

L'ÉPUISEMENT DES MÉTAUX ET MINÉRAUX : FAUT-IL S'INQUIÉTER ?

Juin 2017

Référent : GELDRON Alain
Direction Économie circulaire et déchets - ADEME - Angers

Ce qu'il faut retenir

Face aux impacts de la consommation croissante, le possible épuisement des minéraux et métaux constitue un élément fréquent, parmi d'autres, pour insister sur la nécessité de produire plus avec moins. La réponse à cette question de disponibilité est moins évidente qu'il n'y paraît.

Notre connaissance des gisements minéraux reste limitée à une partie superficielle de la croûte terrestre. La notion de réserves ne correspond qu'à un horizon technico-économique et temporel des acteurs miniers. Nul ne sait dire avec une certaine fiabilité quels sont les ressources ultimes dans la partie supérieure de la croûte terrestre.

Cependant les nouveaux gisements seront plus difficiles à trouver, nécessiteront plus d'investissement, leur exploitation nécessitera plus d'énergie et ils laisseront plus de résidus pour une même tonne de métal produite. La croissance exponentielle de la demande risque d'être supérieure au rythme de la croissance des capacités d'exploitation. En conséquence des pénuries sur certaines matières minérales pourraient survenir dans un avenir proche (10 ans). Dans une croissance continue de la demande à 2 ou 3% le recyclage ne pourra pas répondre à cet accroissement et restera à moins de 20% des approvisionnements nécessaires.

Par ailleurs les conséquences environnementales locales de l'exploitation de ces gisements en limiteront l'acceptabilité sociale si elles ne sont pas totalement maîtrisées.

En outre l'augmentation des consommations énergétiques de ce secteur risque de rentrer en confrontation avec la lutte contre le changement climatique. Ce n'est probablement pas l'épuisement des métaux et minéraux qui est à craindre mais très certainement la fin de l'extraction et de la disponibilité faciles.

TABLE DES MATIERES

Ce qu'il faut retenir	1
1. Introduction : Contexte & Enjeux.....	3
2. Réserves et ressources : quelques définitions pour bien comprendre	4
3. Une répartition mondiale des gisements guidée par la géologie	5
4. L'exploration minière une question de temps, d'argent et d'un peu de chance	6
4.2. Les investissements dans l'exploration et l'exploitation : au rythme des prix des matières premières	7
5. Une évolution de la demande qui guide l'offre	8
6. La « mine urbaine » ne pourra pas satisfaire la demande croissante	9
7. Allons-nous vers l'épuisement ou vers des pénuries ? Un sujet à controverses.....	10

8. Des horizons nouveaux d'exploration et d'exploitation peuvent-ils répondre aux besoins ?.....	13
9. L'extraction minière est aussi une question d'eau et surtout d'énergie	15
10. Conclusion.....	16
11. Pour en savoir plus.....	17
12. Bibliographie.....	17
13. ANNEXE : Terminologie des grandes familles de métaux.....	20

1. Introduction : Contexte & Enjeux

De nombreuses études internationales, analyses d'experts (comme le Groupe International d'experts sur les Ressources (GIER) - International Resources Panel (IRP)) ou de « think tank » ou de travaux académiques mettent l'accent sur la nécessité de produire plus avec moins face à la croissance de la consommation et à ses conséquences. Sur ces bases les instances internationales (Nations Unies, OCDE), transnationales (G7 ou G20) ou européennes développent des orientations et des politiques ayant pour objectif de promouvoir une gestion efficace des ressources.

L'économie circulaire, particulièrement développée en Europe et singulièrement en France constitue une démarche de mise en œuvre. Nous pouvons toutefois nous interroger sur les raisons de produire plus avec moins (MEEM, 2017). Outre les impacts environnementaux l'épuisement supposé proche des ressources minérales est souvent avancée.

En effet, les médias et de nombreux acteurs, se font l'écho d'une raréfaction des matières premières notamment métalliques à court terme voire d'une disparition dans quelques décennies : « L'argent en voie de disparition ... , le monde aura épuisé ses réserves en 2029 », « La fin du cuivre en 2050 » peut-on lire. Face à la croissance continue de la consommation de matières premières dans le monde et plus particulièrement au développement de la croissance chinoise ces quinze dernières années, les prix se sont envolés et le monde économique et politique s'est inquiété. Par ailleurs, l'extraction et la transformation de ces matières premières générant des impacts environnementaux importants, les spécialistes de l'environnement s'inquiètent des conséquences.

Ces questionnements ne sont pas nouveaux. Depuis la révolution industrielle de nombreux auteurs se sont interrogés sur la disponibilité des ressources naturelles pour faire face à l'accroissement de la demande. Mais la question de cette disponibilité est bien antérieure, Platon s'interrogeait déjà sur la taille idéale de la ville et implicitement prenait en compte la question des ressources nécessaires.

Si nous consommons, à l'échelle mondiale 7 Gt de matières premières (voir définition en 2.1) en 1900 et 50 Gt en 2000 (Krausmann, 2009), les dernières estimations nous amènent à 85 Gt actuellement et les projections tendanciennes à 183 Gt en 2050 (UNEP, 2016). L'évolution est très similaire pour les seuls minéraux métalliques et minéraux industriels. Ainsi de nombreux métaux de base, ont sur plusieurs décennies, une croissance annuelle moyenne de 3% comme pour le cuivre ou le fer (Labbé, 2014), mais les métaux de spécialité (voir annexe) ont une croissance annuelle bien supérieure pouvant dépasser 6% sur la dernière décennie.

Comme d'autres domaines de la société, la transition énergétique et écologique fait appel à des matières premières minérales de manière importante. La disponibilité de ces matières à un coût économique et environnemental satisfaisant est déterminante pour décider des bonnes options technologiques de cette transition voir de sa faisabilité suivant son rythme.

Alors allons-nous vers une disparition autour de la moitié de ce siècle ou dans plusieurs siècles ? Aurons-nous des pénuries ? La réponse n'est bien entendu pas aussi simple qu'il le semblerait dans certains propos et dépend de différents paramètres : physiques, techniques, sociaux, économiques et politiques.

Avertissement : La présente note ne porte que sur des matières premières minérales extraites pour elles-mêmes c'est-à-dire comme matière principale d'un gisement. Les granulats et pierres ornementales ne sont pas non plus considérées car de source locale et relevant d'un modèle technico-économique différent.

Sont notamment concernés dans la présente réflexion les grands métaux de base (fer, aluminium, nickel, cuivre, plomb, zinc, chrome, manganèse, etc.) mais aussi des métaux précieux (or, platine, etc.), des métaux de spécialité comme les Terres Rares (lanthane, cérium, néodyme, dysprosium, yttrium, etc.), le tungstène ou encore l'uranium. Il en va de même pour des minéraux industriels (fluorine, andalousite, kaolin, oxyde de titane...). Certaines des analyses de ce document s'appliquent aussi aux hydrocarbures fossiles.

Leur disponibilité ne dépend pas de l'extraction d'autres métaux dont elles seraient le coproduit ou le sous-produit. Pour ces derniers des facteurs complémentaires interviennent qui ne sont pas traités ici. Les différentes terminologies de familles de métaux sont précisées en annexe.

2. Réserves et ressources : quelques définitions pour bien comprendre

2.1. De l'usage du terme de ressource

Dans le domaine de l'activité minière les notions de réserve et de ressources sont déterminantes pour comprendre la situation. Tout d'abord le terme de ressource est utilisé, hors domaine minier, dans un sens beaucoup plus large pour intégrer l'ensemble des ressources naturelles dont nous disposons et que nous exploitons. C'est notamment le cas dans les documents des institutions internationales. Si elle diffère suivant les auteurs la notion de ressources recouvre le plus généralement les composantes suivantes :

- L'eau
- Le sol (substrat de culture et espace)
- Les matières premières

Auxquelles est souvent adjoint l'air et parfois la biodiversité, le vent et le soleil.

Les matières premières sont elles-mêmes le plus souvent réparties en quatre familles :

- La biomasse
- Les matières premières de construction (hors celles provenant de la biomasse)
- Les hydrocarbures fossiles
- Les minerais métalliques et minéraux industriels

Pour les professionnels du secteur minier le terme technique de ressources a une signification particulière développée au paragraphe suivant.

2.2. Ressources et réserves : deux notions à distinguer

Les gisements sont des concentrations naturelles de minéraux supérieures à la concentration moyenne des roches, à un niveau de concentration permettant d'en envisager l'exploitation (cf. §3). Pour un même élément leurs forme, concentration, nature de la minéralisation, taille et genèse peuvent être très variées. Seuls certains peuvent faire l'objet d'une exploitation à un moment donné de notre histoire. Si certains sont connus un nombre indéterminé reste à découvrir.

Les ressources (minières) rassemblent l'ensemble des gisements connus susceptibles de faire l'objet d'une exploitation au moment où les conditions techniques et économiques le permettraient. Il s'agit d'un périmètre aux caractéristiques essentiellement géologiques.

Les réserves correspondent à la part des ressources qui peut techniquement et surtout économiquement être exploitée, au moment même où elles sont déclarées, en fonction d'un certain nombre de paramètres (volume global du gisement, teneur en métaux recherchés, profondeur, nature géologique, éléments sociaux-environnementaux et prix des matières premières considérées). Ce concept couple données géologiques et données économiques.

Le volume des réserves mondiales résulte pour chaque matière de la somme des réserves de chaque gisement. Les réserves évoluent en fonction de l'exploitation de chaque gisement, de leur connaissance, des difficultés technologiques rencontrées et de la valeur des matières contenues en fonction du prix de marché.

Les ressources peuvent être plusieurs fois plus élevées que les réserves.

Cette différenciation est complétée par un degré de certitude plus ou moins élevé et conduit à des ressources supposées, indiquées ou mesurées et à des réserves probables ou prouvées suivant l'intensité de l'exploration des gisements identifiés.

Chaque pays minier à son standard mais deux organismes internationaux¹ ont défini des standards pour clarifier et normaliser le rapportage des compagnies minières. L'évaluation et la mesure des ressources et réserves d'un gisement donné est une tâche coûteuse généralement réalisée par une société minière. Les ressources et réserves ne peuvent être consolidées au niveau d'un pays ou au niveau mondial de manière précise et fiable que si les sociétés minières les publient d'une manière précise et fiable. C'est le cas en particulier des sociétés occidentales cotées en bourse. Mais les sociétés occidentales totalement privées ("private equity") publient rarement leurs ressources et réserves. Et certains pays à économie centralisée, avec une part importante d'opérateurs d'État ne publient pas leurs ressources ou les publient avec des normes différentes des normes internationales et sans vérification possible.

Nous ne détaillerons pas ici quelques subtilités supplémentaires dans l'utilisation de ces deux concepts. Il convient toutefois d'avoir à l'esprit que suivant les auteurs, non professionnels du secteur minier, les termes de réserve et de ressource peuvent être employés à tort l'un pour l'autre.

3. Une répartition mondiale des gisements guidée par la géologie

Il importe d'avoir conscience que les ressources géologiques ne sont pas uniformément réparties à la surface de la croûte terrestre (Figure 1). En effet la genèse de gisements de ressources minérales, en particulier des minerais métalliques, résulte de processus cumulatifs de concentration liés à des processus sur des millions d'années en particulier dans le cadre de la dérive des continents. Les gisements correspondent à des « anomalies » qui sont générés par les mécanismes de la dynamique terrestre avec une part de hasard.

Ainsi si par rapport à sa concentration moyenne dans la croûte terrestre l'aluminium sera 4 fois² plus concentré dans un gisement exploité, le cuivre le sera 22 fois, l'or 460 fois et l'argent 5000 fois (Jebrak, 2015).

Les gisements très concentrés et exploitables sont en nombre limité et représentent un tonnage total faible au regard de ce qui est présent dans la croûte terrestre. Pour simplifier il y a d'un côté des concentrations de minerais représentant des quantités totales relativement faibles et de l'autre la quasi-totalité des roches de la croûte terrestre avec des concentrations infimes qui représentent des quantités totales gigantesques mais non exploitables économiquement et compris à long terme. Les quantités totales très importantes ne sont néanmoins pas infinies et seraient épuisées dans quelques siècles au rythme actuel de croissance de leur consommation.

Certaines régions de la planète, certains pays sont plus particulièrement dotés en gisements, d'autres, suivant les formations géologiques accessibles en sont totalement dépourvus. Par exemple il ne peut y avoir de gisements métalliques dans le bassin parisien sauf à envisager d'aller explorer sous cette formation géologique au-delà de 3000 m pour ce qui est de son centre, ce qui n'est actuellement pas envisageable.

¹ Le CRIRSCO (Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards) regroupant les principaux pays miniers (80 % de la capitalisation minière mondiale). Cet organisme est rattaché depuis 2007 à l'ICMM (International Council on Mining and Metals). La quasi-totalité des compagnies minières qui publient leurs réserves et ressources le font selon ces normes.

Les Nations Unies Commission économique pour l'Europe ont défini une classification pour l'énergie fossile et les réserves et ressources minérales. Cette classification très détaillée vise à permettre des comparaisons entre pays. Elle est basée sur trois critères : la connaissance géologique, la viabilité socio-économique et la faisabilité du projet (UNCEE, 2009). Cette classification est d'un usage surtout académique et n'est pas, en pratique, utilisée par les sociétés minières.

² La valeur de 4 semble un peu élevée et serait plus proche de 3 d'après d'autres experts.



Figure 1 - Carte des principales réserves de métaux par pays (InfoMine)

La Chine se trouve être le premier producteur mondial pour 26 minerais métalliques et minéraux industriels. La carte des productions métallurgiques est différente car de nombreux concentrés de minerais sont envoyés à l'étranger pour être traités (la place de la Chine est renforcée pour la fourniture de certains métaux dont elle est le premier transformateur de minerais).

4. L'exploration minière une question de temps, d'argent et d'un peu de chance

4.1. Le temps de l'exploration minière : une affaire de plusieurs décennies

Dans le domaine minier les professionnels distinguent deux champs d'exploration le domaine du « greenfield » qui investit des régions peu ou pas explorées et le domaine du « brownfield » qui recherche dans des secteurs miniers déjà exploités actuellement ou par le passé. Lorsque l'exploration débute à niveau très amont (greenfield) il y a une reconnaissance de terrain à l'échelle régionale qui est suivie sur des secteurs particuliers par le recours à des méthodes géochimiques (c'est le cas des inventaires miniers de la France dans les années 70, et aujourd'hui dans d'autres régions du monde), géophysiques, géologiques et par imagerie satellitaire. Dès qu'une cible potentielle est suspectée les explorations de terrain, géochimiques et géophysiques sont resserrées. Les explorations dans le brownfield démarrent plutôt à ce stade, comme c'est le cas pour les permis exclusifs de recherche minières attribués ces trois dernières années par l'Etat français. En cas de confirmation quelques sondages limités sont engagés, s'ils sont positifs ils s'enchaînent à maille plus serrée.

A partir d'un certain stade de confirmation de l'ampleur du gisement, la démarche rentre dans une phase d'évaluation économique et de faisabilité technique avant de décider de la mise en exploitation éventuelle.

Entre le démarrage de l'exploration amont et la mise en exploitation d'un gisement il s'écoule beaucoup de temps, souvent de l'ordre de 20 à 30 ans ! Dans le cas d'une exploration plus ciblée (domaine du « brownfield ») il faut compter entre 10 et 15 ans. Ainsi les gisements qui seront en exploitation en 2035 doivent être déjà connus ou en cours d'analyse avancée. Pour illustrer ce propos prenons le cas d'un des plus gros gisements mondiaux de cuivre mis en exploitation récemment au sud de la Mongolie : la mine d'Oyu Tolgoi. L'exploration a débuté dans les années 80, avec les premiers forages en 1997.

La décision de mise en exploitation intervient en 2005 et la première tonne de minerai a été sortie en 2013. Le gisement sera en pleine production en 2021 avec 400 000 t/an de cuivre contenu extrait (OreWin, 2014) (Turquoise-Hill, 2016). Soit plus de 35 ans au total d'exploration et de mise en exploitation.

4.2. Les investissements dans l'exploration et l'exploitation : au rythme des prix des matières premières

Du point de vue de l'exploration et de l'exploitation minière deux types de pays sont à différencier, ceux où le secteur minier constitue un secteur essentiellement contrôlé par l'État et les autres pays dont l'essentiel dans le monde dit occidental.

Les enjeux et les investissements nécessaires pourraient laisser penser que les grandes compagnies minières sont à l'origine des découvertes, or il n'en est rien. En effet les grandes compagnies minières, dénommées « majors », (les 8 premières hors Chine totalisent 430 G \$ de chiffre d'affaire) ne sont à l'origine que de moins de 20% des découvertes ces dix dernières années. 50 à 60% des découvertes sont le fait de petites compagnies d'exploration, dénommées « juniors », qui sont financées par des investisseurs financiers. Leur capitalisation unitaire est inférieure à 50 M\$ et le plus souvent à 10 M\$. C'est le cas, par exemple, de la compagnie Variscan opérant actuellement en France et fondée par deux français avec des capitaux essentiellement Australiens. Ces compagnies disposent d'une grande souplesse de décision et prennent les risques de l'exploration pour être le plus souvent rachetées avec plus-value en cas de succès. Cependant certaines évoluent vers l'exploitation minière et peuvent croître (Schodde, 2014).

Les moyens affectés à l'exploration minière par les investisseurs occidentaux pour la recherche d'extensions de gisements existants ou de nouveaux gisements varient de façon importante au cours du temps. De moins de 10 G\$ par an (en \$ 2013) entre 1975 et 2005 les montants investis ont cru avec la crise des métaux pour atteindre 30 G\$ en 2012. Sur la période 1985 – 2000 l'or a représenté plus de 50% des investissements pour ne plus représenter que 33% en 2013 (Schodde, 2014) mais l'or représente encore aujourd'hui l'essentiel des investissements d'exploration des « juniors » dans le monde (SNL Metals & Mining, 2016).

Le niveau des investissements d'exploration est très directement corrélé au prix des matières premières comme le montre la Figure 2

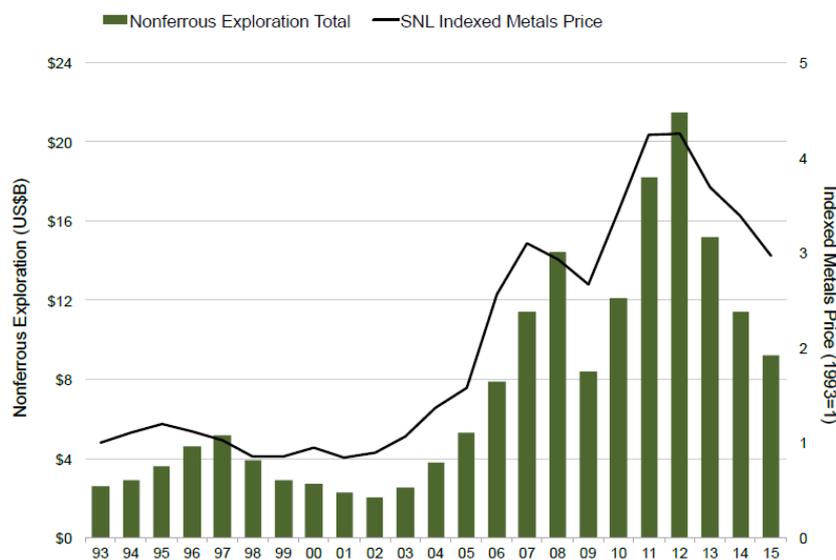


Figure 2 - Estimation globale des budgets d'exploration des métaux non ferreux entre 1993 et 2015 (SNL Metals & Mining, 2016)

Ainsi en période de prix faible l'exploration diminue très rapidement et en conséquence la découverte de nouveaux gisements quelques temps après. Après quelques années de faibles découvertes la tension commence à se faire sentir sur l'approvisionnement et les prix augmentent relançant l'exploration. La recherche de performance de leur placement par les investisseurs explique cette forte réactivité aux prix dans ce domaine. Ceci est moins vrai dans les pays où l'État est très présent comme la Chine.

La question de la formation des prix dans les matières premières constitue un champ de débat large où se superposent les coûts de production et les mécanismes assurantiels que sont les « futures » (limités à certaines matières et permettant de disposer d'un prix garanti à terme par rapport au marché spot), les produits financiers dérivés et les mouvements spéculatifs.

L'envolée des prix à partir de 2005 suite à l'accélération de la croissance chinoise a conduit, en lien avec l'évolution des marchés financiers se tournant plus vers les matières premières, à une augmentation des investissements d'exploration minière par un facteur 5 entre les années 90 et 2010. Par contre ces investissements n'ont pas permis un accroissement des découvertes avec le même facteur (Schodde, 2014).

Les gisements deviennent plus difficiles à trouver aussi le coût de l'exploration par découverte augmente.

Pour donner un ordre de grandeur des investissements le coût moyen de la découverte d'un gisement est de l'ordre de 238 M\$ en moyenne en 2016 (Schodde, 2017). Si l'on inclut la mise en exploitation les investissements peuvent être énormes, dans le cas du gisement d'Oyu Tolgoi déjà cité, entre le début de l'exploration et la mise en exploitation, plus de 11 G\$ ont été investis.

Les rythmes de ces investissements couplés aux évolutions à la hausse ou à la baisse de la consommation génèrent des cycles de tension sur les capacités de production puis de surproduction influant sur les prix de marché.

5. Une évolution de la demande qui guide l'offre

La production de matières premières minérales vise à répondre à une demande. Si nous consommons 210 Mt de minerais et de minéraux industriels dans le monde en 1900, nous en consommons 6,5 Gt en 2009 (Krausmann, 2009) soit plus de 30 fois plus tandis que dans le même temps la population ne croissait que d'un facteur 4.

Ainsi de nombreux métaux de base, ont sur plusieurs décennies, une croissance annuelle moyenne de 3% comme pour le cuivre ou le fer (Labbé, 2014). Les métaux dits de spécialité ont, eux, une croissance souvent bien supérieure pouvant dépasser 6% sur la dernière décennie.

Si la connaissance de la consommation actuelle des matières premières minérales par grands secteurs économiques ou types de produits les utilisant peut être obtenue, la mise en perspective de cette consommation est plus délicate en dehors du scénario « business as usual ».

Certains travaux existent cependant comme par exemple sur le cuivre, les auteurs (Ayman Elshkaki, 2016) fournissent une analyse de la consommation de cuivre en fonction de scénarios d'évolution de la consommation globale jusqu'en 2050.

Ces scénarios conduisent à envisager une consommation annuelle en 2050 allant, suivant le scénario envisagé de 40 Mt à 70 Mt soit entre 2 et 3,5 fois la consommation actuelle (Figure 3).

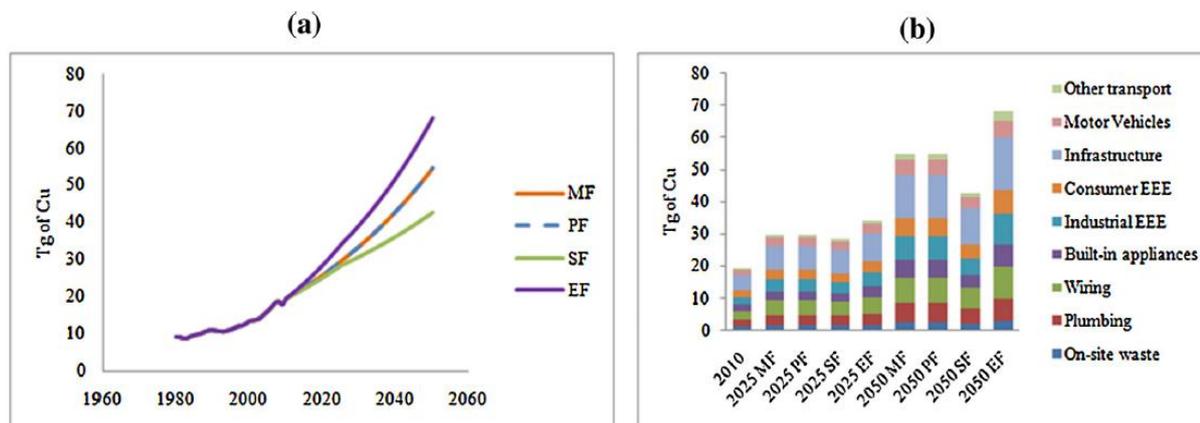


Figure 3 - (a) Demande globale pour les 4 scénarios de GEO-4³, (b) répartition de l'usage du cuivre en 2010, 2025 et 2050 pour les 4 scénarios GEO-4 (Ayman Elshkaki, 2016)⁴

A noter que le scénario dit EF qui correspond au développement durable est celui qui consomme le plus de cuivre du fait notamment de l'accès généralisé à l'énergie.

³ GEO-4 est le Global Environmental Outlook 4 publié en 2007 par le PNUE

⁴ MF: Market First ; PF : Policy First ; SF : Security First ; EF : Equitability First.

D'autres auteurs (Kimon Keramidas, 2012) utilisant d'autres modèles arrivent à des résultats assez similaires avec une consommation pouvant, dans un scénario de mondialisation et de lois du marché, atteindre 60 Mt/an de cuivre et rester proche de ce niveau ensuite.

Sans évolution politique et sociétale majeure au niveau mondial on peut s'attendre à ce que d'ici à 2050 nombre de métaux et de minéraux de base poursuivent une croissance similaire de leur consommation et donc de la demande en ressources minérales avec à minima un doublement d'ici 2050. Celui-ci nécessitera la découverte et l'exploitation de nouveaux gisements importants à un rythme plus soutenu. Pour la plupart des matières premières minérales, non technologiques d'utilisation récente, il est raisonnable de penser qu'une stabilisation de la consommation sera atteinte avant la fin de ce siècle à un niveau par habitant correspondant au niveau actuel moyen des pays occidentaux pour lequel il est quasi stable depuis plusieurs années. Les pays en développement poursuivant les uns après les autres leur croissance d'ici la fin du siècle.

6. La « mine urbaine »⁵ ne pourra pas satisfaire la demande croissante

Face à la demande croissante en matières premières l'un des réflexes consiste à envisager le recyclage de la « mine urbaine » comme pouvant limiter fortement la demande en matières premières vierges. De cette réflexion est né le concept d'économie circulaire dont il ne représente en réalité qu'une partie limitée en terme d'actions à développer. Si le recyclage constitue une option facilement envisageable pour les métaux de base et effectivement développée, elle est beaucoup moins facile à mettre en œuvre pour nombre de minéraux industriels (par exemple l'andalousite des briques réfractaires) qui sont souvent sous une forme très transformée.

Le recyclage ne peut s'envisager que pour des déchets disponibles à la collecte. Or il existe des usages dispersifs comme le sulfate de cuivre dans l'agriculture ou l'oxyde de titane dans les cosmétiques et les peintures qui ne permettent pas d'envisager une collecte induisant une perte irréversible pour le recyclage.

Les déchets disponibles se répartissent en deux familles, ceux issus des procédés de fabrication (« new scrap » des anglo-saxons), générés et recyclés quasi en même temps que la production des produits semi-finis ou des biens manufacturés, et ceux, post consommation (dits « en fin de vie » ou « old scrap » des anglo-saxons), générés pour certains quelques mois après la production (produits jetables ou emballages) et pour d'autres plusieurs décennies après (bâtiment et éléments d'infrastructures par exemple). Aussi l'offre de matières premières pour le recyclage est-elle moins élastique à la demande que celle des matières premières vierges.

A un instant t le recyclage ne peut traiter que ce qui a été mis sur le marché quelques temps avant (semaines, mois, années ou décennies) et qui est devenu un déchet. Par ailleurs le processus de recyclage n'est jamais efficace à 100%, en conséquence, au fur et à mesure des boucles de recyclage, de la matière est perdue. Pour un recyclage efficace à 80% au bout de 5 cycles il ne reste plus que 33% de la matière initiale.

Plusieurs auteurs (Grosse, 2010) (Labbé, 2014) concluent que le recyclage, dans un contexte de croissance de la demande au environ de 2 à 3% par an, comme c'est le cas actuellement, ne fait que retarder l'échéance de quelques décennies au mieux, voir Figure 4

⁵ Marque déposée par la société Recupyl dont l'utilisation dans des documents ADEME est autorisée.

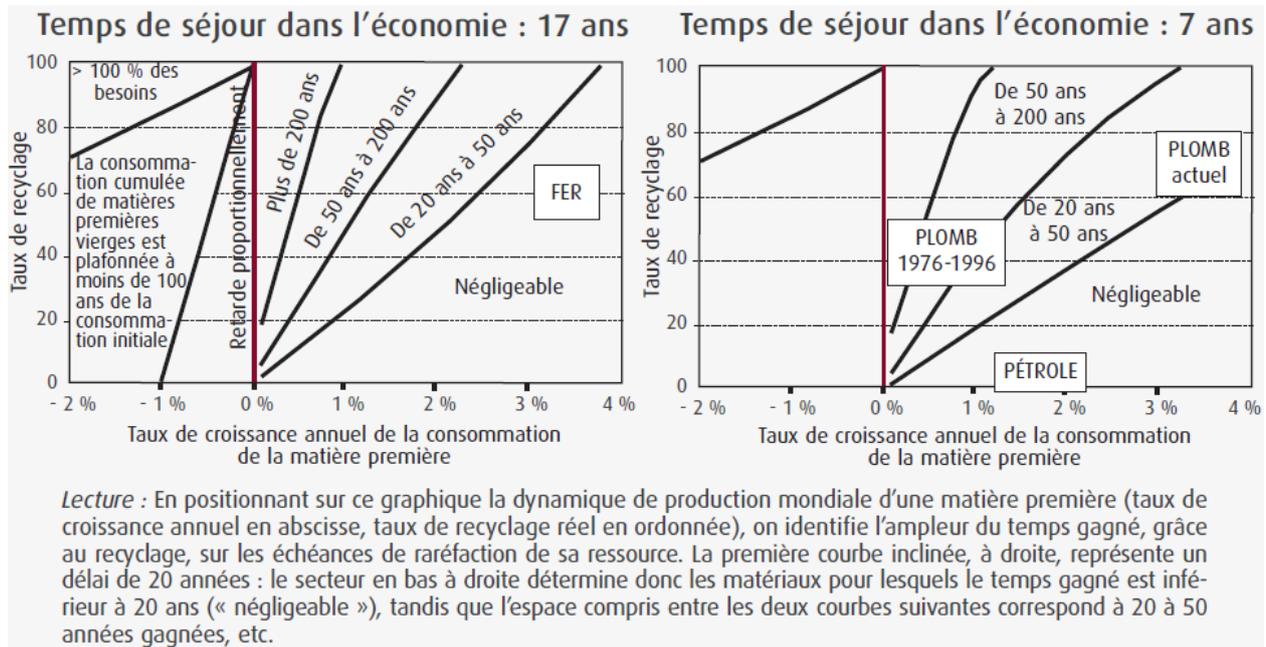


Figure 4 - Cartographie de l'effet du recyclage sur les échéances de raréfaction de la ressource (Grosse, 2010)

Pour les matières à taux de croissance élevé partant d'une faible consommation dans les deux dernières décennies l'apport du recyclage pour l'approvisionnement restera négligeable d'ici 2050.

Le taux de recyclage actuel des déchets peut être très important pour des métaux de base, par exemple pour l'acier le taux de recyclage des déchets post-consommation est estimé à 83% (Worldsteel Association, 2016), mais, du fait que les tonnages consommés aujourd'hui sont bien supérieurs aux tonnages de déchets disponibles, l'acier recyclé en fin de vie ne représente que 16% de l'acier produit, 22% provient des déchets de fabrication et 62% provient des minerais (BIR, 2015). Les chiffres sur le cuivre sont dans les mêmes ordres de grandeur avec une couverture de la consommation par les déchets post-consommation de l'ordre de 17% (ICSG, 2016).

Si le recyclage constitue un élément indispensable à la protection de l'environnement, dans une croissance forte de la demande il ne peut être la réponse unique à cette demande croissante. En l'absence d'une stabilisation de la demande seule la croissance de l'extraction des matières vierges, avec un taux de croissance quasi similaire à celui de la consommation, pourra répondre à cette demande.

7. Allons-nous vers l'épuisement ou vers des pénuries ? Un sujet à controverses

La question de l'épuisement des stocks fait l'objet de controverses entre ceux qui regardent la consommation des réserves, ceux tenants d'une vision malthusienne de l'avenir et ceux qui estiment que le champ des découvertes reste très vaste ou que la technologie ou la substitution résoudra les déficits de matières.

Un indicateur regardé et très médiatisé s'appuie sur **le rapport entre les réserves (R) connues à un moment donné et la production minière (P) à ce même moment**. Ce rapport R/P est aussi appelé, par assimilation au domaine pétrolier « burn rate », le résultat s'exprime en années. Si effectivement ce chiffre donne le délai de consommation des réserves connues à un instant donné au rythme actuel de consommation la date limite qui en résulte ne représente en rien une réalité butoir. Ceci du fait de deux facteurs opposés.

Le premier facteur tient au fait que les découvertes progressent et s'accroissent sous l'impulsion de l'augmentation de la demande et des prix, qui ainsi augmentent les réserves et repoussent la limite. Alors qu'en 1950 les réserves de cuivre étaient d'un peu moins de 100 Mt elles sont actuellement de 720 Mt, alors que dans le même temps la production, tirée par la demande, est passée de 2,4 Mt/an à 18,7 Mt/an. Ainsi la durée de vie des réserves connues de cuivre reste depuis 60 ans autour de 40 années

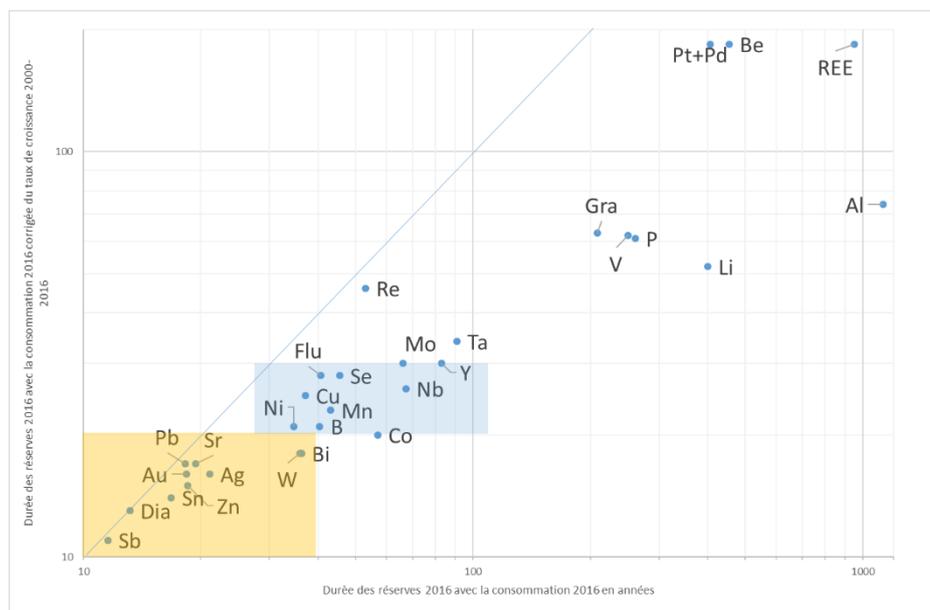


Figure 5 - Évolution des réserves, de la production et du ratio R/P pour certaines matières minérales⁶ à consommation constante 2016 et à consommation évoluant avec le taux de croissance mesuré entre 2000 et 2016⁷. Calculs de l'auteur d'après (USGS, 2001) et (USGS, 2017)

Le second facteur tient à l'évolution croissante de la consommation à caractère exponentiel qui pour différents métaux double tous les 25 ans environ et vient consommer plus rapidement les réserves. Ainsi en appliquant un taux de croissance annuel de 3% au cuivre (celui observé depuis 100 ans) la disparition des réserves actuelles ne serait plus dans 40 ans mais dans 26 ans avec une consommation annuelle de 39 Mt soit à peu près le double de la consommation actuelle

Si cet indicateur ne permet pas d'envisager la fin effective de la disponibilité d'une ressource terrestre il indique la fragilité de ses réserves au regard de la consommation actuelle.

La Figure 5 montre, pour certaines matières minérales, en abscisse le ratio R/P calculé pour 2016 et en ordonnée le même ratio, c'est-à-dire le nombre d'années restantes avant l'épuisement des réserves connues non pas à consommation constante mais si l'on prolonge la consommation du taux de croissance observé entre 2000 et 2016.

Les éléments et minéraux dans la zone orangée sont ceux qui présentent une perspective de consommation des réserves à relativement courte échéance si d'autres gisements ne sont pas trouvés assez rapidement. Un peu moins sensibles mais méritant une attention sont ceux qui se trouvent dans la zone bleue. Le métal dont le ratio R/P le plus faible concerne l'antimoine (utilisé dans les batteries de démarrage automobile et comme retardateur de flamme dans les plastiques en remplacement du brome) avec 12 ans de perspective à consommation constante.

A l'autre extrémité Les Terres Rares, le béryllium ou le platine et le palladium ont des perspectives d'approvisionnement au-delà de 200 ans en l'état actuel des réserves connues.

La notion de pic d'une ressource constitue un second élément d'analyse issu des travaux du géophysicien pétrolier américain Marion King Hubbert qui a donné son nom au « Pic de Hubbert » appelé aussi « Peak Oil ». Cet auteur a défini que la production pétrolière, au niveau d'un puits, d'un champ pétrolifère ou d'une région de production, suivait une courbe en cloche dite « courbe de Hubbert ». Il a ainsi prédit que le pétrole conventionnel américain verrait un pic de production en 1970 avant de décroître. Ceci a été vérifié pour les champs pétrolifères considérés. Ce pic est normalement atteint lorsque la moitié de la ressource a été consommée.

⁶ Symbole chimique pour les éléments, REE=terres rares, Pt+Pd=Platine et palladium ensembles, Gra=graphite, Flu=Fluorine, Dia=diatomites

⁷ Pour les valeurs supérieures d'épuisement des réserves en ordonnée au-delà de 184 (soit après la fin du XXII ème siècle) la valeur a été ramenée à 184 (Pt+Pd, Be, REE)

La courbe de Hubbert à l'échelle d'un territoire résulte de la somme des courbes de chaque gisement ce qui conduit à anticiper ce pic à partir du pic de la découverte des réserves quelques dizaines d'années avant. Par ailleurs le principe de cette analyse conduit à dire que les réserves exploitées dans la partie montante le sont à coûts faibles tandis que celles pour la partie descendante sont à coût élevé.

De nombreux auteurs ont appliqué et appliquent ce principe à d'autres matières premières minérales prédisant l'existence d'un pic pour certaines matières premières autour de 2050. Une analyse dérivée dite de linéarisation de la courbe de Hubbert conduirait à prévoir les ressources ultimes.

Des modélisations plus complètes réalisées (Northey, et al., 2014) à partir des données détaillées de tonnage et de teneurs du cuivre conduisent aux résultats de la Figure 6, qui détaille la simulation par pays, sur la base de réserves recouvrables ultimes de 1,78 Gt.

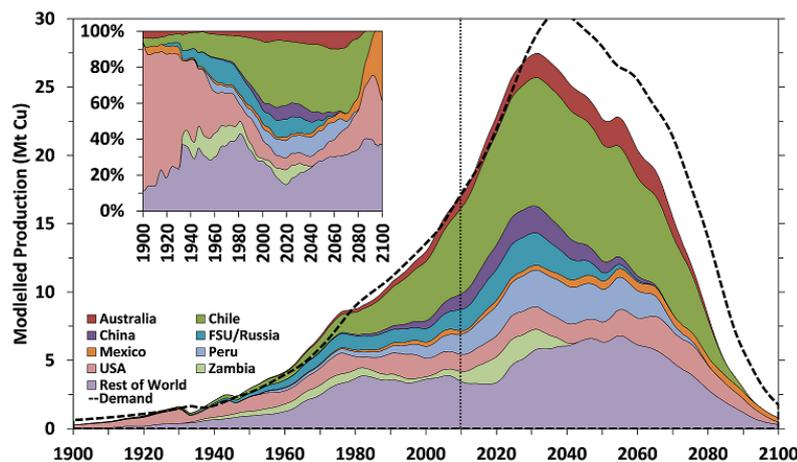


Figure 6 - Simulation de la production par pays et régions par le modèle GeRS-DeMo (Northey, et al., 2014)

D'autres auteurs (Magnus Ericsson, 2010) estiment que l'approche de nombreux auteurs basée sur le « pic de Hubbert » n'est pas correcte car elle ne tient pas compte du fait que les stocks extraits ne sont pas détruits (ce qui n'est pas le cas pour les hydrocarbures), que les forces du marché vont conduire à trouver de nouveaux gisements, ou à aller vers une substitution ou à faire décroître la demande. Par ailleurs selon ces mêmes auteurs le fait que les ressources ultimes ne soient pas connues ne nous permet pas d'envisager leur épuisement notamment à court ou moyen terme.

De même des auteurs travaillant à l'USGS (United States Geological Survey) ont récemment publié un article (Lawrence D Meiner, 2016) contestant la réalité physique d'un pic de disponibilité dans les prochaines décennies. Ces auteurs mettent en avant que la découverte de gisements résulte de l'offre et de la demande. Ils notent que le recyclage et la substitution ne sont pas la seule réponse à avoir mais qu'il faut aussi développer les moyens nécessaires à l'accroissement d'une exploration qui sera plus difficile.

Nous noterons que Marion King Hubbert lors de son article en 1956 et lors des suivants s'est appuyé sur une situation circonscrite géographiquement avec un niveau de connaissance élevé pour un type de gisement donné. Il s'agissait probablement d'une situation idéale pour appliquer ce type d'approche. Ce que confirme la simulation par des modèles (Giraud, et al., 2010).

Il est toutefois certain que les ressources accessibles à un moment donné ne sont pas illimitées.

Si l'épuisement physique des ressources semble difficile à prévoir il est probable que la dynamique d'évolution de la production ne puisse pas suivre la croissance de la demande à un rythme de plusieurs pourcents par an. Dans un jeu de libre marché les acteurs économiques et financiers ont une aversion au risque et ont une vision prospective limitée au mieux à une dizaine d'année, correspondant à l'horizon de rentabilité financière souhaitée. Tout métal dont le rapport R/P est inférieur à 20 ans, s'il n'est pas substituable aisément, ce qui est le cas pour la plupart, est susceptible de voir se produire des pénuries conjoncturelles plus ou moins longues. Ainsi la compagnie minière Rio Tinto, se basant sur des travaux de consultants, envisage une pénurie de production de cuivre peu après 2020.

8. Des horizons nouveaux d'exploration et d'exploitation peuvent-ils répondre aux besoins ?

Les ressources minérales actuellement exploitées correspondent à des gisements accessibles, avec les connaissances actuelles, et présentant des minerais que les technologies disponibles permettent de traiter et de valoriser. Les ressources conventionnelles évoluent au cours du temps, les premiers objets en fer ou en cuivre ont été réalisés par façonnage d'éléments non composés comme les météorites pour le fer et le cuivre natif pour le cuivre. La chaleur et la réduction au carbone ont ensuite été utilisées pour traiter les composés faisant de ces minerais (oxydés, carbonatés ou sulfurés) des minerais devenus conventionnels. Comme pour l'industrie pétrolière il est possible d'aller **prospector et exploiter dans des conditions extrêmes soit climatiques comme le Groenland (potentiellement très riche en minerais), les zones arctiques ou antarctiques ou à grande profondeur** comme quelques mines d'or sud-africaines à 4000 m sous la surface terrestre. Ces zones présentent cependant des défis technologiques et humains, mais aussi de plus en plus, d'acceptabilité socio-environnementale.

Par ailleurs comme pour le pétrole et le gaz non conventionnels (gaz de schiste, pétrole de roche mère ou gaz de houille) l'accès à des concentrations métalliques de nature différente sont envisageables. Ainsi en est-il de minerais dont la nature ou la concentration les rendent non exploitables actuellement mais aussi dans un futur proche les ressources sous-marines.

Les ressources « off-shore », bien qu'encore mal connues semblent offrir un potentiel important pour certains métaux. Elles sont de trois catégories (Secretariat of Pacific Community, 2013) (Pierre Van de Velde, 2015) et réparties dans des zones bien spécifiques (Figure 7) :

- Les sulfures massifs émis par les « fumeurs noirs » des rides d'expansion médio-océaniques, des arcs volcaniques sous-marins et des bassins d'arrière arc. Ces amas souvent actifs peuvent contenir ponctuellement jusqu'à plus de 10% de cuivre, plus de 10% de zinc ainsi que des traces d'or et d'argent (jusqu'à 1kg/t). Les gisements sont situés à plus de 1000 m de la surface de l'océan et plus généralement entre 3500 et 6000 m
- Les nodules de manganèse et nodules polymétalliques des plaines abyssales entre 4000 et 6000 m sous la surface. Ils sont en concentration de 5 à 15 kg/m² et peuvent contenir plus de 20% de manganèse, 16% de fer, 1% de cuivre, 4kg de cobalt, 4kg de nickel et 2 kg de cuivre par tonne, mais aussi 1,8 kg de terres rares et 280g de molybdène par tonne de nodules.
- Les encroutements de ferro-manganèse riches en cobalt. Situé sur les flancs des monts sous-marins, ils sont présents à des profondeurs allant de 600 m à 7000 m mais sont plus épais entre 800 et 2500 m.

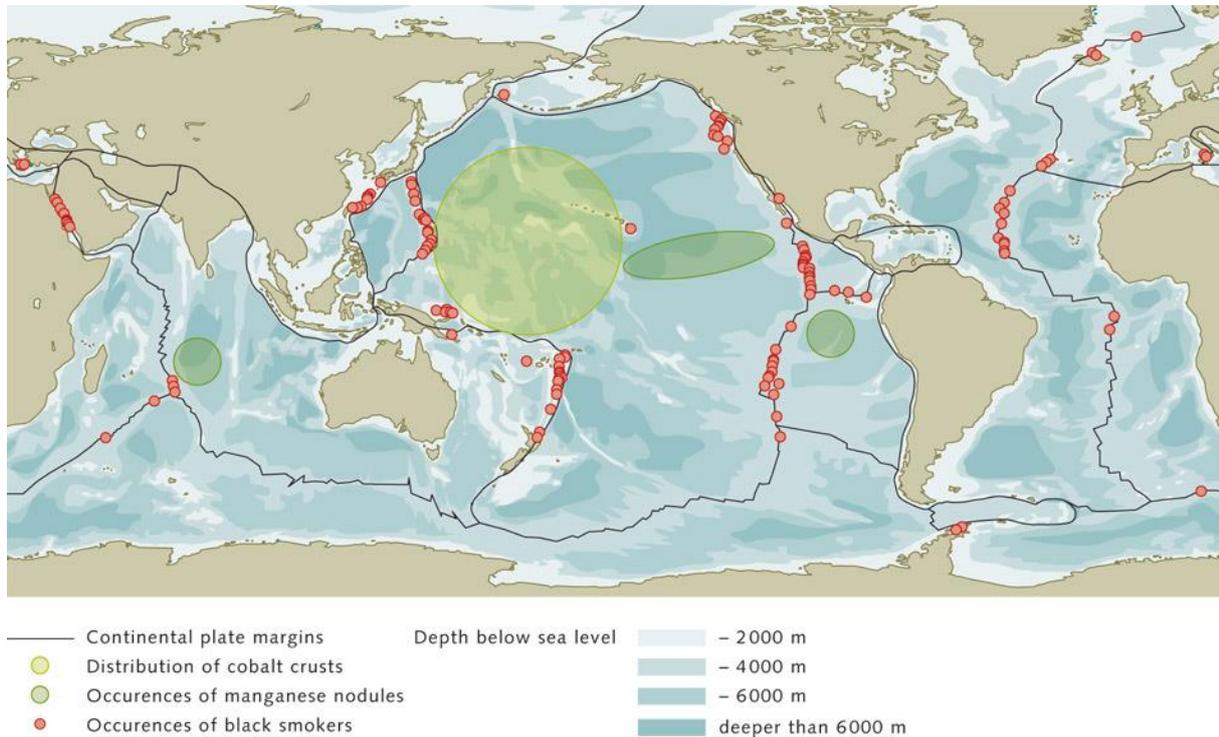


Figure 7- Carte des principales zones de ressources minérales sous-marines (World Ocean Review)

L'exploitation de ces fonds marins ne contribuera pas à court voire moyen terme à un approvisionnement significatif. Cependant la société canadienne Nautilus Minerals, seul cas concret de projet, cherche depuis plus de dix ans à développer l'exploitation du gisement de sulfures de Solwara, en mer de Bismarck, au large de la Papouasie Nouvelle Guinée. Elle développe des équipements (Figure 8) spécifiques à la mise en exploitation de sulfures massifs. Nautilus Minerals espère démarrer l'exploitation début 2019. Mais les ressources totales de ce gisement sont estimées à 200 000 t de cuivre, soit de l'ordre de 1% de ce qui est produit annuellement dans le monde, ce qui n'aura guère d'influence sur la durée de vie des réserves globales en cuivre.



Figure 8 - Équipements pour l'exploitation sous-marine d'amas sulfurés (Nautilus Minerals, 2016)

Les ressources en nodules et encrustements sous-marins présentent, en revanche un potentiel important pour certains métaux de l'ordre de la moitié des réserves terrestres actuelles de cuivre et dix fois plus pour le manganèse et le cobalt (Maribus, 2014). Mais ce type de gisements, bien qu'étudiés par périodes depuis les années 1970, est encore loin d'une quelconque faisabilité économique, et leur exploitation n'est, de façon réaliste, envisageable qu'à long terme (pas avant plusieurs décennies probablement).

Par ailleurs certains pensent déjà à exploiter les métaux des astéroïdes..., plusieurs compagnies minières ont été créées dans cet objectif (Deep Space Industries, Planetary Resources) en parallèle de programmes étatiques. La faisabilité, si toutefois elle devient un jour envisageable, ne sera qu'à long terme, bien après 2050 voire après la fin de ce siècle tant les défis technologiques liés sont importants.

9. L'extraction minière est aussi une question d'eau et surtout d'énergie

Nous ne traiterons pas ici des questions environnementales de l'eau de pompage du site minier (dénommée eau d'exhaure) ou de procédé de traitement rejetée par l'exploitation, mais nous examinerons les besoins en eau de l'exploitation minière. **L'eau** constitue tout comme l'énergie une ressource indispensable à l'exploitation minière. La phase de broyage et de concentration du minerai consomme l'essentiel de l'eau avec environ 70% de la consommation (COCHILCO, 2016). La question de l'eau devient un challenge pour l'industrie minière car de nombreuses exploitations et de nombreux projets sont situés en zones pauvres en eau, arides ou semi désertiques (Northey, et al., 2017). Malgré l'augmentation de l'efficacité, l'augmentation des tonnages à extraire et leur plus faible teneur conduira à utiliser plus d'eau.

Dans les régions concernées le changement climatique viendra probablement renforcer le problème alors qu'une forte concurrence entre usages est déjà présente. Dans certaines régions comme le Chili il est fait appel à de l'eau de mer dessalinisée transportée sur de longues distances. La compagnie BHP Billiton, construit une installation sur la côte pour envoyer l'eau dessalinisée à plus de 150 km sur ses sites miniers. Ainsi globalement au Chili l'exploitation minière consomme 12,7 m³ par seconde (COCHILCO, 2016) et les autorités minières prévoient un quasi doublement de cette consommation dans la prochaine décennie pour atteindre, d'ici 2026, 20 m³/s (soit près de 7 fois la consommation d'eau du Grand Lyon) dont la moitié en provenance de l'eau de mer (Figure 9). La production de cuivre du Chili devrait augmenter de 8% tandis que l'utilisation d'eau augmentera de 62% d'après les données de la commission chilienne du cuivre !

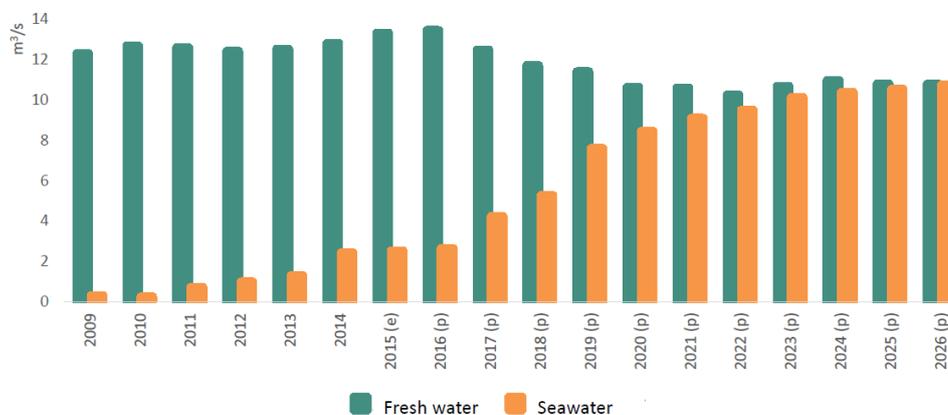


Figure 9 - Évolution de l'utilisation d'eau du secteur minier du cuivre au Chili (COCHILCO, 2016)

De plus la production de cette eau à partir d'eau de mer nécessite une production d'énergie supplémentaire.

La production mondiale de métaux représentait en 2012 de l'ordre de 10% (dont 6,5 % pour l'acier et 0,3% pour le cuivre) de la **consommation énergétique** mondiale. Alors que la consommation finale d'énergie a été multipliée par deux entre le milieu du siècle dernier et 2011 la consommation énergétique de l'exploitation minière et des carrières a été multiplié par 4 dans le même temps. (Fizaine, et al., 2015).

Pour l'extraction de nombreux métaux, la phase de traitement du minerais représente la part la plus importante de la consommation énergétique (de l'ordre de 50% pour le cuivre) vient ensuite l'exploitation de la mine (de l'ordre de 36% pour le cuivre) reste le passage du concentré au métal qui représente une part faible même en pyrométallurgie (moins de 15% pour le cuivre) (Norgate, et al., 2010).

Même si le passage de la pyrométallurgie à l'hydrométallurgie ou à l'extraction aux solvants ou à la biolixiviation se développe la conséquence sur la consommation énergétique sera faible car la préparation des minerais pour ces technologies nécessite un broyage plus fin, fort consommateur d'énergie.

Par ailleurs avec la diminution de la teneur des gisements il est nécessaire d'extraire et de traiter un plus grand volume de roche pour extraire le même tonnage de métal. Entre 2011 et 2014 la consommation d'énergie par tonne de cuivre produite a augmenté de 17% (Copper Alliance). Ce mouvement devrait se prolonger avec la baisse continue des teneurs moyennes exploitées, alors que pour certains métaux nous arrivons dans la partie très pentue de la courbe hyperbolique de relation entre teneur et énergie consommée comme le montre la Figure 10

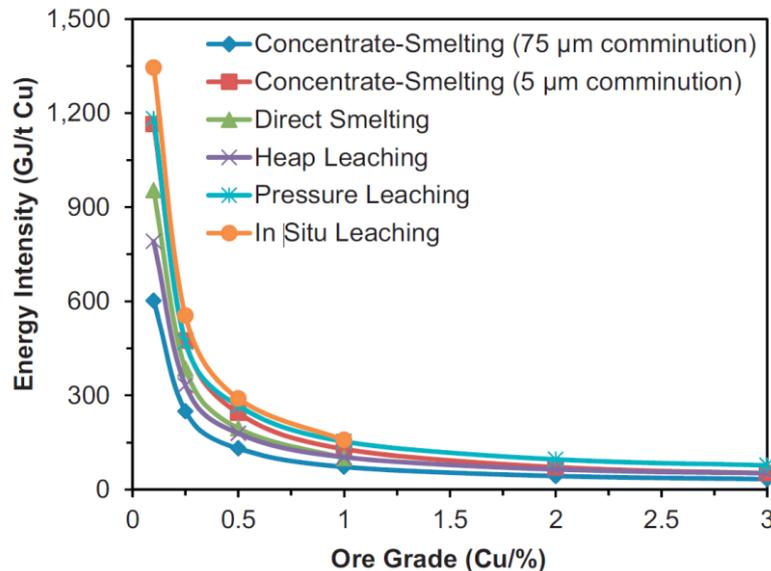


Figure 10 - Consommation énergétique de la production de cuivre en fonction de la teneur du minerai et de la technologie de traitement (Northey, et al., 2014)

Dans les années à venir même si des gains d'efficacité énergétique sont à prévoir ils ne devraient pas compenser l'effet lié à la baisse des teneurs. Elshkaki et al (Elshkaki, et al., 2016) estiment qu'en 2050 avec une demande en cuivre multipliée par 2 à 3 par rapport à 2016 le cuivre devrait à lui seul consommer 2,4% de la consommation énergétique mondiale de 2050 contre 0,3% en 2012.

La consommation énergétique des exploitations minières constitue, avec les coûts d'exploration et de mise en exploitation, un élément clé du prix des matières premières minérales dans le futur.

10. Conclusion

La question de la raréfaction et de l'épuisement des ressources minérales avant la fin de ce siècle constitue un sujet de controverses entre les différents auteurs et spécialistes. S'il est certain que les gisements actuellement exploités, bien que pouvant avoir une durée d'exploitation dépassant 100 ans pour certains, s'épuiseront un jour, mais d'autres seront découverts. Nous ne connaissons pas avec une incertitude raisonnable la quantité de gisements que nous pourrions trouver ne serait-ce que dans les trois premiers kilomètres de la croûte terrestre.

L'horizon d'épuisement des ressources minérales est lointain, mais pas infini, contrairement à ce que l'on observe pour les ressources halieutiques marines, pourtant théoriquement renouvelables, mais dont la production diminue du fait de la diminution des stocks.

Nous pouvons probablement, si nous nous en donnons les moyens financiers et techniques explorer et aller plus profond ou exploiter des gisements non conventionnels comme les gisements sous-marins. Mais ceci se fera avec un coût énergétique, économique et environnemental plus important. Sera-t-il supportable économiquement et socialement ? nul ne sait mais l'augmentation des impacts environnementaux ne pourra continuer rendant l'exploitation de certains gisements aléatoire.

La croissance des investissements nécessaires pour explorer et mettre en exploitation de nouveaux gisements afin de répondre à la demande croissante est limitée par le prix de métaux et les perspectives de rentabilité à court terme pour les marchés financiers. Si l'épuisement des ressources minérales avant la fin de ce siècle est très peu probable pour la plupart des matières premières minérales par contre des pénuries sur des durées importantes sont à envisager, faute d'une mise en exploitation suffisamment rapide de nouveaux gisements.

Ceci pourrait être le cas pour l'antimoine, le zinc ou le cuivre, le temps que les acteurs miniers développent de nouveaux gisements à coûts plus élevés ou que le prix élevé des matières conduise à des substitutions technologiques ou une baisse de la demande.

Les conséquences environnementales directes de l'exploitation minière sur les milieux, en particulier dans certains pays moins regardants sur les conditions d'exploitation, mais aussi l'augmentation de l'énergie consommée dans un contexte de lutte contre le changement climatique sont autant de paramètres importants à prendre en compte pour anticiper la limitation de l'accès aux gisements et en conséquence la disponibilité des matières premières minérales.

Il convient donc d'être déterminé à diminuer notre consommation de matières minérales et à en augmenter la productivité afin de :

- Réserver l'avenir pour les générations futures,
- Limiter notre sensibilité à la disponibilité conjoncturelle et aux coûts à venir
- Diminuer drastiquement les impacts environnementaux source de refus sociétal pour les exploitations minières comme le montre le refus récent de toute exploitation minière par le parlement du Salvador.
-

Si le recyclage constitue une source indéniable qu'il convient de développer au-delà de son simple équilibre économique, dans les conditions actuelles du marché, par des réglementations ou des mécanismes économiques, il ne pourra toutefois répondre seul à la demande notamment dans une demande en croissance mondiale annuelle de 2 à 3% voir beaucoup plus pour certaines matières. L'accès à des ressources minières vierges reste indispensable à l'humanité pour ses besoins quotidiens mais aussi pour assurer une transition énergétique et écologique vers une société décarbonée et plus égalitaire, mais l'extraction devra tenir compte de contraintes de plus en plus fortes pour son exercice.

L'auteur remercie Jean-François Labbé (BRGM) pour sa relecture et ses suggestions.

11. Pour en savoir plus

Liste de sites ou références

Bihoux Phillipe et de Guillebon Benoit, Quel futur pour les métaux ? : Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société., EDP, 2010.

Chalmin Philippe, Cyclope : Les marchés mondiaux 2017, Economica, 2017(édition annuelle)

Giraud Pierre-Noel et Ollivier Thimothée, Économie des matières premières, La découverte, 2015

Jebrak Michel, Quels métaux pour demain Dunod 2015

Mérenne-Schoumaker Bernadette et Levasseur Claire, Atlas mondial des matières premières : des besoins croissants, des ressources limitées, autrement, 2015

<https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>

<http://www.mineralinfo.fr/>

12. Bibliographie

Ayman Elshkaki T.E. Graedel, Lucca Ciacci, Barbara Reck Copper demand, supply, and associated energy use to 2050 [Revue] // Global Environmental Change / éd. Elsevier. - 2016. - 39. - pp. 305-315.

BIR World steel recycling in figures 2010-2014 [Rapport]. - 2015.

COCHILCO Water use in copper mining: Trends a critical input [En ligne] // cochilco.cl. - 2016. - 08 02 2017. - <https://www.cochilco.cl/Paginas/English/Presentation/Presentations.aspx>.

- Copper Alliance** Environment/the figures [En ligne] // copperalliance.org. - 7 Février 2017. - <http://sustainablecopper.org/en/figures.html>.
- Copper-Alliance** [En ligne] // copperalliance.org. - 30 septembre 2016. - <http://copperalliance.org/core-initiatives/sd/availability/>.
- Elshkaki Ayman [et al.]** Copper demand, supply, and associated energy use to 2050 [Article] // Global Environmental Change. - [s.l.] : Elsevier, 2016. - 39 : Vol. 2016. - pp. 305-315.
- Fizaine Florian et Court Florian** Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI [Article] // Ecological Economics. - [s.l.] : Elsevier, 2015. - 110. - pp. 106-118. - <10.1016/j.ecolecon.2014.12.001>. <hal-01170989>.
- Giraud Pierre-Noël [et al.]** Hubbert's oil peak revisited by a simulation model = CERNA working paper series. - Octobre 2010.
- Grosse François** De l'économie circulaire à l'économie de la fonctionnalité : vertus et limites du recyclage [Revue] // Futuribles. - 2010. - 365. - pp. 99-124.
- ICSG** The world copper factbook 2016 [Rapport]. - 2016.
- IFREMER** Ressources minérales grands fonds/Présentation Générale [En ligne] // ifremer.fr. - 7 Février 2017. - <https://www.ifremer.fr/gm/Comprendre/Soutien-a-la-puissance-publique/Ressources-minerales-grand-fond/Presentation-generale>.
- InfoMine** Infographic [En ligne] // mining.com. - 10 02 2017. - <http://www.mining.com/infographic-where-the-minerals-are-82638/>.
- Jebrak Michel** Quels métaux pour demain [Ouvrage]. - [s.l.] : Dunod, 2015.
- Kimon Keramidias Alban Kitous and Bradford Griffin** Future availability and demand for oil gas and key minerals [Revue] // Polinares Project. - 2012.
- Krausmann F., Gingrich, S. Eisenmenger, N., Erb, K.H., Habert, H., Fischer-Kolawski, M.,** Growth in global materials use, GDP and population during 20th Century [Revue] // Ecological Economics. - 2009. - 10 : Vol. 18. - pp. 2696-2705.
- Labbé Jean-François** Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux. [Conférence] / éd. SIM Congrès de la. - Bordeaux : [s.n.], 2014.
- Laherrere Jean** Documents téléchargeables / Copper peak [En ligne] // aspofrance.fr. - 2010. - 30 septembre 2016. - <http://aspofrance.viabloga.com/texts/documents>.
- Lawrence D Meiner Gilpin R Robinson Jr and Nedat T Nassar** Mineral Resources : Reserves, Peak Production and the Future [Revue] // Resources. - 2016.
- Magnus Ericsson Patrik Söderholm** Mineral Depletion and Peak Production, working paper [Revue] // Polinares Project. - 2010.
- Maribus** World Ocean Review WOR 3 Marine Resources - Opportunities and Risks [Rapport]. - 2014.
- MEEM** Produire plus avec moins de matières : pourquoi? [Rapport] / CGDD. - [s.l.] : Ministère de l'Environnement, de l'énergie et de la mer, 2017.
- Nautilus Minerals** Investor Update [Rapport]. - 2016.
- Norgate T et Haque N** Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations [Article] // Journal of Cleaner Production. - [s.l.] : Elsevier, 2010. - 18 : Vol. 2010. - pp. 266-274.
- Northey S [et al.]** Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining [Revue] // Resources, Conservation and Recycling / éd. Elsevier. - 2014. - 83. - pp. 190-201.
- Northey Stephen A. [et al.]** The exposure of global metal resources to water criticality, scarcity and climate change [Article] // Global Environmental Change. - [s.l.] : Elsevier, 2017. - 44. - pp. 109-124.
- OreWin** Oyu Tolgoi 2014 Technical report [Rapport]. - [s.l.] : Turquoise Hill Resources Ltd, 2014.
- Pierre Van de Velde** L'exploitation des ressources minières sous-marines [Rapport]. - [s.l.] : Ambassade de France en Allemagne, 2015.
- Schodde Richard** Recent Trends and Outlook for Global Exploration [Rapport]. - [s.l.] : Minex Consulting, 2017.
- Schodde Richard** The global shift to undercover exploration - How fast? How effective / éd. Consulting Minex. - Keytone, Colorado : [s.n.], 2014.
- Schodde Richard** Uncovering exploration trends and the future: Where's exploration going ? [Conférence] / éd. Consulting MinEx. - Melbourne : [s.n.], 2014.
- Secretariat of Pacific Community** Deep Sea Minerals [Rapport]. - 2013.
- SNL Metals & Mining** 26th edition of Corporate Exploration Strategies reports 2016 : World exploration trends [Rapport]. - 2016.
- Turquoise-Hill** The future of Oyu Tolgoi is underground [Conférence] // Macquarie Global Metals, Mining and Materials Conference. - 2016.

UNCEE Nations Unies CEE Classification cadre des Nations Unies pour l'énergie fossile et les réserves et ressources minérales, 2009 [Ouvrage]. - 2009.

UNEP Ressource Efficiency: Potential and Economic Implications, Summary for policy-Makers [Rapport] / International Resource Panel. - 2016.

USGS Mineral commodity summaries 2001 [Rapport]. - 2001.

USGS Mineral Commodity Summaries 2017 [Rapport]. - 2017.

World Ocean Review [En ligne] // worldoceanreview.com. - 7 février 2017. - <http://worldoceanreview.com/en/worldoceanreview/energy/marine-minerals/>.

Worldsteel Association Fact sheet : Steel and raw materials [En ligne]. - Juin 2016. - 3 Mars 2017. - <https://www.worldsteel.org/publications/fact-sheets.html>.

13. ANNEXE : Terminologie des grandes familles de métaux

A RETENIR :

- Les différentes notions de familles de métaux n'aboutissent pas à des listes de métaux parfaitement définies ;
- Ne pas confondre Terres rares et métaux rares qui n'ont rien à voir ;
- Des notions de stratégique et de critique qui se rapprochent mais sont différentes
- Une liste de métaux critiques qui varie suivant les régions du monde et dans le temps en fonction de l'évolution du contexte ;
- Des grandes familles invariantes que sont les métaux de base, les métaux de spécialité, les métaux précieux et les métaux de l'énergie nucléaire sont à privilégier en dehors d'être spécifiquement sur la liste des matériaux critiques définie par la Commission Européenne.

De nombreux documents et médias accompagnent le terme de métaux de différents qualificatifs comme, rares, spéciaux, mineurs, critiques, stratégiques, etc. Ces termes couvrent des champs à géométrie variable suivant les auteurs et sont plus ou moins bien employés. Cependant quelques éclairages terminologiques de base sont envisageables.

LES METAUX RARES :

Il s'agit d'éléments chimique dont la « rareté » est définie relativement à leur abondance dans la croûte terrestre.

Les métaux dits abondants sont ceux à plus de 1000 ppm (0,1%) Silicium, calcium, sodium, magnésium, potassium, fer, aluminium, titane.

Les métaux rares ou peu abondants sont ceux compris entre 1 et 1000 ppm, ce sont les plus nombreux dans lesquels se trouvent, le plomb le cuivre, le zinc, le nickel, le cobalt, le molybdène, le tungstène, etc.

Les métaux très rares sont ceux dont la teneur est inférieure à 1 ppm et comprennent les métaux précieux (or, argent et les 6 platinoïdes – platine, palladium, rhodium, iridium, ruthénium, osmium) ainsi que l'antimoine, le sélénium et l'indium.

LES TERRES RARES :

Il ne faut surtout pas confondre Terres Rares et métaux rares ce qui est souvent le cas dans les médias ainsi que chez certains consultants et est généralisé dans le grand public.

Les terres rares sont, suivant les auteurs, un ensemble de 16 ou 17 éléments métalliques du tableau périodique des éléments, aux propriétés chimiques très voisines, qui se trouvent pratiquement toujours associés dans leurs gisements, et qui regroupent :

- Le groupe des lanthanides (les 15 éléments de numéros atomiques compris entre 57 et 71, du lanthane au lutécium) ;
- L'yttrium (Y, numéro atomique 39), dont les propriétés (atomiques et chimiques) sont proches de ceux des lanthanides et s'y trouve toujours associé dans leurs différents gisements.

Certains auteurs ajoutent le scandium (Sc, numéro atomique 21) au groupe des terres rares.

Malgré leur nom, les éléments constituant les terres rares ne sont pas véritablement rares, leur dénomination vient de l'époque de leur découverte ou l'on pensait qu'ils étaient effectivement rares. Ce sont des éléments relativement abondants dans la croûte terrestre pour certains (lanthane, néodyme, cérium qui représentent 90% de la production de terres rares dans le monde) avec la même présence que le cuivre, le plomb ou le zinc, mais peu de minéraux sont constitués de ces éléments et leurs gisements (concentrations naturelles à des niveaux économiquement exploitables) sont très localisés. Par ailleurs, la séparation de ces éléments entre eux est difficile du fait de propriétés chimiques proches.

Les terres rares sont divisées en deux groupes : les terres rares légères⁸ et les terres rares lourdes, la limite entre les deux fluctue suivant les auteurs.

⁸ Le classement entre terre rare légère ou lourde varie suivant les auteurs. Pour tous, les lanthanides de faible numéro atomique (lanthane, cérium, praséodyme, néodyme) sont classés dans les terres rares légères, et ceux de numéro atomique élevé (terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, lutécium) dans les terres rares lourdes, les autres de numéro intermédiaire (prométhium, samarium, europium, gadolinium) sont classées différemment suivant les auteurs.

LES PETITS METAUX OU METAUX MINEURS :

Cette distinction est plutôt d'origine économique sur la base des quantités en volume ou en valeur. Il est courant de classer ainsi, de façon arbitraire, les métaux dont la production annuelle est inférieure à un seuil de 50 kt à 200 kt suivant les sources ou dont le marché est inférieur à 10 M\$ d'après certains auteurs.

C'est métaux ne font pas l'objet d'une cotation sur les places de marché, sauf pour le cobalt et le molybdène introduits assez récemment au London Metal Exchange (LME). En dehors du titane métal les petits métaux sont tous des métaux rares.

Ils se différencient des métaux dit de base ou majeurs

LES MÉTAUX DE SPÉCIALITÉ OU SPÉCIAUX OU TECHNOLOGIQUES

Ce sont des métaux qui sont utilisés en quantité limitée dans les produits finaux ils constituent le plus souvent des éléments d'alliage principalement de l'acier ou de l'aluminium ou des éléments utilisés pour leurs propriétés électroniques dans les nouvelles technologies. Cette catégorie est très proche de celle des « petits métaux »

LES METAUX STRATÉGIQUES

Les métaux stratégiques sont des métaux d'importance, peu ou pas substituables et pouvant présenter des risques d'approvisionnement pour certains secteurs de l'Etat ou de l'économie. A l'origine ils concernaient principalement le secteur la défense. Actuellement, par extension, la notion se rapporte à des métaux indispensables pour des secteurs économiques d'importance ou de pointe comme l'aéronautique, la construction automobile, le spatial, la défense, le nucléaire et l'électronique. Ces métaux peuvent faire l'objet de constitution de stocks stratégiques sous l'égide des Etats comme c'est le cas aux Etats Unis, au Japon, en Corée (du sud) ou en Chine. La France a eu ce type de stocks de 1938 jusqu'aux années 90. Il n'existe pas de liste de ces métaux car leur caractérisation est très dépendante de l'appréciation à un moment donné. En France il a été créé par décret du 24 janvier 2011 le Comité des Métaux Stratégiques (COMES) présidé par le Ministre de l'Industrie suite une réflexion sur la nécessité éventuelle de reconstituer des stocks stratégiques. Le COMES n'a pas dressé de liste spécifique de métaux.

LES MÉTAUX CRITIQUES

L'utilisation de la notion de métaux critiques est assez récente et date de l'envolée de la croissance chinoise qui a créé des tensions sur le marché de différents métaux. Il s'agit de fait d'une extension de la notion de métaux stratégiques à toute les chaines de valeur des biens nécessaires à l'économie.

L'Europe, le Japon et, dans une moindre mesure les Etats Unis, ont développé des politiques autour de cette notion. En Europe certains pays dont la France ont développé des approches spécifiques en complément des travaux et orientations au niveau européen.

La Commission européenne a publié en 2010 un premier rapport avec la liste des métaux et minéraux industriels considérés comme critiques, cette liste a été actualisée et publiée en 2014⁹ (voir figure ci-dessous) et une nouvelle actualisation est en cours. Elle devrait paraître fin 2017 ou début 2018 avec un élargissement des matériaux retenus (liste confidentielle à date). La liste des métaux (et minéraux¹⁰) critiques combine deux critères principaux le premier sur l'importance économique (caractère stratégique pour l'économie) le second sur le risque d'approvisionnement. Ce dernier combine plusieurs critères dont bien entendu la disponibilité minière, la concentration industrielle dans la chaîne d'approvisionnement, mais aussi le risque géopolitique des pays producteurs. Sur ces bases la liste peut varier suivant les Etats ou régions concernées mais aussi dans le temps.

La notion de critique est ainsi une notion très relative.

QUELS TERMES UTILISER ?

Il n'existe pas de classification absolue des métaux cependant ont peu distinguer quatre grandes familles industrielles qui peuvent être utilisés pour définir les champs d'analyse ou de description lorsqu'il n'est pas fait recours à des listes précises. :

- Les métaux de base : Fe, Al, Ti, Mg, Mn, Cr, Zn, Pb, Cu, Ni, Sn
- Les métaux précieux : Au, Ag, Pt, Pd, Ir, Os, Rh, Ru
- Les métaux de l'énergie nucléaire que sont les actinides : U, Th, Pu

⁹ European Commission, DG Entr, Report on critical raw materials for the EU, May 2014

¹⁰ Ce sont actuellement, les phosphates, le charbon cokéifiable, la magnésite, le graphite naturel, la fluorine, les borates. La prochaine liste des matières premières critiques est susceptible d'intégrer des matières premières non minérales.

- Les métaux de spécialité : tous les autres

La référence aux métaux critiques, complémentaire, fait référence par défaut aux métaux de la liste européenne des matériaux critiques.

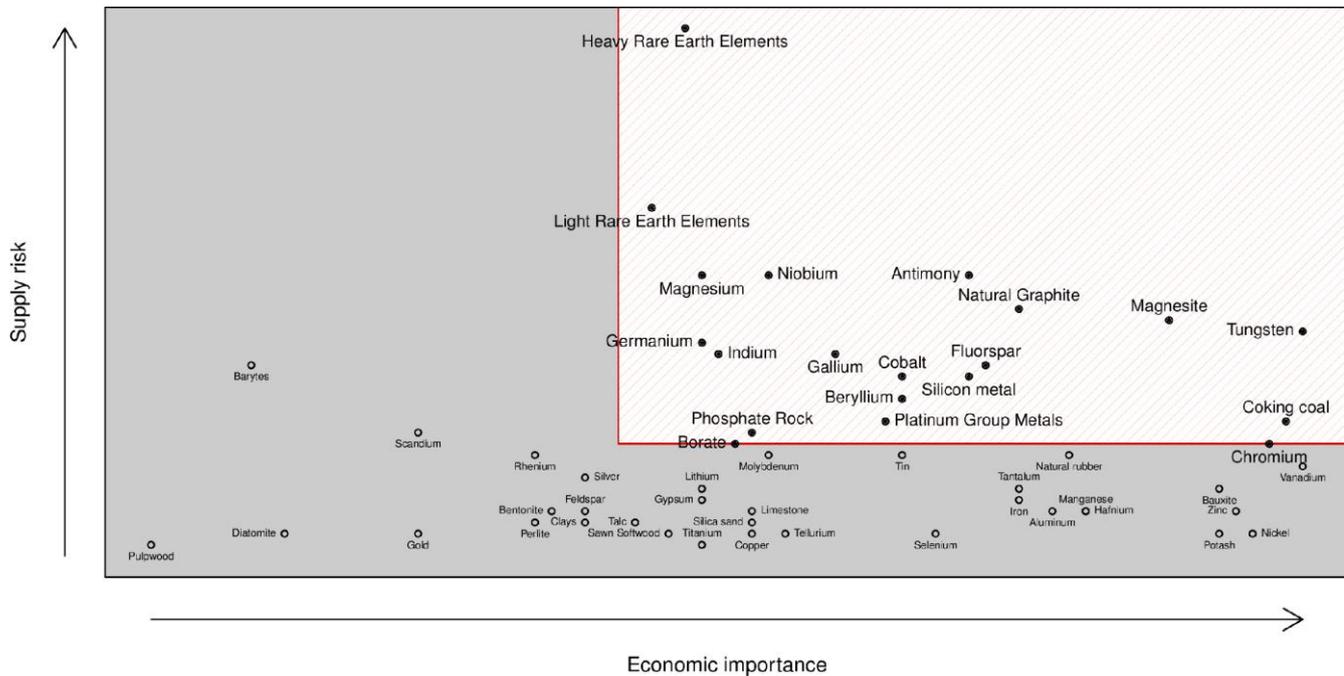


Figure 11- Graphique des matériaux critiques - zone en haut à droite – selon la commission européenne rapport 2014

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale.

L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

www.ademe.fr



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01