au niobium ne présentera plus d'intérêt. Le recyclage des superalliages doit également éviter les mélanges ; c'est (relativement) facile dans la filière de fabrication, mais en fin de vie des pièces concernées il faut être capable de bien identifier et séparer les alliages utilisés. Les filières adaptées, qui devraient être mises en place par des acteurs européens, ont un coût à mettre en regard du coût du métal ou alliage primaire, mais aussi de la réduction du risque d'approvisionnement.

La filière automobile utilise 21 % de la consommation de ferroniobium actuelle. Le recyclage spécifique de tôles automobiles en aciers faiblement alliés au niobium représenterait donc un enjeu intéressant. Encore faudra-t-il que ces ferrailles soient recyclées sur le territoire européen.

La constitution de stocks en cas de menace de pénurie est utile, mais ne peut être qu'une mesure à portée provisoire.

Parallèlement, il convient de suivre l'évolution des acteurs des stades aval de la filière (producteurs de superalliages, transformateurs, ...) pour s'assurer que les investissements de capacité nécessaires s'effectuent dans des pays à faible risque géopolitique.

-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-

Bibliographie

Annexe 1 : Exemples d'alliages à base niobium (ATI : Allegheny Technologies)

Annexe 2 : Exemples d'aciers au niobium (groupe Eramet)

Annexe 3 : Exemples de superalliages base nickel au niobium (groupe Eramet)

Bibliographie

- [1] « Niobium (Columbium) », Mineral Commodity Summaries, United States Geological Survey, January 2011. Accessible en ligne :
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/mcs-2011-niobi.pdf>
- [2] « Niobium-Tantalum », Mineral Profile, British Geological Survey, April 2011
- [3] « Niobium 101 », IAMGOLD Corporation, December 2011. Accessible en ligne :
<http://www.iamgold.com/English/Operations/Operating-Mines/Niobec-Niobium-Mine/Niobium-101/default.aspx>
- [4] « World Mineral Production 2005-2009 », British Geological Survey 2011
- [5] « World Mineral Production 2004-2008 », British Geological Survey 2010
- [6] « Niobium (Columbium) and Tantalum », 2009 Minerals Yearbook, U.S. Geological Survey, October 2011. Accessible en ligne :
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/myb1-2009-niobi.pdf>
- [7] « Niobium (Columbium) Supply-demand Statistics », US Geological Survey, 27/10/2011. Accessible en ligne :
<http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/ds140-niobi.pdf>
- [8] « Critical raw materials for the EU », Report of the Ad-hoc Working group on defining critical raw materials, version of 30 July 2010, European Commission
- [9] « Niobec Tour – Presentation », IAMGOLD, November 28, 2011
- [10] « Panorama 2010 du marché du Niobium », Rapport BRGM/RP-60579-FR, BEGM, Décembre 2011
- [11] « Niobium (Columbium) », Mineral Commodity Summaries, United States Geological Survey, January 2012. Accessible en ligne :
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/niobium/mcs-2012-niobi.pdf>
- [12] « World Mineral Production 2006-2010 », British Geological Survey 2012
<http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldArchive.html>
- [13] Dufresne, C., « Niobec expansion in the growing ferro-niobium markets », 13th Asian Ferro-alloys conference, 27-29 March 2012
- [14] Amit Chatterjee, « Titanium in Aero-engines – Developments and the Way Forward », Titanium 2011 Conference, October 2-5, 2011
- [15] Eramet, document de référence 2011

[16] « Don't Forget About Tantalum and Niobium Exposure », Mackie Research Capital Corporation, June 21, 2011

ANNEXE 1

Exemples d'alliages à base niobium (ATI : Allegheny Technologies)
--

Alliage Niobium (45%) + Titane (55%) : supraconducteurs, rivets dans l'industrie aéronautique

Alliage C-103 : Niobium + 10 % Hafnium + 1% Titane : moteurs de fusées

Alliage Nb-1Zr : Niobium + 1 % Zirconium : nucléaire

Alliage C-129Y : Niobium + 10 % Hafnium + 10 % Tungstène + ≈1% Yttrium

Alliage Cb-752 : Niobium + 10 % Tungstène + 2,5 % Zirconium

ANNEXE 2

Exemples d'aciers au niobium (groupe Eramet)

Aciers rapides Erasteel élaborés par métallurgie des poudres :

ASP 2017 :

Nuance à haute ténacité et excellente aptitude à la rectification. Applications : tarauds, fraises d'ébauche, scies bi-métal.

Composition chimique (%) :

C	Cr	Mo	W	Co	V	Nb
0,80	4,0	3,0	3,0	8,0	1,0	1,0

ASP 2055 :

Nuance très alliée, à structure de carbures fins pour les applications outils de coupe et travail à froid particulièrement exigeantes. Applications : taraud, fraise-mère, outil-pignon, broche, fraise en bout, travail à froid, etc.

Composition chimique (%) :

C	Cr	Mo	W	Co	V	Nb
1,69	4,0	4,60	6,3	9,0	3,2	2,1

Aciers inoxydables :

56T5 :

Pour aéronautique (disques de turbines), turbines à gaz maritimes et terrestres, outils de fonderie.

Composition chimique (%) :

C	Cr	Mo	Nb	V
0,20	11,0	0,70	0,40	0,18

X12NBW :

Pour aubes de turbines à vapeur, vannes, composants de pompes, pistons de moteurs marine.

Composition chimique (%) :

C	Cr	Nb
0,14	12,0	0,20

X17U4 :

Pour pièces forgées et pièces mécaniques.

Composition chimique (%) :

C	Cr	Ni	Cu	Nb + Ta
<0,07	16,50	4,00	4,00	0,35

Alliages de fonderie:**X26NCbF**

Acier moulé, pour application dans la mise en forme superplastique des alliages de titane.

Composition chimique (%) :

C	Cr	Ni	Mn	Nb	N
0,30	26,00	12,00	5,00	2,00	0,60

XN50SPF

Alliage base Nickel. Outils pour formage SPF d'alliages de titane (Très grande résistance à l'oxydation à haute température et propriétés mécaniques adaptées).

Composition chimique (%) :

C	Cr	Fe	W	Nb
0,35	23,00	22,00	2,00	0,50

ANNEXE 3

Exemples de superalliages base nickel au niobium (groupe Eramet)

Alliage base Nickel R2449

Superalliage pour outils, filières pour étirage de métaux lourds, aubes de turbines

Composition chimique (%) : base = nickel

C	Cr	Fe	Nb	Mo
0,10	19,00	19,00	5,20	3,00

Alliage base Nickel NY625

Superalliage pour industrie pétrolière, industrie chimique (résistance à l'oxydation et à la corrosion combinée à de très bonnes propriétés mécaniques à haute température)

Composition chimique (%) : base = nickel

C	Cr	Mo	Nb	Fe	Al	Ti
≤ 0,10	22,00	9,00	3,70	≤5,00	≤0,40	≤0,40

Alliage base Nickel NY625

Superalliage pour aérospace, construction navale, plates-formes pétrolières, chimie, cryogénie (excellente résistance à la corrosion, excellentes propriétés mécaniques jusqu'à 1100 °C).

Composition chimique (%) : base = nickel

C	Cr	Mo	Nb+Ta	Fe	Al	Ti
< 0,03	22,00	9,00	3,60	<5,00	<0,40	<0,40

Alliage base Nickel PER706

Superalliage pour aéronautique (disques de compresseurs), turbines à gaz marines et terrestres

Composition chimique (%) : base = nickel

C	Fe	Cr	Nb+Ta	Ti	Al
< 0,04	37,00	16,00	2,90	1,80	0,20

Alliages base Nickel PYRAD53NW et PER718

Superalliages pour aéronautique (disques de compresseurs), turbines à gaz marines et terrestres, agrafes et divers composants demandant une haute résistance mécanique, et inoxydables ou non magnétiques.

Composition chimique (%) : base = nickel

C	Fe	Cr	Nb	Mo	Ti	Al
0,04	18,50	18,00	5,20	3,00	0,90	0,50

VANADIUM (V)

7 juillet 2012

Avertissement : la présente note est rédigée dans le cadre d'une étude précise, elle ne prétend donc en aucun cas à l'exhaustivité.

Résumé :

Le marché du vanadium est relativement opaque et les chiffres de consommation et de production peuvent différer sensiblement selon les sources. La consommation 2010 serait de l'ordre de 60 à 70 kt.

Le vanadium est extrait de mines de vanadium, ou à partir de laitiers d'aciéries utilisant un minerai de fer à teneur en vanadium suffisante, de résidus pétroliers, de cendres volantes de centrales au charbon, et de certains minerais d'uranium. La source principale est représentée par les laitiers d'aciéries.

La ressource n'est pas rare, mais la production est concentrée sur la Chine, la République sud-africaine et la Russie ; l'Europe dépend du reste du monde pour ses approvisionnements.

Les produits obtenus sont utilisés principalement pour les aciers (92-93 % de la consommation), et en faible proportion pour la chimie (catalyseurs entre autres) et les alliages de titane (environ 3 %).

La demande pour les aciers va se développer plus rapidement que la production d'acier, en raison de la montée en qualité des aciers utilisés par la Chine en particulier.

Les batteries incorporant du vanadium, pour stocker l'électricité provenant de sources intermittentes sur le réseau ou pour les véhicules électriques, pourraient dans les années à venir représenter une part notable et croissant rapidement de la demande.

En cas de développement très rapide du secteur des batteries, la croissance de l'offre pourrait ne pas être suffisante et le marché actuellement excédentaire basculer en situation de déficit, avec des prix très élevés.

Pour parer à cette éventualité, les pistes suivantes sont envisageables :

- la conclusion d'accords d'approvisionnement avec l'amont de la filière,
- l'association d'acteurs européens aux projets de nouvelles capacités de production, avec contrat d'enlèvement d'une part de la production.

Par ailleurs, il serait souhaitable de surveiller l'évolution des acteurs détenant le savoir-faire de la production d'oxyde pur et d'alliages mères pour s'assurer que les compétences et capacités de production sur le sol européen restent de nature à satisfaire les besoins de la filière aéronautique.

1- Demande : produits et utilisations

1.1 Produits intermédiaires

Le vanadium provient d'exploitations minières, soit directement sous forme de minerai ou de concentré, soit indirectement, lorsqu'il est extrait de laitiers obtenus lors de l'élaboration d'acier, quand ce dernier est produit à partir d'un minerai de fer contenant du vanadium, comme la titanomagnétite vanadifère. On l'extrait également de résidus pétroliers, de cendres volantes (résidu de la combustion du charbon), ou en sous-produit de la production d'uranium. Les catalyseurs usés sont recyclés pour récupérer le vanadium et les autres métaux.

Dans le procédé d'élaboration, l'oxyde de vanadium est une étape intermédiaire avant la production de ferrovanadium, d'alliages mères⁵⁹ ou de dérivés chimiques.

Le vanadium est commercialisé sous les formes suivantes (voir schéma de principe en annexe 1) :

- Les matières premières : minerais et concentrés, les cendres volantes, les laitiers et résidus vanadifères, les catalyseurs usés ;
- Le ferrovanadium (FeV), essentiellement destiné aux applications sidérurgiques ; le FeV à 45-50 % de V est produit par réduction silicothermique de l'oxyde V_2O_5 contenu dans le laitier ou autre matière première vanadifère ; le FeV à 80 % de V est produit par réduction aluminothermique de V_2O_5 en présence de ferraille, ou réduction directe dans un four à arc électrique [1] ;
- L'oxyde V_2O_5 à des degrés différents de pureté, et les autres oxydes et hydroxydes de vanadium ;
- Les alliages mères Aluminium-Vanadium pour les alliages de titane ;
- Des dérivés chimiques divers (électrolytes, vanadates -dont le vanadate de lithium- et métavanadates, sulfate, chlorure VCl_4 et oxychlorure $VOCl_3$, etc.).

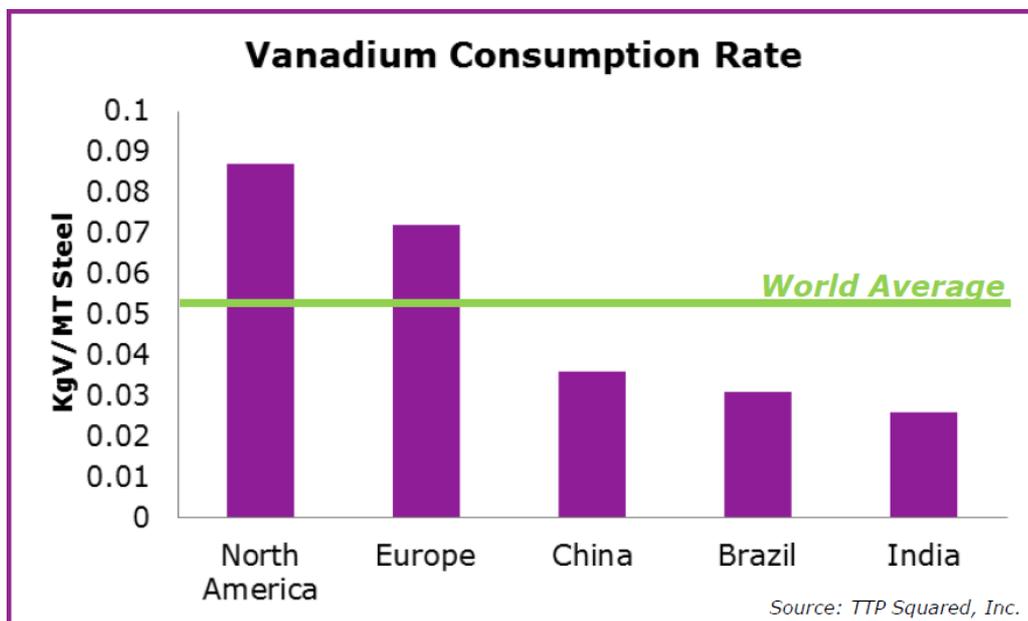
1.2 Utilisations finales

L'utilisation la plus importante du vanadium est comme **élément d'addition dans les aciers**, auxquels il apporte une augmentation de la résistance, de la dureté et de la résistance à l'usure. Il est en particulier utilisé, aux côtés d'autres éléments, dans les

⁵⁹ Un alliage mère (master alloy en anglais) est un alliage comportant deux ou plusieurs composants de l'alliage final, mais qu'on utilise de préférence aux métaux purs parce qu'il est plus facile ou moins coûteux à élaborer, ou plus facile d'emploi. Par exemple des alliages mères aluminium-vanadium sont utilisés pour l'élaboration des alliages titane-aluminium-vanadium.

alliages faiblement alliés à haute limite d'élasticité (HSLA steels en anglais⁶⁰ ; teneur maximale 0,2 % de vanadium), les aciers à outils et les aciers rapides. Il est introduit essentiellement sous forme de ferrovandium. L'intensité d'usage du vanadium est encore très différente selon les pays, en fonction de leur stade de développement, qui joue sur la qualité des aciers utilisés. La moyenne mondiale est un peu supérieure à 50 g de vanadium par tonne d'acier, mais la Chine, le Brésil, l'Inde ne dépassent pas 35 g/t pour la première, 30 g/t pour les deux autres, alors que l'Europe en consomme à peu près 70 g/t et les USA un peu plus de 85 g/t. Si la Chine consommait proportionnellement autant que l'Europe, pour une production d'acier égale à celle de 2011, sa consommation de vanadium augmenterait d'environ 24 000 t.

Figure 1 : Intensité d'usage du vanadium dans les aciers (tiré de [8])



Le nouveau code de la construction chinois impose à partir de juillet 2011 l'emploi d'aciers plus performants, ce qui se traduirait par une demande de vanadium supplémentaire de 27 000 t/an [8].

La **chimie (catalyseurs en particulier)** est le second domaine d'emploi du vanadium. Les deux principaux produits nécessitant un catalyseur au vanadium sont l'acide sulfurique et le caoutchouc synthétique. Outre les catalyseurs, les produits chimiques dérivés du vanadium comprennent par exemple des composés utilisés dans divers types de batteries utilisées pour stocker l'énergie ; deux applications destinées l'une au réseau électrique (stockage de masse de l'électricité produite par des sources

⁶⁰ Voir par exemple le site Internet HSLA-V Steel : High-Strength Low-Alloy Steel Microalloyed with Vanadium www.hsla-v.org, ou le site de Vanadium technology partnership <http://vanadiumtechnologypartnership.org/>

intermittentes), l'autre aux véhicules électriques (batteries au lithium), présentent un potentiel de développement important.

Le vanadium est également employé dans des **alliages de titane** utilisés entre autres dans l'aéronautique (voir ci-après paragraphe 1.3). L'alliage le plus couramment utilisé est le TA6V contenant 6 % d'aluminium et 4 % de vanadium. Le vanadium est couramment introduit sous forme d'alliage mère aluminium-vanadium.

Le vanadium peut être utilisé comme affineur de grain dans les alliages d'aluminium (alliages de corroyage).

En 2010-2011, la répartition de la consommation mondiale entre secteurs utilisateurs était la suivante ([3], [8]) :

- Aciers : 92-93 %**
- Chimie : 4 %**
- Alliages de titane : 3-4 %**

La répartition de la consommation en 2010 aux USA était la suivante [1] (certains détails sont volontairement omis par l'USGS pour des raisons de confidentialité) :

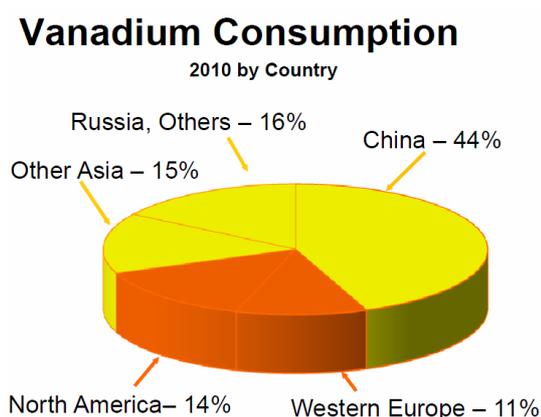
Figure 2 : Décomposition de la consommation déclarée aux USA en 2010 [1]

Consommation US 2010	t de V
Utilisations	
Acier (hors HSLA et acier pour outils)	2 990
Superalliages	9
Autres	2 030
Total	5 030
Formes d'utilisation	
Ferrovandium	4 210
Oxyde	4
Autres	815
Total	5 030

La demande 2010, selon [3], serait d'environ 69 kt⁶¹, avec la répartition géographique suivante :

⁶¹ Abréviation : 1kt = 1 000 t .

Figure 3 : Répartition géographique de la demande 2010 [3]



La Chine est le premier consommateur de vanadium.

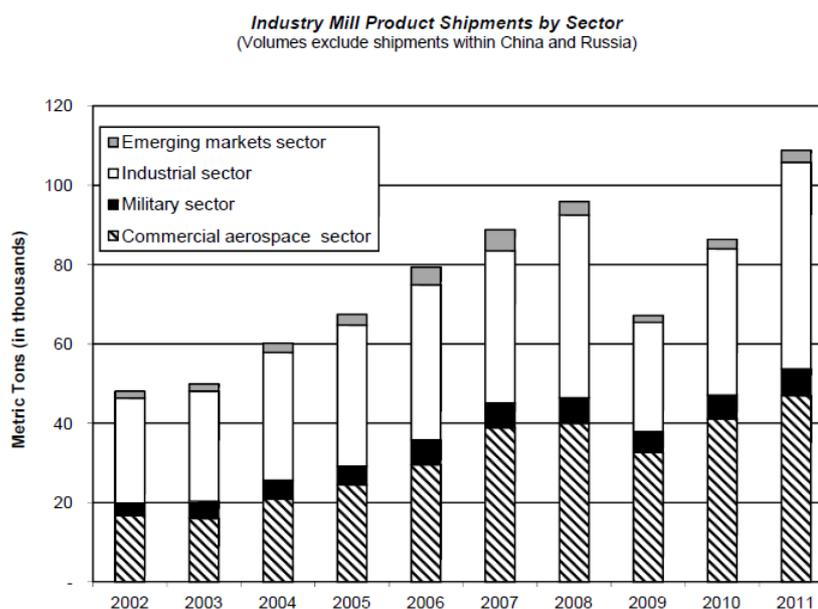
1.3 Données chiffrées sur l'utilisation dans la filière aéronautique

Le secteur de l'aéronautique civile est une composante majeure du marché des **alliages de titane**, dont le principal est le TA6V incluant 4 % de vanadium.

Figure 4 : Estimation de la consommation mondiale de **titane** par secteur ([4])

Tonnes	2003	2008	2009
Aéronautique commerciale	14-18 000	42-46 000	29-30 000
Applications industrielles	20-23 000	36-38 000	26-28 000
Applications militaires	8-10 000	10-11 000	8-9 000
Biens de consommation	6-7 000	11-13 000	7-9 000
Total	48-58 000	99-108 000	70-76 000

Figure 5 : Évolution de la consommation de **titane** par secteur industriel ([14])



Depuis les effets de la crise en 2009, la consommation d'alliages de titane a repris sa croissance à un rythme vigoureux.

La référence [5] présente l'utilisation des alliages métalliques dans l'aéronautique de la façon suivante :

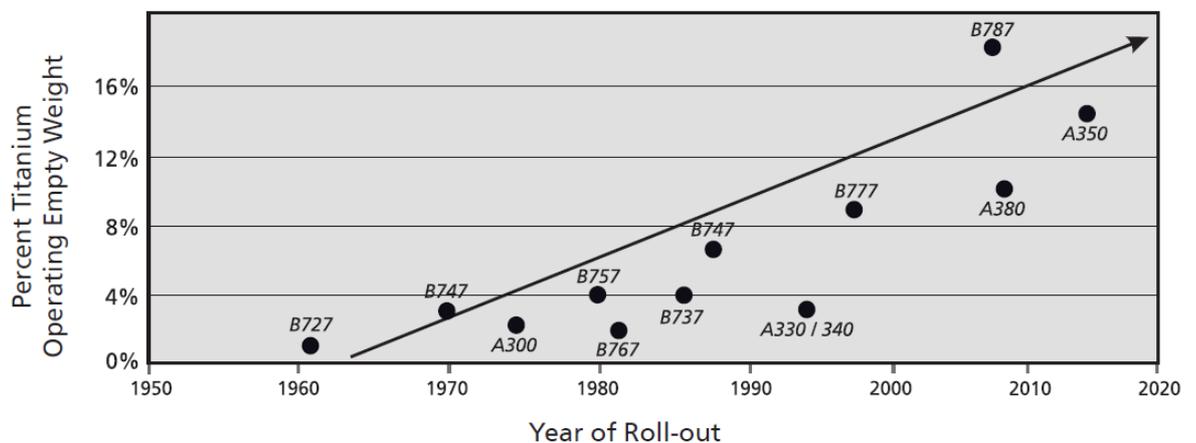
Pour les cellules, les métaux à assembler sont principalement en alliages légers base aluminium, base titane ou en inox haut de gamme. Pour les moteurs, les classes de matériaux utilisés dépendent des températures de fonctionnement : les motoristes utilisent des alliages titane de l'ambiante à 550°C, des bases nickel au delà de 550°C. Les alliages de cobalt sont réservés aux chambres de combustion où les températures peuvent atteindre 2000°C

Les principales applications des alliages de titane dans l'aéronautique civile sont les pièces de structure, les pièces de moteurs (aubes de fans et compresseurs, disques), et certains composants (tuyauteries, train d'atterrissage, ...). Le titane est favorisé par l'utilisation de composites à matrice organique avec lesquels il offre une meilleure compatibilité (coefficient de dilatation et résistance à la corrosion en particulier) que d'autres métaux, l'aluminium en particulier.

Les hélicoptères utilisent les alliages de titane dans les pièces moteur, et pour les hélicoptères militaires les pièces forgées du rotor principal.

L'utilisation des alliages de titane dans la filière aéronautique est appelée à croître rapidement car les nouveaux modèles d'avions vont en intégrer un tonnage supérieur aux modèles conventionnels.

Figure 6 : Graphique extrait de [6] : pourcentage de titane dans le poids à vide des appareils, selon la génération



Titanium Usage on Boeing Aircraft

Source: Boeing Commercial Airplane Group

Les nouveaux programmes militaires vont également renforcer la demande : 3 500 à 5 000 t/an en 2005 pour le F35, 35 à 50 t/an à partir de 2014 pour l'A400M [7].

2- Offre mondiale

2.1 Volume de production

Les statistiques de production sont à utiliser avec précaution, compte tenu de la diversité des sources de vanadium et du fait qu'une grande partie de la production est le fait de sociétés intégrées dans la production d'acier. Les quantités sont exprimées soit en lbs de V_2O_5 , soit en t de V contenu⁶².

Le marché du vanadium est relativement opaque, des chiffres cohérents de production et de consommation sont difficiles à trouver, et peuvent différer sensiblement selon les auteurs.

L'USGS et le BGS donnent tous deux des chiffres de production primaire, représentant le tonnage de vanadium contenu dans les minerais et concentrés de vanadium et les laitiers d'aciérie vanadifères, excluant le vanadium en provenance des résidus pétroliers, des cendres volantes, des catalyseurs usés. Leurs estimations diffèrent sensiblement.

Figure 7 : Comparaison des chiffres de production 2010 USGS [1] et BGS [9]

Comparaison des données de production USGS - BGS		
t de V	BGS 2010	USGS 2010
Russie	21 000	15 000
RSA	22 606	19 000
Chine	22 000	22 000
Kazakhstan	1 000	1 000
Autres dont USA	ND	ND
Total	67 000	57 600

Evraz Stratcor⁶³ [3] donne un chiffre global de capacité 2010 de 342 Mlbs soit 155 kt de V_2O_5 , soit encore 87 000 t de V contenu, et une production 2010 de 284 Mlbs V_2O_5 , soit 72 000 t de V contenu, ainsi que des taux d'utilisation par type de source, à partir desquels on peut calculer des estimations de production.

⁶² Facteurs de conversion : 1 lb = 0,453952 kg ; V contenu dans V_2O_5 = $102/182$ = 56 %.

⁶³ Producteur américain contrôlé par le groupe russe Evraz.

Figure 8 : Capacité et production, selon la ressource en vanadium ; calcul à partir de [3]

Source de vanadium	Capacité 2010 (t de V)	Taux d'utilisation	Production 2010 (t de V)	% de la production 2010
Minerai	19 996	83%	16 597	23,1%
Laitier production acier	39 123	87%	34 037	47,5%
Résidus pétrole et charbon	13 041	83%	10 824	15,1%
Catalyseurs usés	11 302	85%	9 607	13,4%
Sous-produit Uranium	3 478	19%	661	0,9%
Total 2010 en t de V	86 940	83%	71 726	100,0%

On constate que les chiffres de production primaire sur une base comparable aux chiffres de l'USGS et du BGS (minerai + laitier + sous-produit des mines d'uranium) donnent un troisième niveau de production 2010, plus faible que les deux premiers : 51 295 t de V. Plus de 20 000 t proviendraient des résidus pétroliers, cendres volantes, et catalyseurs usés.

Atlantic Ltd [10] utilise une étude CPM faisant apparaître une offre globale d'environ 71,5 kt en 2010, et 76,8 kt en 2011. 81 % proviendraient de minerais de vanadium et de laitier. Ces chiffres sont proches de ceux de l'USGS pour la production en provenance de minerai et laitier, et de ceux d'Evraz Stratcor pour l'offre totale.

Selon l'USGS, le Japon et les USA sont les deux pays où une quantité significative de vanadium est produite à partir de résidus pétroliers.

2.2 Répartition géographique de la production de vanadium

La part de la Chine dans la production mondiale est de 52 % ; la RSA vient en deuxième position avec 24 %, la Russie avec 10 % et les USA avec 9 % [3].

2.3 Les principaux producteurs

Les trois principaux producteurs sont Evraz (groupe russe), Pangang Group Steel Vanadium and Titanium (Chine, anciennement Panzhihua), et Xstrata.

La figure suivante donne les noms et quelques caractéristiques de sociétés actives dans la production des produits à base de vanadium ; toutes ne publient pas leurs chiffres de production ou de capacité.

Quelques informations complémentaires sur certaines d'entre elles ([1]) :

- **Le groupe Evraz** a produit en 2010 du FeV à hauteur de 13 507 t de V contenu, et des oxydes, produits chimiques et alliages mères à hauteur de 1 317 t de V contenu. Le complexe métallurgique de Highveld Steel and

Vanadium (RSA) a produit 64 000 t de laitier vanadifère en 2010 ; ce laitier est traité par Vametco, ou commercialisé par la société Hochvanadium qui le fait transformer par Treibacher. Le minerai de la mine de GKOK en Russie est transformé en acier et laitier par l'aciérie NTMK, et le laitier, qui contient jusqu'à 20 % de vanadium, est traité dans l'usine de Vanady-Tula.

- **Rhovon** (groupe Xstrata) aurait produit 4 300 t de FeV et 9 920 t de V_2O_5 en 2010.
- L'usine White Mesa de **Denison Mines**, qui traite des minerais d'uranium, aurait produit 1 060 t de V_2O_5 en 2010.

Indépendamment de cette liste, les fournisseurs d'alliages mères à base aluminium proposent des alliages aluminium-vanadium : KBM Affilips (Pays-Bas), LSM (UK, groupe AMG), Milward Alloys (USA), SLM (Corée), Konik Industries (Chine), ...

Le vanadium est dans la situation particulière où il est doublement lié à l'acier : d'un côté sa demande est conditionnée par la demande d'acier, et la montée en qualité des aciers produits dans les pays émergents, de l'autre sa production dépend de la production d'acier à partir de certains types de minerais.

Figure 9 : Sociétés actives dans la production de dérivés du vanadium

Société (groupe)	Pays	Sources de Vanadium					Produits						Capacité annuelle	
		Minerais/ concentrés	Laitiers d'aciérie	Résidus pétrole, charbon	Catalyseurs usés	Oxyde	Concentrés	FeV	Alliage V-N Nitrovan	Oxyde V2O5	Alliages mères	Catalyseurs		Autres dérivés chimiques
Evrax Stratcor (Evrax)	USA	x	x	x	x					x		x	x	5,4 kt V2O5
Vanady-Tula (Evrax)	Russie		x					x		x				12,5 kt V2O5 7,1 kt FeV
Vametco (Evrax)	RSA	x							x					3,4 kt Nitrovan
Rhovan (Xstrata)	RSA	x						x		x				6 kt FeV 10 kt V2O5
Nikom (Evrax)	Rép. Tchèque					x		x						4,6 kt FeV
Treibacher <i>(partenariat avec Evrax Highveld Steel & Vanadium)</i>	Australie		x					x						
Bear Metallurgical (Eramet)	USA					x		x						
GCMC (Eramet)	USA				x			x		x				
International Specialty Alloys (Kennametal) <i>(partenariat avec Evrax Stratcor)</i>	USA					x					x			
AMG Vanadium (Metallurg / AMG)	USA				x			x		x	x	x		
Reading Alloys (Ametek)	USA					x					x			
Denison Mines <i>(usine de White Mesa)</i>	USA	x <i>(mine U)</i>						x		x				1,3 kt V2O5
Chengde Xin Xin	Chine							x		x				
Pangang Group Steel Vanadium and Titanium	Chine													20 kt de produits vanadium en 2011
Métaux Spéciaux (Nippon Soda)	France					x						x		
GfE (AMG)	Allemagne			x	x					x	x	x	x	

2.4 Recyclage

Selon [1], le recyclage des catalyseurs usés fournit environ 2 700 t de vanadium par an aux USA, et représente donc la moitié de la consommation globale enregistrée aux USA. Nous avons indiqué plus haut que le volume mondial serait de l'ordre de 9 600 t [3].

Le vanadium contenu dans les ferrailles recyclées passe dans le laitier et n'est pas récupéré [1].

2.5 Substitution

Dans les aciers faiblement alliés à haute limite élastique, le niobium et le vanadium sont dans une certaine mesure substituables l'un à l'autre. Toutefois, par le passé, les variations de prix du vanadium, par comparaison à un marché du niobium traditionnellement mieux maîtrisé par les producteurs, ont plutôt joué en faveur du niobium. D'autres métaux peuvent aussi jouer un rôle semblable à celui du vanadium dans les aciers, au moins pour certaines applications : molybdène, tungstène, titane, manganèse.

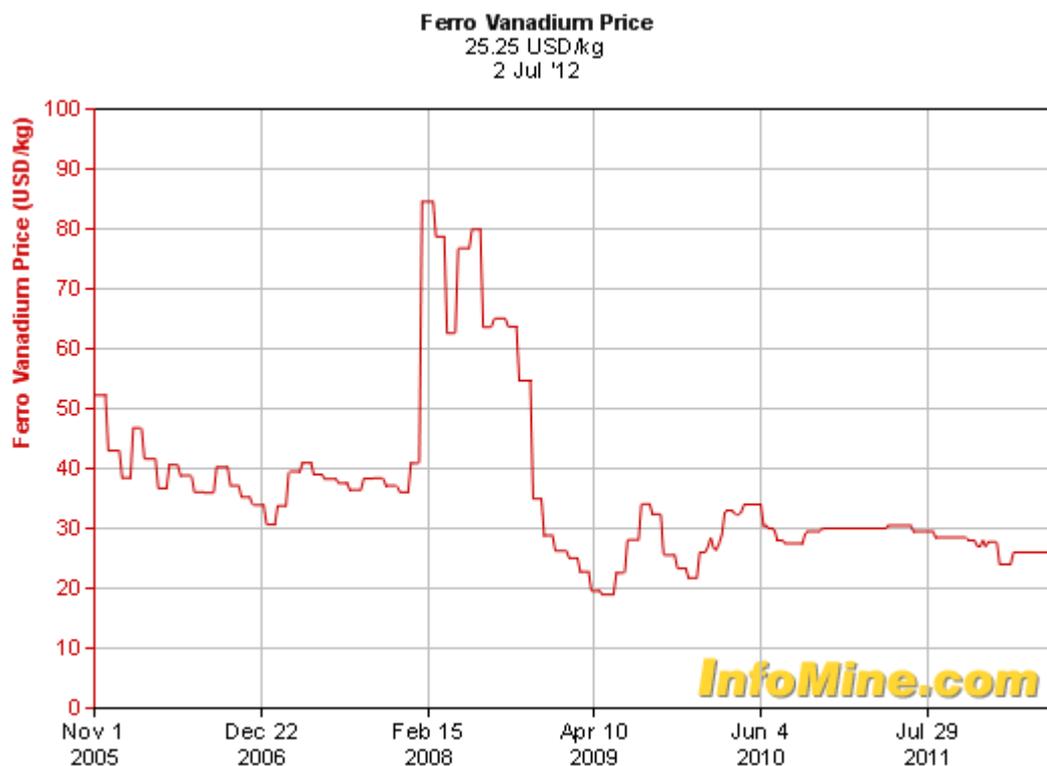
En tant que catalyseurs, le platine et le nickel peuvent dans certaines réactions se substituer au vanadium.

Dans les applications aéronautiques des alliages de titane, le vanadium est incontournable, et sa demande dans ce secteur sera tirée par la croissance de la proportion de composites et de titane dans les nouvelles générations d'avion.

2.6 Evolution des prix

Le prix du ferrovanadium a été extrêmement volatil au cours des 7 dernières années, dépassant les 80 \$/kg en février 2008. Depuis fin 2010, il est en baisse depuis les 30 \$/kg jusqu'au niveau actuel d'environ 25 \$/kg.

Figure 10 : Évolution du prix du ferrovanadium depuis fin 2005 (source : site www.infomine.com)



3- Contraintes sur l'offre et projets de développement

3.1 Réserves et ressources mondiales, répartition

Les réserves et ressources sont difficiles à apprécier, en raison de la multiplicité des sources de vanadium. Le vanadium n'est pas toujours indiqué dans les déclarations de réserves et de ressources des mines exploitant le minerai de fer.

Les estimations USGS [1] sont de

- 14 Mt pour les réserves, dont 5 Mt en Chine, 5 Mt en Russie, 3,5 Mt en RSA ;
- Plus de 63 Mt pour les ressources.

3.2 Projets

De nombreux projets concernant le vanadium existent, à des degrés d'avancement divers.

Figure 11 : Carte des projets miniers (source : [11])



Les projets miniers qui semblent actuellement (juin 2012) les plus proches d'aboutir sont :

- Atlantic Ltd à Windimurra (Australie), mine et usine de FeV, capacité visée autour de 6 500 t de V contenu, démarrage en cours ;
- American Vanadium à Gibellini (USA), mine et production de V₂O₅, capacité de 6 350 t/an de V₂O₅ (3 500 t de V contenu), démarrage annoncé début 2013 ;
- Largo Resources à Maracas (Brésil), mine et FeV, capacité de 5 000 t/an de FeV, démarrage fin 2013 ;
- Sino Vanadium à Daquan (Chine), mine et V₂O₅, capacité 6 400 t/an de V, démarrage annoncé fin 2012 mais pas de publication récente suite à la reprise par le management.

D'autres projets comme Reed Resources à Barrambie (Australie ; gisement de Fe-Ti-V), Pacific Ore Mining (précédemment Apella Resources) au Québec (Iron-T et Lac Doré), Energizer Resources à Madagascar (projet Green Giant), ... en sont encore à l'étape de l'exploration et des études.

Parallèlement, Evraz Stractor a annoncé une extension (3 000 t de V) de son usine américaine en 2013 et en prévoit une deuxième en 2014 ; l'usine de Vanady-Tula serait dans une phase de développement de sa production (+10 % en 2013 par rapport à 2010) [1]. Pangang serait en train de réaliser une extension de 10 000 t/an V de son unité de production de FeV à partir de laitier d'aciérie.

4- Analyse de quelques facteurs de criticité

4.1 Rareté relative des ressources minières

Les ressources minières sont difficiles à évaluer du fait de la diversité des origines du vanadium, et de son statut de sous-produit de la fabrication des aciers. Toutefois, les ressources identifiées sont suffisantes pour de nombreuses années, même avec une augmentation rapide de la consommation.

Une partie importante de l'offre actuelle dépend de la production d'acier, alors que la demande de vanadium est appelée à croître plus vite que la production d'acier. La question est donc, plus que l'existence de ressources minières, celle de la rentabilité de projets de nouvelles capacités de production consacrées au vanadium. Dans certains cas d'évolution rapide de la demande, les prix devront augmenter pour favoriser le démarrage des projets nécessaires.

4.2 Concentration dans la chaîne de production

La production est géographiquement concentrée sur trois pays : la Chine, la Russie et la RSA. L'industrie minière sud-africaine connaît actuellement des problèmes liés au contexte social et politique. La Chine a des besoins en vanadium et autres métaux destinés à améliorer la qualité des aciers qui croissent rapidement, et va capter une part grandissante de l'offre de vanadium.

L'Europe (et donc la France) dépend des autres continents pour son approvisionnement en vanadium.

En ce qui concerne les produits destinés aux alliages de titane (oxyde purifié, alliages mères aluminium vanadium), le nombre d'acteurs n'est pas très important, mais des outils industriels et le savoir-faire correspondant existent en Europe.

4.3 Importance pour la filière aéronautique

Le vanadium est essentiel pour les alliages de titane, dont l'utilisation dans le secteur aéronautique ne fait que croître.

5- Scénarios⁶⁴ prospectifs à 10 ans

5.1 Scénario d'évolution de la demande

La demande globale de vanadium est actuellement tirée par la consommation d'acier ; les deux « drivers » principaux sont la croissance de la production d'acier et la croissance de l'intensité d'usage du vanadium dans l'acier utilisé (voir plus haut). La

⁶⁴ Rappelons qu'un scénario n'est pas une prédiction.

demande mondiale de vanadium pour les aciers croît donc plus vite que la production d'acier : notre scénario conduit à un taux moyen de croissance annuel de 8 %.

La demande pour les alliages de titane est une faible proportion de la demande globale, elle n'influe pas beaucoup sur cette dernière ; les alliages mères sont cependant une niche sur laquelle les exigences sont plus élevées et nécessitent des outils de production et un savoir-faire particuliers.

En ce qui concerne la demande pour les alliages de titane pour l'aéronautique (civile et militaire), ICF International a présenté [12] les résultats d'une étude détaillée prévoyant une croissance avec un TMCA de 6,8 %, tirée par l'augmentation de la production et par l'augmentation de la pénétration du titane. Le principal alliage étant le TA6V, il est raisonnable de considérer que la demande en vanadium pour ce segment suivra le même rythme.

Globalement, tous usages confondus, notre scénario central conduit à un taux moyen de croissance annuel (TMCA) de la demande de vanadium de 7,8 %.

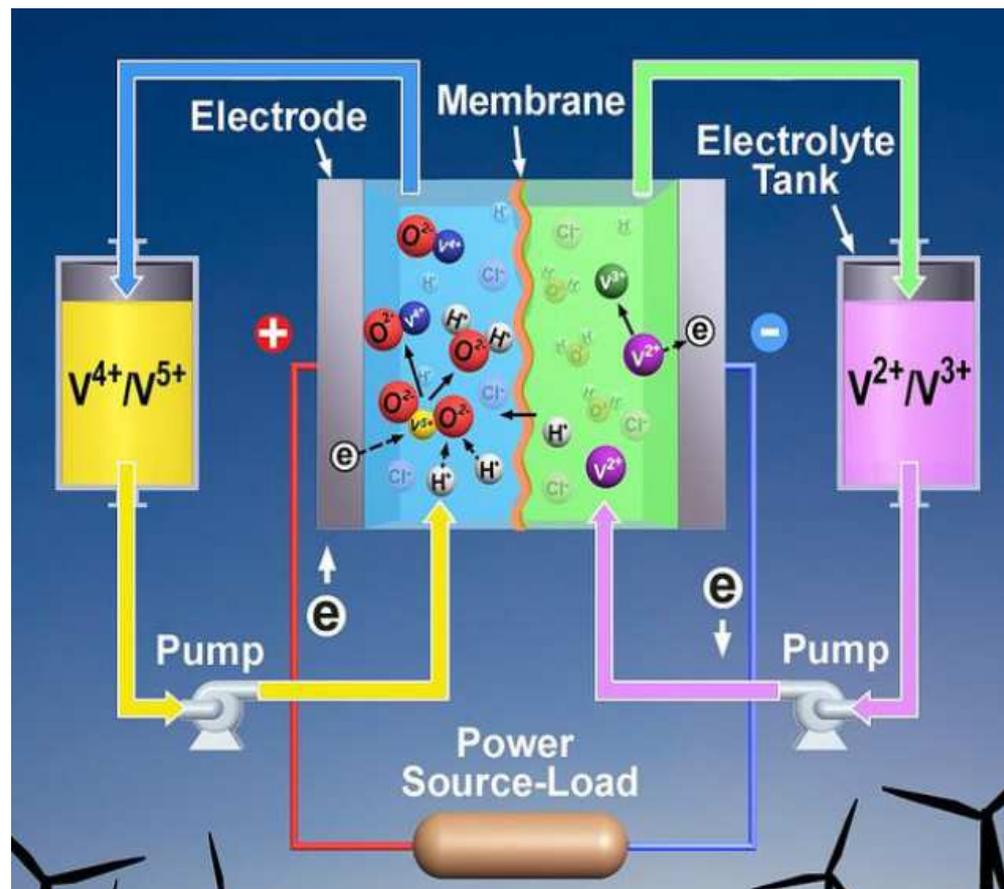
À titre de comparaison, les estimations de croissance de différents analystes vont de 5 % à 10,9 % de TMCA :

- 5 à 8 % pour [11].
- 7,8 % pour [13].
- 8,1 % pour [8] en ce qui concerne la demande conventionnelle, incluant la demande du secteur de l'acier croissant à 8 %, la demande de la chimie croissant à 4,5 %, et la demande du titane croissant à 10 %.
- 10,9 % pour [3].

Une composante supplémentaire de la demande est susceptible de croître rapidement : il s'agit du secteur des **batteries d'accumulateurs**, au sein duquel il convient de distinguer deux nouvelles applications :

1. Les batteries pour stockage d'électricité sur le réseau, sujet qui prend de plus en plus d'importance au fur et à mesure que se développent des sources d'énergie renouvelables mais intermittentes comme l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne ; les batteries « vanadium redox » en développement utilisent le vanadium à différents degrés d'oxydation (2, 3, 4, 5) et les échanges d'électrons entre ces états pour stocker et produire de l'électricité.

Figure 12 : Principe de fonctionnement de la batterie Vanadium-redox (source : [8])



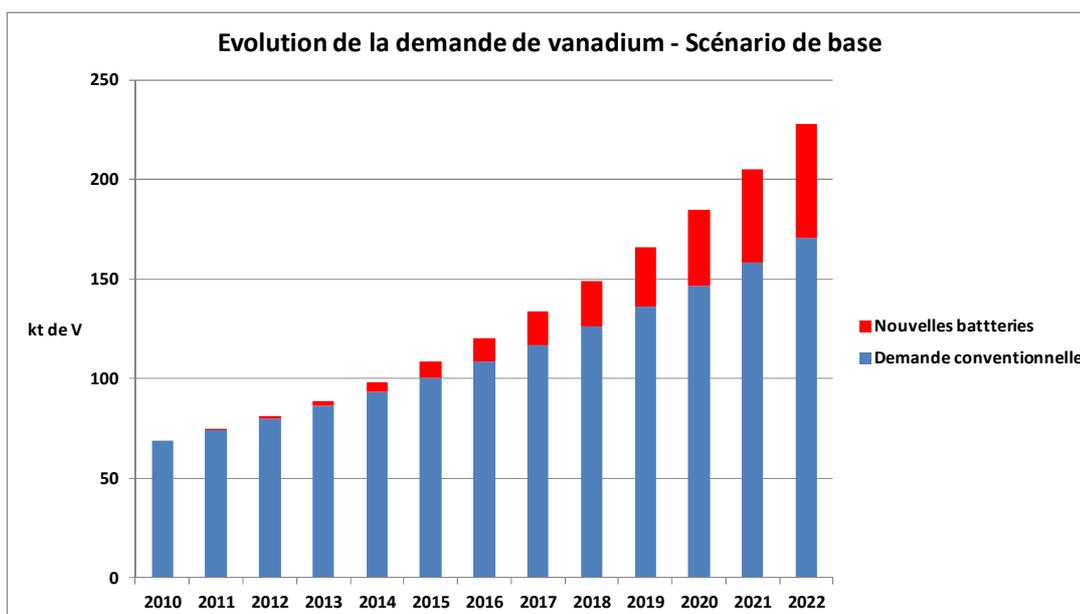
American Vanadium [8] pense que la quantité de vanadium qui serait consommée par les batteries redox pour les secteurs photovoltaïque et éolien pourrait représenter 30 kt de vanadium en 2015 et 68 kt en 2022 (soit une capacité de stockage de 17 MWh, la quantité de vanadium de haute pureté nécessaire étant de l'ordre de 4 kg pour 1 kWh de capacité de stockage).

2. Les batteries au lithium pour véhicules électriques : les batteries lithium au vanadium sont plus sûres et plus efficaces que les batteries lithium au cobalt.

Ocean Equities [11] voit ces deux applications atteindre jusqu'à 20 kt de vanadium dès 2015. Le rythme réel de développement de ces applications reste très incertain.

Dans nos scénarios nous distinguerons la demande « conventionnelle » : acier, catalyseurs, alliages mères, etc., et la demande pour les nouvelles batteries. Nous adoptons une attitude optimiste sur le développement de ces batteries, mais plus prudente que les analystes cités quant à leur vitesse de démarrage (notre hypothèse est de 8 kt de vanadium en 2015). La demande de vanadium serait multipliée par 3 entre 2011 et 2022, pour approcher les 230 kt en 2022.

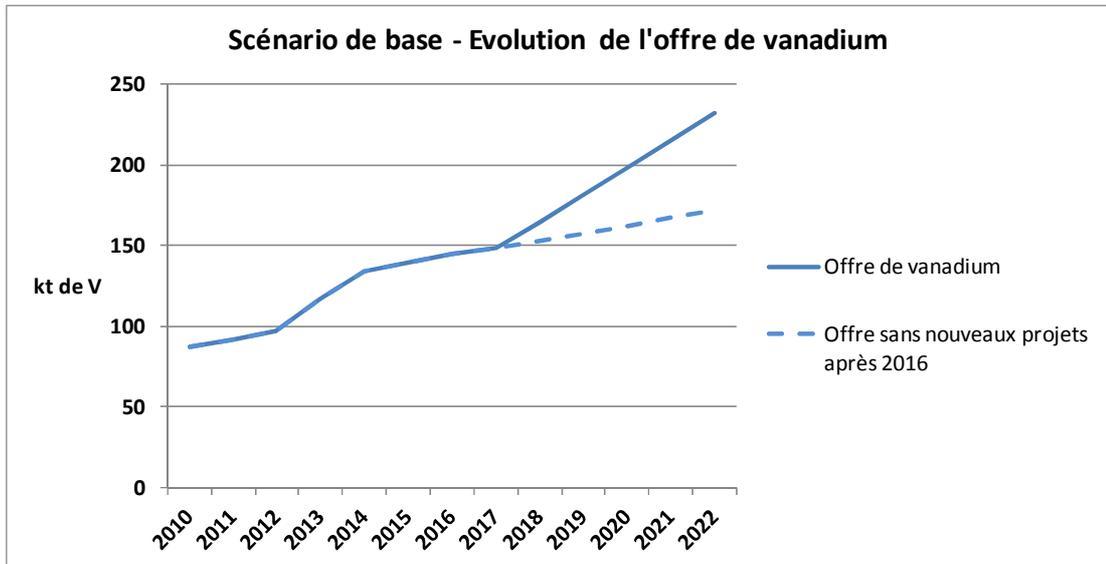
Figure 13 : Scénario de base : Évolution de la demande



5.2 Scénario d'évolution de l'offre

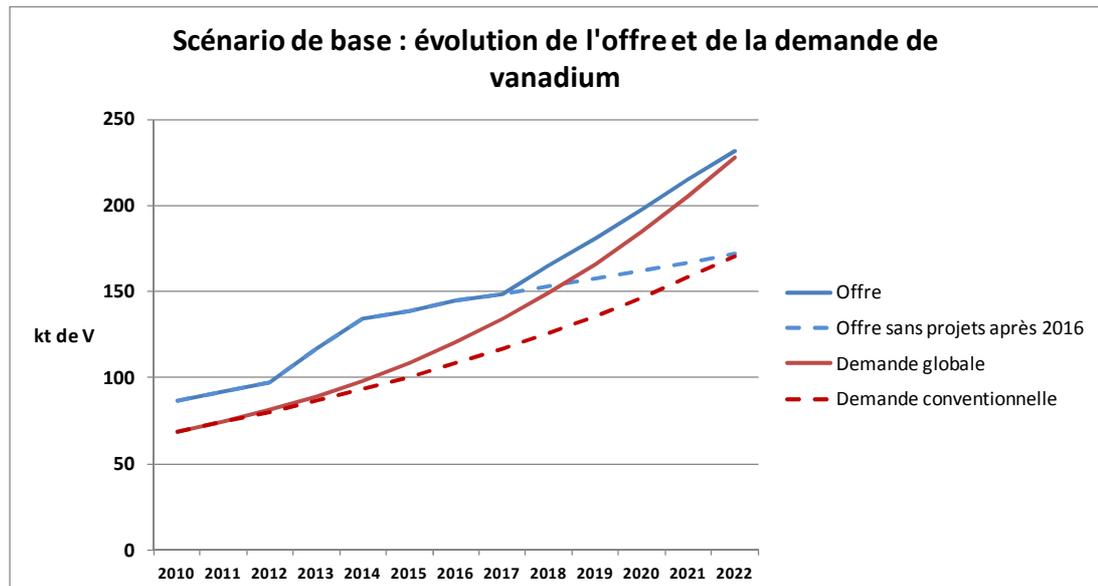
Notre scénario de base suppose que le volume de vanadium en provenance des laitiers d'aciérie, de résidus pétroliers, etc., croîtrait régulièrement en fonction de la croissance de ces secteurs ; nous prenons également en compte d'ici 2016 les projets vanadium les plus proches du démarrage, listés ci-dessus (§ 3.2), mais en étalant leur montée en puissance un peu plus que les annonces officielles. Puis, compte tenu de l'état d'avancement des autres projets, et de la situation de surcapacité résultant des évolutions de l'offre et de la demande dans ce scénario, nous faisons l'hypothèse que de nouveaux projets ne démarreraient pas avant 2018. À partir de 2018, l'excédent d'offre s'étant réduit progressivement, les nouveaux projets pourraient entrer progressivement sur le marché, à un rythme régulier (nous introduisons l'hypothèse de 12 kt de nouvelles capacités par an).

Figure 14 : Scénario de base : évolution de l'offre



5.3 Évolution du bilan offre-demande

Figure 15 : Scénario de base : évolution du bilan offre-demande de vanadium



5.4 Analyse du scénario de base et jeu des acteurs

On voit que le rythme de développement de la demande pour les nouvelles batteries sera un élément essentiel du marché du vanadium dans les années futures.

- Si la demande pour les nouvelles batteries n'était pas au rendez-vous, et dans le pire des cas si d'autres technologies sans vanadium étaient choisies, les projets actuellement proches de la réalisation créeraient une situation de surcapacité durable, jusque vers 2020-2022, et de nouveaux projets ne seraient pas

nécessaires avant ces années ; les prix du vanadium s'établiraient à des niveaux relativement faibles, ce qui d'une part pourrait favoriser le remplacement du niobium par le vanadium dans certains aciers, d'autre part découragerait la plupart des nouveaux entrants potentiels.

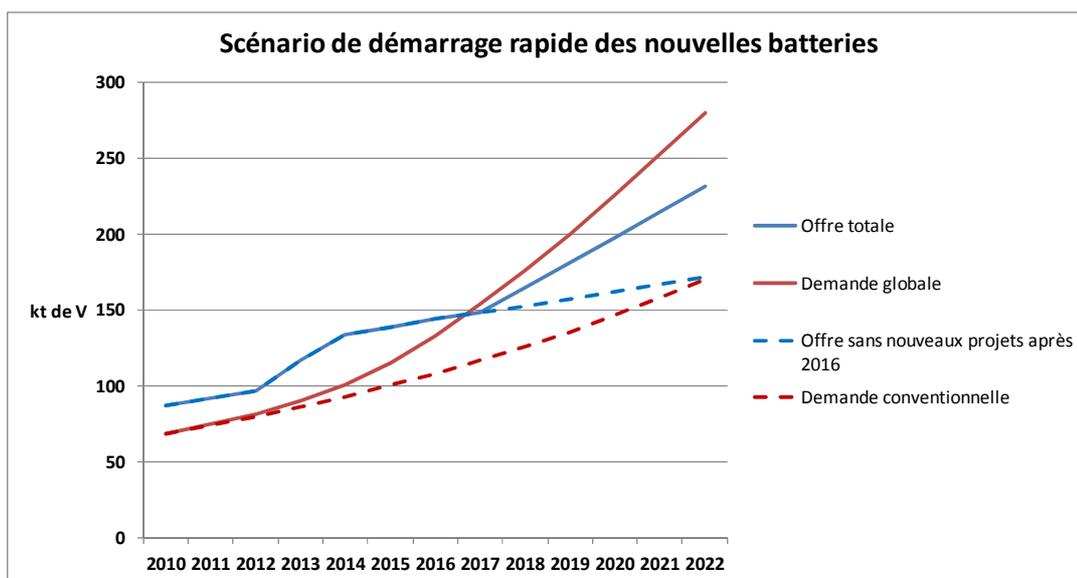
- Si par contre les nouvelles batteries prenaient leur essor, la situation du marché deviendrait très tendue à partir de 2018 ; les prix augmenteraient en anticipation de cette situation, permettant aux nouveaux projets nécessaires de voir le jour à un rythme important à partir de 2018.

On remarque que la surcapacité atteindrait un pic en 2014, en raison de la concentration de projets annoncés comme proches du démarrage, et du fait que les volumes pour les nouvelles batteries ne deviennent significatifs que plus tard. Cette situation entraînerait une baisse prononcée des prix sur les 2-3 années à venir. Il est vraisemblable que les acteurs reporteront certains projets pour lisser cet excès d'offre, à ceci près qu'on ne peut pas exclure la poursuite des projets en Chine, le vanadium étant classé comme stratégique par le gouvernement chinois.

5.5 Étude d'un démarrage rapide du marché des nouvelles batteries :

Nous avons retenu dans le scénario de base une approche plus prudente que certains analystes sur le développement des nouvelles batteries. Si le démarrage à grande échelle de ces technologies se révélait plus rapide : 15 kt de V en 2015, 50 kt en 2018, 80 kt en 2020, le marché serait en déficit d'offre dès 2016-2017, et il faudrait de nouveaux projets arrivant plus tôt et à un rythme plus élevé, ce qui risque d'être difficile à réaliser. Les prix du vanadium s'envoleraient.

Figure 16 : Scénario de démarrage rapide des nouvelles batteries – Évolution du bilan offre-demande



5.6 Pistes pour anticiper les risques de pénurie / tension sur les prix

Un développement rapide du secteur des batteries incorporant du vanadium pour le stockage de masse de l'électricité sur le réseau ou pour les batteries lithium des véhicules électriques pourrait créer un déficit sur le marché le temps que de nouveaux projets d'extraction du vanadium se mettent en place.

L'industrie aéronautique serait vulnérable à une telle situation, en raison de l'importance croissante des alliages de titane associé au vanadium dans ce secteur. La France et l'Europe ne contrôlent pas de ressources en vanadium.

Compte tenu du faible volume que représente la demande de vanadium pour l'aéronautique dans la demande totale, l'aéronautique pourrait être amenée à payer des primes élevées pour assurer son approvisionnement.

La constitution de stocks en cas de menace de pénurie est utile, mais ne peut être qu'une mesure à portée provisoire.

Pour réduire cette vulnérabilité, on peut envisager la conclusion d'accords d'approvisionnement avec l'amont de la filière, et l'association d'acteurs européens aux projets de nouvelles capacités de production, avec contrat d'enlèvement d'une part de la production.

Par ailleurs, il serait souhaitable de surveiller l'évolution des acteurs détenant le savoir-faire de la production d'oxyde pur et d'alliages mères pour s'assurer que les compétences et capacités de production sur le sol européen restent suffisantes.

-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-0-

Bibliographie

Annexe 1 : Schéma de principe de la chaîne de valeur du vanadium

Bibliographie

- [1] « Vanadium », 2010 Minerals Yearbook, USGS, November 2011. Accessible en ligne : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/vanadium/myb1-2010-vanad.pdf>
- [2] « Vanadium », USGS Mineral Commodity Summaries, January 2012. Accessible en ligne : <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/vanadium/mcs-2012-vanad.pdf>
- [3] Rocco, V., « Vanadium... Not So “Minor” for Titanium », presentation au 5th Annual TZMI “Asia in focus” Congress, November 2011
- [4] « Le marché du titane métal : veille et enjeux », P.F. Louvigné, étude réalisée pour le Ministère de l’Écologie, de l’Énergie, du Développement durable et de la mer, convention n° 2008-0005477, novembre 2010
- [5] « La Métallurgie en France – Une nécessité d’innovation », Étude stratégique réalisée par Nodal Consultants pour le compte de la DGE, rapport final, juin 2005
- [6] « Titanium – The Ultimate Choice », International Titanium Association (Août 2007) www.titanium.org
- [7] « Marchés et applications du Titane – Marché mondial : analyse et perspectives », Association Française du Titane, <http://www.titane.asso.fr/marche-du-titane.html>
- [8] Radvak, B., « The Critical Element », American Vanadium corporate presentation, June 1, 2012
- [9] « World Mineral production 2006-2010 », British Geological Survey, 2012
- [10] « Windimurra Project and Forecast Update », Atlantic Ltd., 30 May 2012
- [11] « Vanadium Sector Review », Ocean Equities, 15th July 2011
- [12] Holland, M., « Aerospace Industry Dynamics – Implications for the Titanium Market », Titanium 2011, October 2-3, 2011
- [13] Burgess, L., « Investing in Vanadium », Investment U Research, February 14, 2012
- [14] Timet, Annual Report 2011

ANNEXE 1

SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA CHAÎNE DE VALEUR DU VANADIUM

Image Via www.VanadiumSite.com

Process Flow Sheet For Vanadium Products

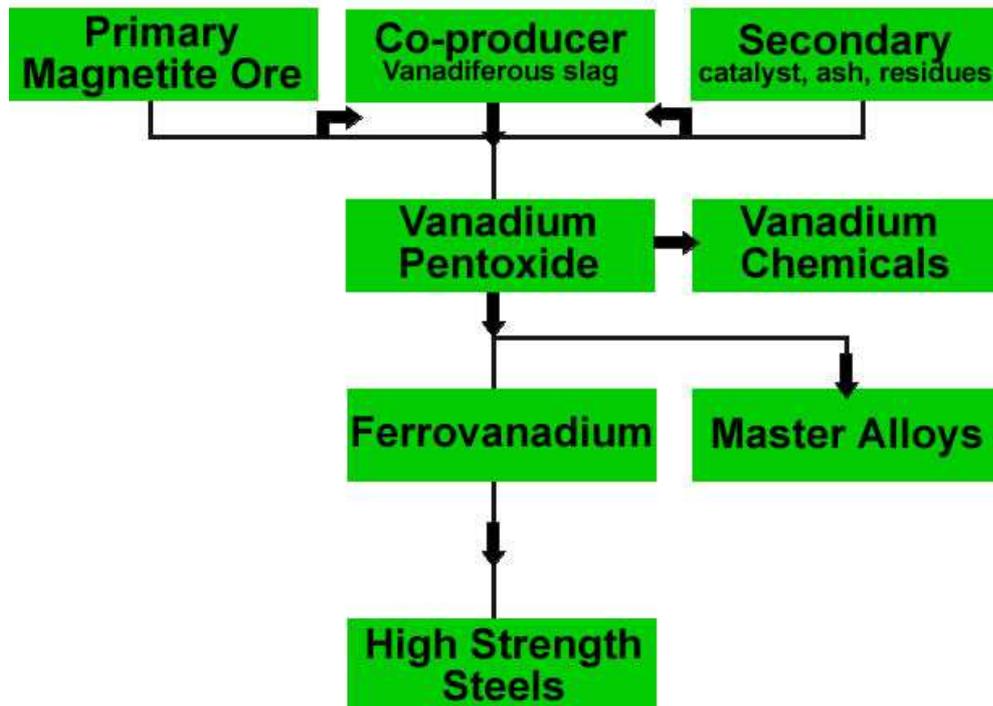


TABLE DES FIGURES

NÉODYME ET DYSPROSIUM

Figure 1 : Composition des deux principaux minerais chinois de terres rares.....	18
Figure 2 : Résumé de la chaîne de valeur simplifiée de la production d'aimants frittés Néodyme-Fer-Bore (NdFeB)	20
Figure 3 : Terres rares utilisées pour chaque domaine d'application, en pourcentage [7]	23
Figure 4 : Décomposition de la consommation mondiale de terres rares 2010 [9]	23
Figure 5 : Demande 2011 par secteur (source : [18]).....	24
Figure 6 : Parts des différents secteurs d'application des aimants NdFeB et teneur en dysprosium [17]	25
Figure 7 : Utilisations des terres rares dans un véhicule automobile (source : [13]).....	25
Figure 8 : Utilisation d'aimants à bord d'une automobile (source : Renault)	26
Figure 9 : Utilisation d'aimants à bord d'une automobile (source : site du fabricant d'aimants Arnold Magnetic Technologies http://www.arnoldmagnetics.com).....	27
Figure 10 : Estimation des productions chinoises par province (source : Innovation Metals Corp : www.innovationmetals.com).....	28
Figure 11 : Production minière 2006-2010 d'oxydes de terres rares (données BGS [4]).....	29
Figure 12 : Production minière 2010-2011 d'oxydes de terres rares et réserves (données USGS [3]).	29
Figure 13 : Programme de production de Molycorp (source : site www.molycorp.com)	31
Figure 14 : Volumes comparés des différents types d'aimants permanents, à champ magnétique identique (source : [17]).....	32
Figure 15 : Évolution 2003-2011 des quotas globaux d'exportation chinois (source : http://www.frontierrareearths.com/industry-data/china)	33
Figure 16 : Prix des oxydes de terres rares exportés de Chine (prix FOB Chine en \$/kg, moyenne pour la période considérée ; information www.lynascorp.com).....	34
Figure 17 : Prix des oxydes de terres rares sur le marché domestique chinois (\$/kg information www.lynascorp.com).....	34
Figure 18 : Réserves estimées par l'USGS [3].....	35
Figure 19 : 10 projets miniers hors Chine avec les capacités annuelles visées [5]	36

Figure 20 : Répartition des terres rares dans les ressources du projet Kvanefjeld (source : site de la société, www.ggg.gl)	38
Figure 21 : Pourcentage de terres rares lourdes dans le total des terres rares pour 16 projets (source [11])	39
Figure 22 : Consommation 2010 d'oxydes de néodyme et de dysprosium par secteur d'application, en tonnes (approximatif, calculé à partir des figures 2 et 3)	41
Figure 23 : Scénarios d'évolution de la demande mondiale en oxyde de néodyme	43
Figure 24 : Scénarios d'évolution de la demande mondiale en oxyde de dysprosium	44
Figure 25 : Projets miniers identifiés par capacité et date de démarrage	45
Figure 26 : Scénario d'évolution de l'offre d'oxyde de néodyme hors Chine	46
Figure 27 : Scénario d'évolution de l'offre d'oxyde de dysprosium hors Chine	46
Figure 28 : Scénarios d'évolution du bilan offre-demande pour l'oxyde de néodyme.....	47
Figure 29 : Évolution de l'excédent d'offre d'oxyde de néodyme, en pourcentage de la demande	48
Figure 30 : Scénarios d'évolution du bilan offre-demande pour l'oxyde de dysprosium	48
Figure 31 : Évolution de l'excédent d'offre d'oxyde de dysprosium, en pourcentage de la demande	49
Figure 32 : Étude du US Department of Energy [21] : évolution de l'offre et de la demande d'oxyde de dysprosium	50
PLATINE	
Figure 1 : Répartition de la demande mondiale par secteurs (source : [1])	57
Figure 2 : Décomposition de la demande de platine en 2011 par région et par secteur industriel ([1])	58
Figure 3 : Platine utilisé par véhicule selon la zone de production, année 2010 (calcul à partir des sources [1] et [11])	59
Figure 4 : Le principe du pot catalytique « 3 voies » (source : [10])	59
Figure 5 : Masse de platinoïdes par pot catalytique [19]	60
Figure 6 : Production minière par pays [3].....	61
Figure 7 : Ventes des producteurs primaires par pays [1]	61
Figure 8 : Recyclage du platine [1]	62
Figure 9 : Bilan offre-demande de platine, 2010 et 2011 (d'après [1]).....	63

Figure 10 : Quantités comparées de platine et de palladium utilisées pour la catalyse automobile, par région, en 2010 (calcul à partir de [1] et [11])	64
Figure 11 : Quantités comparées de platine et de palladium utilisées pour la catalyse automobile, par région, en 2007(calcul à partir de [1] et [11])	65
Figure 12 : Évolution du cours du platine du 4 janvier 2002 au 1er juin 2012 (source : site infomine.com)	66
Figure 13 : Évolution comparée des cours du platine (échelle de gauche) et du palladium (échelle de droite) (source : site infomine.com).....	66
Figure 14 : Situation des districts miniers et gisements [5] (PGE = Éléments du groupe du platine) ...	67
Figure 15 : Liste de projets miniers pour les platinoïdes avec leurs caractéristiques principales	69
Figure 16 : Croissance de la part de la motorisation Diesel dans le parc automobile en Europe ([11])	71
Figure 17 : Scénario d'évolution de la demande globale en platine	72
Figure 18 : Demande d'or en 2011 : répartition en volume [21]	73
Figure 19 : Scénario d'évolution de l'offre primaire de platine	73
Figure 20 : Scénario d'évolution de l'offre de platine	74
Figure 21 : Bilan offre-demande de platine 2011-2022	75
Figure 22 : Variante demande faible	77
Figure 23 : Variante problèmes graves de production.....	78
 PALLADIUM	
Figure 1 : Répartition de la demande mondiale de palladium par secteur, et évolution 2007-2011 (source : [1])	85
Figure 2 : Demande 2011, par secteur et zone géographique [1].....	85
Figure 3 : Comparaison de la structure de la demande 2011 pour le palladium et le platine (d'après [1])	86
Figure 4 : Comparaison de l'emploi du platine (Pt) et du palladium (Pd) dans la catalyse automobile, 2010 (calculé à partir de [1] et [2]).....	87
Figure 5 : Comparaison de l'emploi du platine (Pt) et du palladium (Pd) dans la catalyse automobile, 2007 (calculé à partir de [1] et [2]).....	87
Figure 6 : Production minière et ventes du stock russe ([1], [3], [4])	89
Figure 7 : Répartition géographique de la production minière [3]	89

Figure 8 : Production de platine et de palladium des principaux producteurs en 2011 (source : rapports annuels)	90
Figure 9 : Volume du recyclage de palladium (selon [1])	90
Figure 10 : Bilan offre-demande de palladium, 2007-2010-2011	91
Figure 11 : Évolution du cours du palladium du 4 janvier 2002 au 4 juin 2012	92
Figure 12 : Évolution comparée des cours du platine (échelle de gauche) et du palladium (échelle de droite).....	93
Figure 13 : Situation des districts miniers et gisements [5] (PGE = éléments du groupe du platine) ...	93
Figure 14 : Réserves et ressources publiées par les principaux producteurs	94
Figure 15 : Liste de projets miniers pour les platinoïdes avec leurs caractéristiques principales	95
Figure 16 : Scénario d'évolution de la demande globale en palladium	98
Figure 17 : Scénario d'évolution de l'offre primaire de palladium	99
Figure 18 : Scénario de base : évolution de l'offre totale de palladium	99
Figure 19 : Bilan offre-demande de palladium 2010-2022	100
Figure 20 : Projections de déficit pour le platine et le palladium (source : [9]).....	101
Figure 21 :Évolution du bilan offre-demande dans la variante « demande faible ».....	102
LITHIUM	
Figure 1 : Principaux dérivés du lithium et applications (source : site internet de Rockwood Lithium)	107
Figure 2 : Chaîne de valeur du lithium et de ses dérivés [10]	108
Figure 3 : Estimation de la consommation finale par application, année 2011 (sources : Roskill [3] et SQL [9]).....	109
Figure 4 : Principe d'une batterie lithium-ion (source SAFT [5]).....	111
Figure 5 : Batteries Li-ion : contenu en carbonate par type d'utilisation, et évolution du nombre de batteries vendues (source : [13])	112
Figure 6 : Carbonate qualité batteries et carbonate technique de Rockwood Lithium.....	113
Figure 7 : Nomenclature des voitures hybrides et électriques (source : INERIS [4])	114
Figure 8 : Fonctionnalités selon le type de véhicule hybride ([4])	115
Figure 9 : Puissance spécifique et énergie spécifique de différents types de batteries [5].....	115

Figure 10 : Comparaison des technologies de batteries pour véhicules électriques [7]	117
Figure 11 : Évolution des propriétés des alliages aluminium-cuivre-lithium en fonction des concentrations en lithium et cuivre ([6]).....	118
Figure 12 : Évolution de la composition des alliages Al-Cu-Li ([6])	118
Figure 13 : Gains de masse de pièces en alliages d'aluminium grâce aux nouveaux alliages Al-Cu-Li ([6])	119
Figure 14 : Utilisation de l'alliage AIRWARE® 2198 pour le fuselage ([6])	119
Figure 15 : Utilisations de l'alliage AIRWARE® 2050([6])	120
Figure 16 : Évolution de la part respective des différents matériaux composant la structure des avions commerciaux (source [17])	120
Figure 17 : Répartition par pays de la production 2010, 2011 et des réserves (sources [1] et [8])....	122
Figure 18 : Vision du marché 2011 présentée par SQM [9] (tonnes d'équivalent carbonate de lithium ; 136 500 t correspondent à environ 25 500 t de Li métal contenu)	123
Figure 19 : Vision du marché 2011 présentée par Talison Lithium	124
Figure 20 : Recyclage des métaux des batteries lithium-ion (source : www.recupyl.com)	126
Figure 21 : Évolution des prix du carbonate technique, 2000-2011 (source [3]).....	127
Figure 22 : Augmentation des prix de vente de Talison depuis 2008 (FY = année fiscale, du 1er juillet N-1 au 30 juin N) [11]	128
Figure 23 : Principaux fabricants de batteries Li-ion pour véhicules hybrides et électriques (source : [12])	129
Figure 24 : Estimation des ressources mondiales de lithium [1].....	130
Figure 25 : Projets d'exploitation de lithium (source : sites internet des sociétés concernées)	132
Figure 26 : Scénarios d'évolution de la demande en lithium : scénario de base, variante haute, variante basse.....	135
Figure 27 : Évolution de la répartition par secteur de demande entre 2011 et 2022	135
Figure 28 : Comparaison de nos scénarios avec d'autres sources	137
Figure 29 : Scénario d'évolution de l'offre primaire de lithium	138
Figure 30 : Bilan offre-demande du lithium sur la période 2011-2022.....	139
Figure 31 : Scénarios de prix du carbonate pour batteries, FOB Chili, utilisés par Lithium One dans l'estimation économique préliminaire du projet Sal de Vida [23]	140

CHROME

Figure 1 : Flux des produits à base de chrome en 2010 (source [4])	148
Figure 2 : Chaîne de production des produits chimiques à base de chrome (source [3]).....	149
Figure 3 : Répartition des utilisations du chrome métal (source : [3]).....	151
Figure 4 : Utilisation de différents alliages dans un moteur civil (document Rolls-Royce [5])	152
Figure 5 : Proportion de chrome dans les moteurs aéronautiques (source [3]).....	152
Figure 6 : Chaîne simplifiée des étapes de production, depuis le minerai jusqu'à l'avion	153
Figure 7 : Pays producteurs de minerais et de concentrés de chrome.....	154
Figure 8 : Production mondiale en kt d'équivalent de minerai commercialisable de chromite (source [2])	154
Figure 9 : Production mondiale 2010 de chromite, telle que présentée par Cliffs Natural Resources (source [6])	156
Figure 10 : Prix du concentré sud-africain, départ vers le marché chinois (source : www.metal-pages.com)	159
Figure 11 : Évolution des prix du ferrochrome de début 2006 à août 2012 en \$/kg (source : www.infomine.com).....	159
Figure 12 : Prix du chrome métal aluminothermique, minimum 99 %, marché Union européenne (source : www.metal-pages.com)	160
Figure 13 : Projection de l'évolution de la production d'aéronefs 2011-2021 (source : [10]).....	162
Figure 14 : Projection de l'évolution de la production de moteurs aéronautiques sur 2011-2021, incluant les remplacements (source : [10]).....	163
MOLYBDÈNE	
Figure 1 : Schéma de la chaîne de production du molybdène (source : [3]).....	169
Figure 2 : Formes d'utilisation du molybdène primaire 2010 (source : site Internet de l'IMOA)	170
Figure 3 : Les secteurs industriels utilisateurs de molybdène (source : [5])	171
Figure 4 : Répartition géographique de la consommation de molybdène primaire et évolution 2006-2010 (source : site Internet IMOA ; chiffres en millions de lbs).....	173
Figure 5 : Utilisations du molybdène à bord de l'Airbus A380 [7]	173
Figure 6 : Répartition de la production minière 2009-2011 ([1], [2]), tonnes de molybdène dans les concentrés	174
Figure 7 : Évolution du prix de l'oxyde de molybdène de 2002 à début 2012 [8]	177

Figure 8 : Cotation LME du molybdène de février 2010 au 27 juin 2012 (cash Buyer).....	177
Figure 9 : Élaborateurs et transformateurs d'alliages spéciaux (source : [15])	179
Figure 10 : Liste de projets miniers molybdène ou cuivre-molybdène 2009 [3]	181
Figure 11 : Scénarios d'évolution de la demande mondiale de molybdène	184
Figure 12 : Scénario de croissance de la capacité de production minière	185
Figure 13 : Évolution de l'excédent de l'offre en fonction du scénario de croissance.....	185
Figure 14 : Excédent de l'offre minière en pourcentage de la demande globale de molybdène neuf	186
NIOBIUM ET FERRONIOBIUM	
Figure 1 : Formes d'utilisation du niobium, évolution 2004-2010 (source : [2])	195
Figure 2 : Grands domaines d'utilisation finale du Niobium (source : [2])	197
Figure 3 : Formes et usages du Niobium (source : [3])	197
Figure 4 : Utilisations du ferroniobium par secteur industriel (source : [13])	198
Figure 5 : Utilisation de différents alliages dans un moteur civil (document Rolls-Royce [14])	200
Figure 6 : Évolution de la production primaire de Niobium (Nb contenu dans les concentrés) sur les 20 dernières années (1992-2011) - données USGS.....	201
Figure 7 : Statistiques de production primaire du niobium (Nb contenu dans les concentrés) selon BGS et UGS	201
Figure 8 : Élaborateurs et transformateurs d'alliages spéciaux (source : [15])	206
Figure 9 : Réserves prouvées et probables selon [13]	207
Figure 10 : Projets miniers niobium (2011).....	208
Figure 11 : Évolutions comparées des consommations mondiales d'acier et de ferroniobium [13]..	210
Figure 12 : Scénario 1 – Scénario de base : projets annoncés. Évolution du bilan offre-demande et de l'excédent/déficit du marché	211
Figure 13 : Scénario 1bis – Scénario avec nouveaux projets miniers à partir de 2019. Évolution du bilan offre-demande et de l'excédent de production.....	213
Figure 14 : Bilan offre-demande dans le cas de taux de croissance annuels plus faibles (scénario 2 : 8 %) ou plus forts (scénario 3 : 10 %)	215
Figure 15 : Scénario 4 – Recyclage accru. Évolution du bilan offre-demande et de la surcapacité avec un taux de recyclage s'accroissant progressivement.....	216

VANADIUM

Figure 1 : Intensité d'usage du vanadium dans les aciers (tiré de [8]).....	227
Figure 2 : Décomposition de la consommation déclarée aux USA en 2010 [1]	228
Figure 3 : Répartition géographique de la demande 2010 [3]	229
Figure 4 : Estimation de la consommation mondiale de titane par secteur ([4]).....	229
Figure 5 : Évolution de la consommation de titane par secteur industriel ([14]).....	229
Figure 6 : Graphique extrait de [6] : pourcentage de titane dans le poids à vide des appareils, selon la génération	230
Figure 7 : Comparaison des chiffres de production 2010 USGS [1] et BGS [9]	231
Figure 8 : Capacité et production, selon la ressource en vanadium ; calcul à partir de [3]	232
Figure 9 : Sociétés actives dans la production de dérivés du vanadium.....	234
Figure 10 : Évolution du prix du ferrovanadium depuis fin 2005 (source : site www.infomine.com)	236
Figure 11 : Carte des projets miniers (source : [11]).....	237
Figure 12 : Principe de fonctionnement de la batterie Vanadium-redox (source : [8]).....	240
Figure 13 : Scénario de base : Évolution de la demande	241
Figure 14 : Scénario de base : évolution de l'offre.....	242
Figure 15 : Scénario de base : évolution du bilan offre-demande de vanadium	242
Figure 16 : Scénario de démarrage rapide des nouvelles batteries – Évolution du bilan offre-demande	243

La France, comme la plupart des pays de l'Union européenne, apparaît comme relativement dépendante de l'extérieur pour ses approvisionnements en métaux stratégiques. Ces métaux, souvent utilisés en faibles quantités, s'avèrent indispensables pour assurer les performances techniques et économiques d'activités industrielles de pointe.

Les filières qui utilisent dans leur processus de production industrielle de tels métaux doivent donc pouvoir mesurer avec précision leur degré de dépendance économique et géostratégique à l'égard de ces ressources, afin de prévenir au mieux les risques qui pourraient les affecter et préserver ainsi les conditions de leur compétitivité.

Conscients d'un tel enjeu, le ministère du Redressement productif (DGCIS), et celui la Défense (DGA - DAS) ont lancé, dans le cadre du Pipame, cette étude dont la réalisation a été confiée au cabinet Sofred Consultants.

Pour un ensemble de métaux stratégiques identifiés, l'étude examine l'impact économique que peuvent avoir de telles ressources sur deux filières majeures de notre industrie : l'automobile et l'aéronautique.

En particulier, l'étude procède à une analyse prospective consistant à anticiper, sur la base de différents scénarios, les évolutions possibles du marché de ces métaux selon un horizon de dix ans. Les facteurs susceptibles d'influer l'offre et la demande de ces matériaux sont respectivement analysés. Le rapprochement des trajectoires envisageables d'offre et de demande permet d'identifier les événements ou les évolutions critiques, susceptibles de peser sur l'accès à ces ressources à l'horizon considéré. Pour chaque métal étudié, l'étude propose certaines pistes pour anticiper et limiter l'impact de réalisation des risques d'approvisionnement ainsi identifiés.