



HAL
open science

Matières premières et énergie, les enjeux de demain

Olivier Vidal

► **To cite this version:**

Olivier Vidal. Matières premières et énergie, les enjeux de demain. ISTE Group, 2018, 9781784054038. hal-02396831

HAL Id: hal-02396831

<https://hal.science/hal-02396831>

Submitted on 11 Dec 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Matières premières et énergie, les enjeux de demain

Olivier Vidal

1.1. Une consommation mondiale de matières premières minérales et d'énergie en forte croissance

L'industrialisation des pays actuellement développés a permis d'accroître la productivité de toutes les activités humaines et de remplacer le travail fourni par les hommes et les animaux par celui de machines alimentées par des sources d'énergie fossile. Cette industrialisation, initiée en Europe au XIX^e siècle et qui continue à se poursuivre actuellement dans les pays en voie de développement, entraîne de nombreux changements sociaux, économiques, démographiques et technologiques. Ces évolutions au niveau mondial sont illustrées par la croissance apparemment exponentielle de tous les indicateurs de prospérité, d'activité humaine et de ses impacts (Steffen et al., 2014). La croissance de la population et de sa proportion urbaine, l'augmentation de l'activité économique, des revenus moyens et du niveau de vie entraînent une croissance également exponentielle des besoins en énergie et en matières premières. (Fig. 1.1). L'humanité utilise actuellement les ressources minérales à un niveau jamais égalé avec environ 70 milliards de tonnes de extraites chaque année (Wiedmann et al., 2015). Les granulats, ciment, sable, métaux et minéraux industriels arrivent en première ligne car ils sont utilisés pour bâtir l'infrastructure urbaine, les biens de consommation et de production, dont la production et l'utilisation d'énergie. Le développement industriel et économique d'un pays peut être décomposé en deux grandes étapes :

– La première étape est marquée par la construction des infrastructures de base telles que les habitations, l'infrastructure et les moyens de transport et de communication, de production, transport et distribution d'énergie, l'industrie lourde, etc. La densité urbaine est également un facteur déterminant de la consommation résidentielle (Safirova et al., 2007). Le passage d'un mode de vie rural à urbain entraîne le passage d'une énergie tirée de la biomasse à une énergie fossile.

L'efficacité énergétique est en général accrue, mais les usages sont plus intensifs, avec par exemple l'utilisation de l'air conditionné. Entre 1990 et 2012, la part de la population chinoise résidant dans les villes est passée de 26 à 52%, et selon la banque mondiale, la consommation énergétique résidentielle a été multipliée par 4 sur la même période. D'après l'Agence Internationale de l'Energie (AIE, 2016), la consommation d'énergie pour le secteur résidentiel a progressé de 7.7%/an entre 1998 et 2012 et l'utilisation d'énergie par habitant a progressé avec le même taux

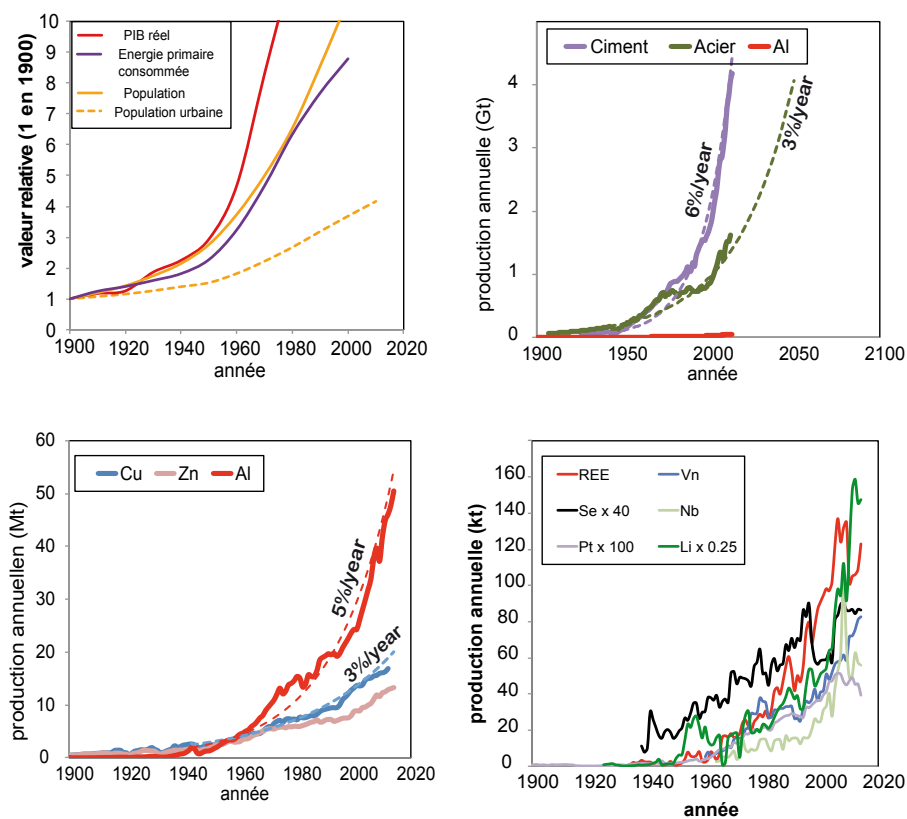


Figure 1.1 : Evolution historique des différents indicateurs de prospérité et activité humaine : a) évolution normalisée de la population mondiale, de la population urbaine, du PIB et de la quantité d'énergie primaire consommée ; b) à d) évolution de la production annuelle de ciment et divers métaux.

entre 2001 et 2012, alors que celle des pays de l'OCDE a baissé de 0.8%/an. Cette phase de développement consomme principalement des matières premières « structurales » comme le béton, l'acier et d'autres métaux de base comme le cuivre

et l'aluminium. Après une forte période de croissance, la consommation annuelle se stabilise ou commence à décliner (Bleischwitz et al., 2016) avec l'augmentation du niveau de vie, à partir d'environ US\$15000–20000 de produit intérieur brut (PIB) par habitant pour l'acier, US\$25000 pour le béton (Davidson, 2014) et US\$ 30000 pour le cuivre¹. Selon le Fonds Monétaire International, un nombre important de pays à forte population ont actuellement des PIB réels par habitant inférieurs à \$15000, dont la Chine, l'Indonésie, les Philippines, l'Inde, le Pakistan et certains pays Africains. Comme dans le cas des pays actuellement développés, leur émergence est inévitablement associée à une croissance de la consommation des matières premières utilisées pour la construction des bâtiments et des infrastructures de base. Cela est illustré par la croissance forte de consommation observée depuis le début des années 2000 (Figure 1.1) d'acier et de béton (+6%/an), d'aluminium (+5%/an), de cuivre (+3%/an), dopée par l'émergence très rapide des BRIC (Brésil, Russie, Inde, Afrique du Sud et bien évidemment Chine). Le chrome (+5%/an), le manganèse (+6%/an), le nickel (+5%/an) ou le zinc (+4%/an) suivent les mêmes tendances. Ainsi, l'accroissement de la population mondiale à 9 milliards d'habitants en 2050 et l'augmentation du niveau de vie des pays les plus pauvres, qui représentaient 85 % de la population mondiale en 2005 et ne consommaient que de l'ordre de 10% des métaux les plus courants (Figure 1.2), entraîneront certainement une forte augmentation des besoins en matières premières minérales jusqu'au milieu du XXI^e siècle. On estime que le stock maximal de fer et d'acier dans les sociétés développées est de l'ordre de 10 t par habitant (Rauch, 2009; Muller et al., 2011; Wiedmann et al., 2015). Au-delà de ce stock, le niveau de consommation correspond à celui nécessaire pour remplacer et maintenir le niveau de stock, soit environ 500 kg/habitant/an. À titre de comparaison, on estime que la moyenne mondiale actuelle des stocks de fer et d'acier par habitant est d'environ 2,7 t et la moyenne mondiale annuelle de consommation est d'environ 200 kg/habitant/an (Muller et al., 2006 ; Muller et al., 2011; Allwood et Cullen, 2012). Pour passer d'un stock actuel de 2,7 t/habitant pour une population de 7 milliards à un stock de 10/habitant pour 9 milliards d'individus, il faudrait produire un stock mondial de fer et d'acier de 71 Gt en supposant qu'il n'existe aucune perte. Cela représenterait 85% des réserves connues². D'après Grädel (2011) et Grädel et Cao (2010), la quantité totale de métaux à produire d'ici 2050 et le flux de métaux utilisés pourraient être égales à 5 à 10 fois les valeurs actuelles. Cela signifie que la quantité de métaux à produire d'ici 2050 pourrait être supérieure à la quantité totale produite jusqu'à aujourd'hui.

¹ <https://www.fxstreet.com/analysis/economic-monthly-report/2015/06/22>

² USGS Mineral Commodity Summaries, January 2017 https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_ore/mcs-2017-feore.pdf.

Dans une deuxième étape, quand les besoins en matières premières « structurales » se stabilisent, les pays développés s'orientent vers les hautes technologies, notamment dans les secteurs de l'électronique, l'automatisme, les technologies de l'information et de la communication (TIC), mais aussi ceux de l'énergie, l'amélioration de l'habitat, des chaînes de production et d'approvisionnement. Les hautes technologies nécessitent de nouvelles matières premières et ressources minérales. Au début du XX^e siècle, la consommation de métaux se limitait essentiellement au fer, au cuivre, au plomb et au zinc, à l'argent et à l'or, qui présentaient les propriétés physiques et chimiques basiques recherchées telles que la dureté, la malléabilité, la résistance à la corrosion, la densité, la conductivité ou la résistivité électrique. Les hautes technologies utilisent de nombreuses propriétés additionnelles, notamment la structure électronique, les propriétés catalytiques, quantiques ou semi-conductrices spécifiques de presque tous les éléments du tableau périodique. Les métaux rares deviennent nécessaires, qui

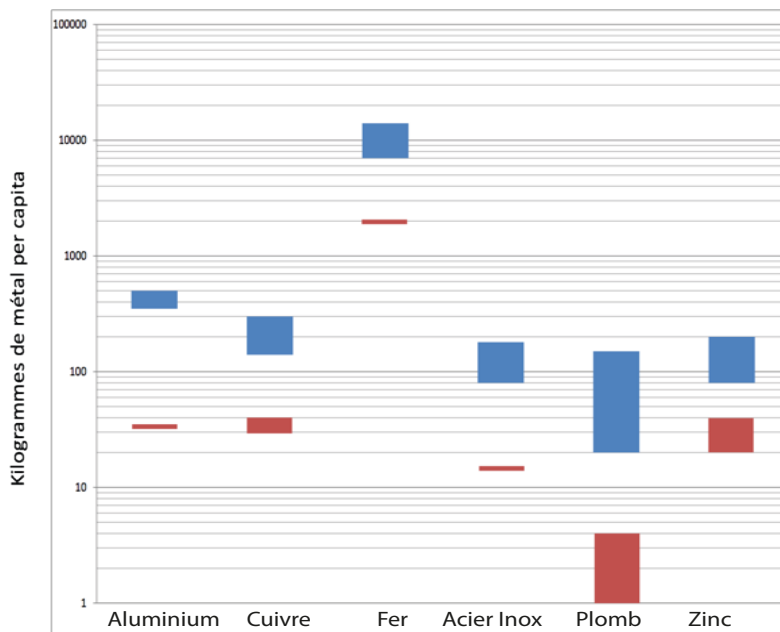


Figure 1.2 : Estimation du stock per capita de divers métaux. Les barres bleues désignent les pays les plus développés (860 M personnes), les barres rouges désignent les pays moins avancés (5600 M personnes)- Source des données : UNEP - 2010 - Metal stocks in society

sont utilisés depuis quelques décennies seulement et produits en quantité plus faible que les métaux de base, mais dont la croissance annuelle de production peut atteindre des records (de l'ordre de 10%/an pour antimoine, béryllium, cobalt,

gallium, germanium, lithium, molybdène et certaines terres rares, Figure 1.1). Ces énormes taux de croissance et la forte dépendance de la plupart des pays riches aux importations des métaux technologiques ont largement focalisé l'attention au cours de la dernière décennie. S'il reste certain que leur consommation continuera à croître dans le futur, une évaluation quantifiée reste pourtant difficile, car elle dépend de la rapide mais difficilement prévisible évolution technologique. C'est là une grande différence par rapport aux ressources minérales structurales qui ne peuvent pas être substituées pour toutes leurs applications. Une autre différence est que les métaux technologiques sont souvent des sous-produits de l'extraction d'un métal majeur qui porte la rentabilité financière de la mine. Si la demande d'un métal sous-produit augmente, il n'est pas possible d'augmenter la production, car c'est la demande du métal porteur qui détermine le niveau de production.

La croissance de la consommation en matières premières et en énergie résulte de trois facteurs principaux : la croissance démographique, le développement industriel et l'augmentation du niveau de vie moyen. Ces évolutions s'accompagnent d'une augmentation massive de l'exploitation de matières premières minérales de plus en plus diversifiées avec tout d'abord l'acier, le ciment et le cuivre, les métaux légers (Al, Mg...), puis les métaux rares et les matières très pures pour les hautes technologies, comme les terres rares ou le silicium par exemple. Entre 1940 et 2010, la population mondiale a été multipliée par 3 alors que pendant la même période, la consommation a été multipliée par 50 pour le ciment, 8 pour l'acier et le manganèse, 7 pour le cuivre et le zinc, 25 pour le platine et bien plus pour tous les éléments utilisés dans les hautes technologies. Cette croissance ne devrait pas fléchir au niveau mondial pour les décennies à venir, car nous sommes dans un contexte très dynamique qui résulte de la concomitance de la croissance spectaculaire de l'économie chinoise et l'émergence rapide de hautes technologies. Le reste de l'Asie, l'Inde et l'Afrique ont la possibilité de suivre l'évolution chinoise et les projections actuelles indiquent que pour satisfaire les besoins de l'humanité d'ici 2050, nous devons extraire du sous-sol plus de métaux que l'humanité n'en a extrait depuis son origine.

1.2. Ressources minérales et énergie dans le cadre de la transition énergétique

L'invention de la machine à vapeur a été à l'origine de la révolution industrielle, des échanges de matières au niveau mondial et de la demande croissante en ressources minérales dont les métaux. L'utilisation du cuivre a permis d'augmenter l'efficacité des chaudières. En alliage avec l'étain, il a permis de produire du bronze, utilisé pour les roulements nécessaires à de nombreux dispositifs mécaniques, dont les machines-outils. Les producteurs d'acier ont ensuite constaté les bénéfices liés à

L'addition de chrome et de manganèse. L'invention du moteur à explosion a été une deuxième révolution qui a engendré la production de toute une infrastructure de production et de transport d'hydrocarbures, de son traitement par l'industrie pétrochimique et gazière, mais également des différents moyens de locomotion et véhicules personnels produits en masse depuis une centaine d'années. Cette évolution rapide a été possible car l'humanité avait accès à une énergie fossile facile à produire et sans contrainte d'utilisation, donc bon marché. Une telle situation n'est pas pérenne, car les émissions massives de dioxyde de carbone, de particules et autres composants liés à la combustion ont des conséquences environnementales dramatiques, que ce soit sur le climat et le réchauffement climatique ou la qualité de l'air dans les grandes agglomérations. Les accords de Paris (COP 21)³ prévoient d'atteindre la « neutralité carbone » dans la deuxième moitié du XXI^e siècle et une réduction massive des émissions de dioxyde de carbone d'ici 2050. Cela nécessitera une révision profonde du système énergétique existant qui est principalement basé sur les hydrocarbures fossiles et le charbon au niveau mondial, et éventuellement une diminution importante de la quantité d'énergie utilisée. Le passage à une énergie moins émettrice en carbone exige de nouveaux matériaux. Cela est vrai aussi bien pour le secteur nucléaire que pour la production, le stockage et la distribution d'électricité générée à partir de sources renouvelables. Dans tous les cas, de nouvelles infrastructures doivent être construites en utilisant des matières premières « structurales », tels que l'acier, l'aluminium ou le cuivre, mais également des métaux plus rares : néodyme, praséodyme et dysprosium dans les super-aimants de certaines éoliennes, tellure, indium, gallium sélénium pour les couches minces photovoltaïques, lithium pour les batteries des véhicules hybrides ou électriques, etc. Toutes ces matières premières demandent beaucoup d'énergie pour être produites : à l'heure actuelle, environ un quart de l'énergie consommée mondialement par l'industrie est utilisée pour la seule production d'acier, de ciment et d'aluminium. Il est donc prévisible que la transition énergétique sera au moins dans un premier temps une cause de surconsommation d'énergie fossile, et qu'elle s'accompagnera également d'une surconsommation de métaux.

Assurer la transition vers les énergies bas-carbone et la sobriété énergétique est certainement un enjeu important du XXI^e siècle, mais ce n'est pas le seul. Cette évolution devra se produire pendant une période d'urbanisation croissante, qui elle aussi est associée à des besoins croissants en matières premières et en énergie : les

³ Intergovernmental Panel on Climate Change. 2011 Working group III: mitigation of climate change, vol. 2011. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change : <http://www.ipcc-wg3.de/>.

viles consomment environ 80% de la production d'énergie mondiale et produisent 75% des émissions de gaz à effet de serre. Si l'on imagine une réduction de 50% de l'énergie utilisée au niveau mondial pour le secteur des matières premières (Allwood et al., 2010 ; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011²; United Nations Foundation, 2007⁴) et un doublement de la demande en matières premières pour les pays en voie de développement, il faudrait réduire de 75% la consommation d'énergie utilisée pour la production des matières premières actuellement dominée par l'acier, le ciment, l'aluminium, le papier et les plastiques. Certaines études suggèrent que cela sera difficilement réalisable (Gutowski et al., 2013) et en tout état de cause, une forte réduction des émissions de gaz à effet de serre dans un contexte de forte croissance de la demande en matières premières amène de nouvelles contraintes qui doivent être prises en compte et anticipées. Cela concerne les conditions et les technologies de la transition énergétique, qui sont étroitement couplées à celles de la production des matières premières. En 2010, 1,4 milliard de personnes, soit 20% de la population mondiale, n'avait pas accès à l'électricité (Sathaye et al., 2011) et 2,7 milliards de personnes, soit 40% de la population mondiale, cuisinaient en utilisant la biomasse de manière non durable (AIE, 2010a). Assurer un accès sécurisé à l'électricité et le maintien de vecteurs d'énergie pour tous et pour nos utilisations quotidiennes ne se résume pas à la disponibilité de la source primaire, mais également à celle de toute l'infrastructure nécessaire à sa capture, traitement, stockage, distribution et utilisation. Les enjeux liés à l'énergie et aux matières premières minérales sont donc étroitement liés, d'une part car la production de ces matières premières nécessite de l'énergie, (sujet détaillé dans les chapitre 3), d'autre part car les besoins en matières premières pour le secteur de l'énergie sont variés. Ces sujets sont discutés dans les chapitres 4 et 5 et 6.1.

1.3. Vers la pénurie des ressources minérales ?

Si les tendances de croissance à long terme de la population et de la prospérité se poursuivent comme par le passé, le stock global de métaux à produire d'ici 2050 pourrait correspondre à 5 à 10 fois le niveau actuel (Grädel, 2011). La Terre reste un réservoir immense d'éléments dont l'accessibilité est cependant limitée par nos capacités à identifier et accéder à la ressource lorsque celle-ci est profonde et cachée, à anticiper les risques géopolitiques et à maîtriser les impacts

⁴ United Nations Foundation (2007) Realizing the potential of energy efficiency: targets, policies, and measures for G8 countries. Washington, DC. http://aceee.org/files/pdf/conferences/mt/2008/plenary_chandler_supp.pdf

environnementaux et sociaux associés à l'extraction. L'augmentation exponentielle de la demande en la plupart des ressources fossiles depuis un siècle pose la question de leur « finitude ». Les restrictions éventuelles de l'offre affecteraient gravement nos sociétés, comme cela a déjà été le cas au cours de l'histoire de l'humanité (Tainter, 1988, Turchin et Nefedov, 2009, Chase-Dunn et Hall, 1997, Motesharrei et al., 2014). Différents travaux suggèrent que la production de nombreuses ressources fossiles a atteint un pic ou atteindra ce pic au cours du siècle (voir Laherrère, 2010 ; Kerr, 2014; Northey et al., 2014; Sverdrup et Ragnasdottir, 2014 ; Sverdrup et al., 2014 pour le cas du cuivre). Ces travaux soutiennent que les tendances actuelles de croissance démographique et de consommation de ressources fossiles sont insoutenables. Au début des années 70, Meadows et al. (1972) ont exprimé les mêmes craintes et anticipaient l'épuisement de nombreuses ressources dans un délai court. Cela n'a pas été le cas, car l'amélioration des technologies a permis de découvrir de nouveaux gisements et d'exploiter ceux qui n'étaient pas exploitables à coûts raisonnables avec les technologies passées. Les réserves connues de nombreux métaux sont d'ailleurs plus importantes aujourd'hui que celles connues il y a 50 ans, et la durée avant épuisement des réserves connues est restée relativement constante au cours du siècle dernier. Il reste néanmoins certain que la croissance exponentielle de la consommation en matières premières ne pourra pas continuer indéfiniment, car notre planète est de dimension finie. Cela n'est pas forcément un problème, car une croissance infinie n'est pas nécessaire. La demande devrait se stabiliser à plus ou moins long terme, quand tous les pays auront un niveau de développement homogène et un PIB/habitant correspondant au niveau de saturation. A ce stade, le recyclage des stocks de métaux immobilisés dans l'anthroposphère pourrait constituer la principale source de matière première. Avant d'atteindre ce stade, l'augmentation de la part du recyclage et d'une manière générale de l'économie circulaire ne sera pas suffisante pour subvenir aux besoins. En effet, nous ne pouvons recycler qu'une partie des biens de consommation et d'équipement qui a été créée il y a plusieurs décennies, alors que le niveau de consommation des matières premières était beaucoup moins élevé que les besoins actuels. Pendant cette période de croissance, le maintien de la croissance de production pose plusieurs questions qui ne sont pas nouvelles mais qui restent pertinentes. Elles concernent le possible épuisement des ressources avant d'atteindre le stade de saturation et notre capacité à maintenir un doublement de la production en matières premières minérales tous les 15 à 20 ans, comme cela fut possible dans le passé. Ce sujet est abordé dans le chapitre 6.2 par la modélisation dynamique.

Généralités sur les matières premières minérales et les métaux

2.1. Délocalisation des productions primaires et dépendance des pays industrialisés à l'importation

Bien que le siècle dernier ait été marqué par une très forte augmentation de la consommation en matières premières énergétiques fossiles et en métaux, le prix des métaux de base a en moyenne évolué de manière beaucoup plus modérée (Figure 2.1). L'indicateur de prix calculé sur la valeur, en US\$ constants, d'un panier de 17 matières premières minérales couramment employées est resté relativement constant au XX^e siècle, avant d'augmenter fortement au début des années 2000, notamment sous l'effet de la croissance spectaculaire de l'économie chinoise. La variation

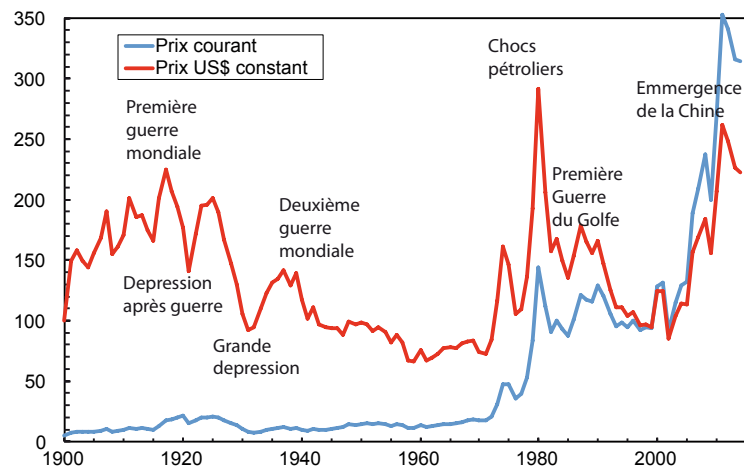


Figure 2.1: Evolution du cours annuel moyen, d'un panier de 17 matières premières minérales (Al, Be, Fe, Cr, Co, Au, Pb, Mn, Hg, Mg, Mo, Ni, Pt, Ag, Sn, Tn, Zn), en US\$ constants (base 100 en 1900) et courants (base 5 en 1900) et grands événements historiques ayant pesé sur l'évolution des cours. Source des données : U.S. Geological Survey : <http://minerals.usgs.gov>

historique des cours moyens annuels a été par ailleurs marquée par les conflits du XX^e siècle. La stabilité des prix en monnaie constante, malgré l'augmentation massive de la consommation, est liée aux progrès technologiques survenus depuis le début du XX^e siècle, qui ont permis d'augmenter la productivité et l'exploitation de gisements moins concentrés, mais aussi à une délocalisation de la production dans des pays à plus faible PIB, où les coûts de productions sont plus faibles. La chute de l'URSS et l'accalmie résultante des tensions géopolitiques, combinée à des cours bas signalant une offre abondante, ont entraîné un désintérêt politique dans la plupart des pays occidentaux vis à vis des enjeux liés aux ressources minérales. Jusqu'au début des années 2000, la logique de dérégulation des marchés et de l'ouverture à la concurrence était censée favoriser les conditions nécessaires à l'approvisionnement en réponse à une demande croissante en matières premières au niveau mondial. A ce jeu, et souvent du fait de l'absence de contraintes globales sur les impacts environnementaux et humains liés à l'exploitation des ressources, certains pays ont obtenu une position de quasi-monopole de production. C'est le cas de la Chine pour les Terres Rares et d'autres éléments critiques comme l'antimoine, le gallium, la fluorine, le germanium, le graphite, l'indium ou le tungstène. C'est aussi également le cas de l'Afrique du Sud (platinoïdes), de la République Démocratique du Congo (cobalt, tantale), du Brésil pour le niobium, et des Etats-Unis pour le béryllium. Le cas des Terres Rares est emblématique. Contrairement à ce que leur nom peut laisser penser, toutes les Terres Rares ne sont pas rares, les réserves mondiales d'oxyde de Terres Rares étant estimées à 115 millions de tonnes en 2011⁵ pour une consommation annuelle de 150 à 200 mille tonnes à l'horizon 2014. Avant 1965, les Terres Rares étaient extraites en Afrique du Sud, Brésil, Inde (10 kt/an), puis de 1965 à 1985, aux USA (50 kt/an). A partir de 1985, avec une production > 100 kt/an, la Chine a pris le monopole de production à plus de 95 %, alors que ses réserves sont estimées à 35% des réserves mondiales. La principale raison est d'ordre économique : le gisement de Terres Rares de Bayan Obo, en Mongolie occidentale, a été exploité initialement pour le fer, les Terres Rares ont été un bonus avec un coût d'extraction du minerai gratuit. D'autres raisons sont d'ordre environnemental et social: les techniques d'exploitation utilisées n'ont pendant longtemps pas pris en compte les coûts sociaux, sanitaires et environnementaux de l'extraction. Des techniques extrêmement polluantes qui ne seraient pas envisageables dans les pays développés ont été adoptées, qui ont entraîné des pollutions par les actinides (thorium, uranium et le radium) naturellement associés

⁵ Mineral Commodity Summaries 2014 - United States Geological Survey - (Reston., Virginia, USA) <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>

aux Terres Rares. Dans les pays occidentaux, les déchets miniers de l'extraction de terres Rares s'apparentent aux déchets radioactifs et sont soumis à une réglementation contraignante, dont le respect augmente les coûts d'extraction. C'est une des raisons qui ont poussé ces pays à limiter ou cesser leur production. Dès

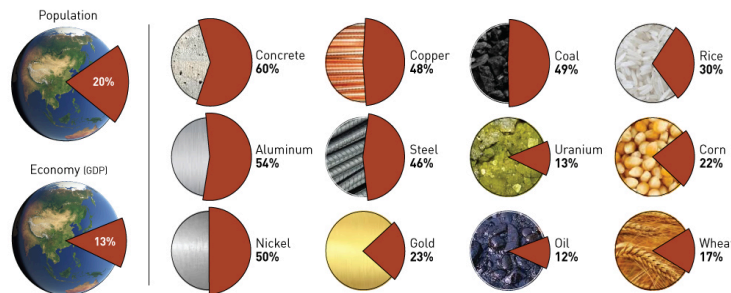


Figure 2.2: proportions de matières premières mondiales consommées par la Chine. Source : <http://www.visualcapitalist.com/china-consumes-mind-boggling-amounts-of-raw-materials-chart/>

2005, la Chine a annoncé que les conséquences environnementales de sa production devaient être traitées et en 2010, le gouvernement Chinois a annoncé que les problèmes environnementaux étaient tels qu'ils devaient diminuer leur production et exportations. On imagine aisément que d'autres raisons stratégiques et politiques ont motivé cette décision. Mais quelles qu'en soient les causes, la diminution des exportations a été un signal d'alarme et en quelques années, des centaines de projets miniers de Terres Rares ont vu le jour hors de la Chine. Cela confirme que les monopoles de production ne sont pas une fatalité géologique. Il existe d'ailleurs un important potentiel de découverte de gisements de métaux riches et affleurant dans des pays où les investissements dans l'exploration minière moderne ont été faibles ou inexistantes par le passé. L'Union Européenne, dont le patrimoine minéral n'est que partiellement connu, présente également des potentiels (Rabinovitch, 2012). Les obstacles d'une extraction primaire dans les pays riches ne sont pourtant pas seulement liés à la présence ou non de ressources. L'extraction nécessite aussi de réunir les conditions sociales, économiques et réglementaires acceptables. Cela est favorisé par la large amélioration des technologies d'extraction et de production depuis les années 80, qui peuvent rendre possible et acceptable ce qui ne l'était pas il y a 30 ans d'un point de vue économique et environnemental.

Si la rupture d'approvisionnement en matière première ne s'est jamais matérialisée au XX^e siècle, d'importantes tensions se sont manifestées à plusieurs reprises. Le paradigme économique qui a prévalu jusqu'ici pour garantir les approvisionnements

des pays riches non producteurs a été l'existence d'activités minières dans des pays souvent plus pauvres et la disponibilité sur un marché supposé non faussé de matières premières brutes pouvant être importées pour être transformées en produits à forte valeur ajoutée par l'industrie nationale. Ce modèle a bien fonctionné au cours du XX^e siècle mais il est obsolète aujourd'hui, notamment en raison du

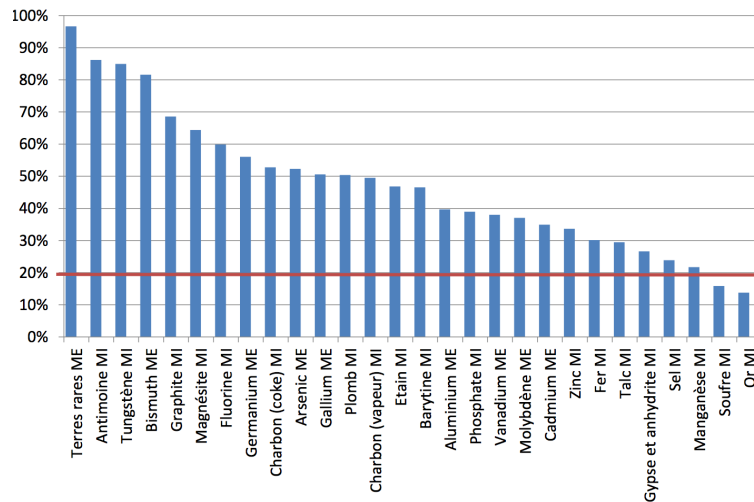


Figure 2.3: Part mondiale de la Chine en 2011 dans la production minière ("MI" après le nom de la matière première) ou métallurgique ("ME"). La barre rouge représente la part de la population chinoise dans la population mondiale – Source des données de production : Reichl et al. (2013)

développement très rapide de la Chine en tant qu'acteur majeur de l'industrie minérale mondiale, avec une politique d'acquisition de droits d'exploitation de ressources hors de son territoire, et absorbant une part très importante des productions mondiales de la plupart des matières premières minérales (Figure 2.2) afin d'assurer la production de biens industriels à forte valeur ajoutée sur son territoire (notamment dans le domaine de l'énergie, avec la production de cellules photovoltaïques ou d'éoliennes à entraînement direct et de génératrices synchrones à aimants permanents (Nd-Fe-B +/- Dy)). La Figure 2.3 montre la part de la production minière et métallurgique en 2011 de la Chine pour les 28 matières premières minérales dont elle a été, cette année-là, le premier producteur mondial. La production n'est pas destinée à répondre aux besoins des industries aval de pays riches, mais à alimenter l'industrie aval établie en Chine. La volonté de ne plus exporter de matières premières minérales brutes à faible valeur ajoutée, mais de développer des avals industriels à haute valeur ajoutée est partagée par un nombre croissant de pays producteurs. Ceci se traduit par la multiplication de barrières

tarifaires et non-tarifaires restreignant le libre commerce international des matières premières minérales. L'OCDE ⁶ recensait en 2014 plus de 9000 mesures individuelles prises par 69 pays sur les restrictions aux exportations des matières premières minérales.

2.2. Aléas et vulnérabilité de l'approvisionnement

Alors que pays les riches non producteurs de matières premières devenaient dépendants de l'importation (l'Europe par exemple consomme 20% de la production mondiale de matières premières alors qu'elle en produit moins de 5%), ils ont sous-investi dans les technologies et la recherche sur les matières premières minérales. Cela ne concerne pas seulement la partie amont de la chaîne de valeur, mais également la partie métallurgie dont la situation en France par exemple a été jugée « inquiétante » et en passe de « devenir rapidement catastrophique » dans un rapport de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies⁷. Une bonne maîtrise des technologies de métallurgie et l'innovation dans ce domaine sont pourtant des clefs non seulement pour la production primaire, mais également pour optimiser la capacité de recyclage des métaux et d'une manière générale l'économie circulaire. La métallurgie est aussi un secteur en lien fort avec des applications industrielles stratégiques, dans le domaine de l'énergie avec l'industrie des transports, le nucléaire et l'industrie de transformation thermique de l'énergie, ainsi que l'éco-conception⁸.

Les problèmes spécifiques à l'industrie minérale sont nombreux et variés. Ils incluent la baisse progressive de la teneur des gisements, l'augmentation des investissements nécessaires à la mise en production et des coûts de production, les difficultés d'accès aux ressources, ou le manque de découverte de gisements de haute qualité. Les grands gisements de minerais très concentrés, affleurant et situés dans les grands pays producteurs de l'OCDE présentant les conditions d'une exploitation minière responsable ont probablement été découverts. Cela ne signifie pas la pénurie, mais l'épuisement progressif des zones enrichies et proches de la surface, oblige à exploiter des gisements de moins en moins concentrés. Certains

⁶ « Restrictions on Exports of Raw Materials" online database - OECD (Paris, France) - <http://qdd.oecd.org/subject.aspx?subject=8F4CFFA0-3A25-43F2-A778-E8FEE81D89E2>

⁷ <http://www.france-metallurgie.com/pour-la-metallurgie-en-france-l'academie-des-sciences-et-l'academie-des-technologies-s'engagent.../>

⁸ La Métallurgie en France, une nécessité d'innovation, rapport du ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, 2005, <https://archives.entreprises.gouv.fr/2012/www.industrie.gouv.fr/enjeux/metal.pdf>.

déchets des mines d'autrefois sont d'ailleurs aussi concentrés en métaux que certains grands gisements actuellement en exploitation. Ces évolutions entraînent de nombreux aléas qui peuvent affecter les filières industrielles du secteur des ressources et impacter les pays importateurs et leurs industries utilisatrices de matières premières:

– Les aléas politiques et institutionnels : Absence ou changement de politique de l'État, manque de cohérence des réglementations (droit environnemental, fiscal, minier, du travail ...) ayant un impact sur l'industrie minière, faiblesses du cadre institutionnel, mauvaise gouvernance, manque de transparence, corruption, mise en place de barrières tarifaires et non tarifaires restreignant l'exportation de la production de ces produits dérivés, infrastructures déficientes d'alimentation en eau et/ou en électricité et/ou en autres intrants du réseau d'infrastructures de transport

– Les aléas économiques : Volatilité des cours des matières premières, baisse des teneurs, augmentation du coût de l'énergie et des équipements, baisse de la demande (mutations technologiques et évolutions réglementaires), barrières tarifaires et non-tarifaires affectant le marché des matières premières, utilisation de positions de monopole comme instrument géopolitique, coût des investissements nécessaires au projet industriel, coût des garanties exigées par l'État, des assurances

– Les aléas environnementaux : Epuisement et/ou pollution des ressources en eau, pollution des sols, érosion; pollution de l'air, rejets toxiques, risques liés à la stabilité des terrains affectés par exploitation minière, aux venues d'eau, risques de rupture des retenues de déchets miniers, de résidus de laveries, de scories métallurgiques, événements climatiques exceptionnels (sécheresse, crues, inondations)

– Les aléas géologiques : séismes, tsunamis, volcanisme, glissements de terrain, subsidence

– Les aléas techniques : Tarissement des compétences techniques nécessaires à l'industrie minière, mauvaise estimation des réserves, limites technologiques de concentration de substances diluées (matériaux primaires ou produits en fin de vie)

– Les aléas sociétaux : Différences culturelles non gérées entre l'opérateur minier et les populations impactées par le développement minier, opposition au développement de l'industrie minière, manque d'informations et de données fiables relatives à l'industrie minière, grèves, guerres civiles

Ces aléas sont tout aussi importants à considérer que la disponibilité des ressources. Ali et al. (2017) montrent que 1/3 des réserves actuelles mondiales de cuivre primaire sont situées dans des pays dont la gouvernance est jugée non compatible avec le « Resource Governance Index » international publié en 2013 par le Revenue

Watch Institute⁹. Cet index, qui mesure la qualité de la gouvernance dans les secteurs pétrolier, gazier et minier de 58 pays produisant 85 % du pétrole, 90 % des diamants et 80 % du cuivre dans le monde, évalue la qualité de quatre composantes clés de la gouvernance: Le cadre institutionnel et juridique, les pratiques de déclaration, les garanties et les contrôles de qualité, l'environnement. Onze pays producteurs, soit moins de 20 % des pays étudiés, ont des normes satisfaisantes de transparence et de responsabilité. Cette situation engendre un risque supplémentaire d'approvisionnement, en particulier si les matières premières sont produites dans un nombre réduit de pays. La perception des aléas et de la vulnérabilité qui en résulte a motivé de nombreux travaux d'information, d'analyse et de définition de stratégies¹⁰. Les enjeux économiques, sociaux, environnementaux et industriels sont en effet de première importance et il faut envisager que dans le futur, les conditions d'approvisionnement des pays riches pourraient ne plus être assurées par la seule production hors de leur frontières à coûts contenus, comme cela a été le cas depuis une cinquantaine d'années.

2.3. Le recyclage des déchets

Le recyclage des déchets est un impératif environnemental et il pourrait devenir la source majeure de métaux dans la deuxième moitié du XXI^e siècle (voir Chapitre 6). Dans le cas des métaux, deux grands types de déchets sont intéressants : les produits en fin de vie et les déchets miniers et de fonderie. Dans les deux cas, les gisements potentiels sont énormes même si les évolutions réglementaires sont de plus en plus contraignantes et les produits en fin de vie et les alliages de métaux qu'ils contiennent deviennent de plus en plus compliqués et difficiles à recycler.

2.3.1 Les déchets de production primaire

Le type, la quantité et les propriétés des déchets miniers produits dans différentes mines varient selon la ressource exploitée, la technologie de production et la géologie du site exploité. Les progrès technologiques et la modification de la réglementation ont entraîné des évolutions positives de gestion des déchets au cours des 10 à 20 dernières années (Lottermoser, 2011 ; 2012) et un plan de gestion des déchets approprié est maintenant exigé avant de délivrer un permis d'exploitation. Différentes directives sur la gestion des déchets, y compris après la fermeture des

⁹ http://www.resourcegovernance.org/sites/default/files/rgi_2013_Eng.pdf

¹⁰ Exemple Français : <http://www.assemblee-nationale.fr/13/rap-info/i3880.asp>

mines ont également été élaborées au niveau international. Le terme «déchets» fait ici référence au matériel issu de la production primaire qui n'a pas de valeur économique au moment de cette production. Ces déchets incluent:

– Les déchets rocheux qui sont des granulats avec des teneurs en métaux pouvant être importantes. Ces déchets peuvent être retraités pour en extraire les métaux, ou utilisés comme remblai, comme matériaux et agrégats de construction. Il existe beaucoup de recherche sur le potentiel d'extraction de métaux à partir de déchets miniers avec des méthodes plus ou moins conventionnelles. Un exemple intéressant est celui de BacTech Environmental Corporation¹¹ créé en décembre 2010, qui utilise une technologie brevetée de bio-lixiviation pour le traitement des résidus miniers toxiques chargés d'arsenic. Le processus permet de stabiliser l'arsenic et d'oxyder les sulfures des résidus miniers et donc d'éliminer la source majeure de production acide. Enfin, la technologie récupère les métaux précieux et de base des résidus. La technologie permet de traiter des déchets miniers accumulés par des années d'exploitation en optimisant les conditions de vie de bactéries existantes et bénignes pour l'homme et l'environnement. Une fois le traitement terminé, les résidus inertes peuvent être utilisés comme remblais. Un autre exemple est décrit par Malvoisin et al. (2013), qui proposent d'utiliser des approches géomimétiques pour produire des oxydes de fer utilisables pour les pigments par exemple et de l'hydrogène très pur à partir de déchets de fonderie par réaction hydrothermale.

– Les résidus de roches finement broyées et les déchets de traitement des minéraux. Les résidus peuvent contenir des produits chimiques de traitement stockés dans des lagunes de sédimentation entourées par des barrages construits. Dans les années 1970, il y a eu 44 défaillances de barrage de résidus, 27 défaillances dans les années 80 et 7 dans les années 1990 (Rajaram et Melchers, 2005). Des résidus de manganèse ont été utilisés dans l'agroforesterie, les revêtements, la résine ou le verre et les glaçures. Les résidus riches en argile sont utilisés pour fabriquer des briques, carrelages et ciment.

– Les scories, qui sont des sous-produits non métalliques provenant de la fusion des métaux. Les scories sont en grande partie bénignes pour l'environnement et généralement utilisées comme agrégats dans le béton ou les routes. La boue rouge de bauxite est un résidu alcalin solide produit dans les raffineries d'aluminium. Elle peut être utilisée dans le traitement des eaux usées ou comme une matière première pour le verre, les céramiques et les briques.

¹¹ <http://www.bactechgreen.com/s/Home.asp>

– l'eau des sites miniers doit être traitée avant d'être rejetée dans l'environnement. Dans les cas extrêmes où la boue résiduelle est riche en éléments toxiques comme le cadmium, le mercure ou l'arsenic, elle peut être classée comme un déchet dangereux et nécessite un traitement spécifique (Younger et al., 2002)

– Les déchets gazeux: Les déchets gazeux comprennent les poussières et les oxydes de soufre produites au cours de la pyrométallurgie. Les technologies actuelles permettent d'éliminer jusqu'à 99,7 % de la poussière et des fumées et 80 à 95 % des émissions d'oxyde de soufre. Au Canada par exemple, les émissions de dioxyde de soufre des fonderies de métaux ont diminué de 37 % entre 2003 et 2010¹². Les résidus peuvent être utilisés pour la fabrication d'acide sulfurique.

2.3.2 Les produits en fin de vie

Dans un monde qui consomme des produits manufacturés en croissance exponentielle, la possibilité de recycler les métaux devient un enjeu majeur. Les questions du recyclage sont abordées de manière détaillée dans de nombreux ouvrages, dont celui publié par l'UNEP (2013) qui dresse un panorama très complet de ses difficultés et enjeux. Le présent chapitre ne fait que survoler la question et le lecteur intéressé est invité à lire le rapport de l'UNEP qui est extrêmement bien documenté et fait référence aux travaux majeurs sur la question.

Il existe de vastes «stocks cachés»¹³ de matières premières dans les pays industrialisés. On estime par exemple que la ville de Sydney contient de cuivre de 600 kg par habitant (UNEP, 2011). Les 10 milliards de téléphones portables vendus dans le monde jusqu'en 2010 contiennent 2500 t d'argent, 240 t d'or, 90 t de palladium, 90 000 t de cuivre et 38 000 t de cobalt. Une tonne de téléphone contient 10 à 30 fois plus d'or qu'une tonne de roche de gisement d'or exploité. Pour l'année 2007, les stocks de Terres Rares dans les produits manufacturés ont été estimés à 448000 t, dont 144000 t de cérium et 137000 t de néodyme. Le néodyme métallique, qui est un composant important des aimants permanents, peut être trouvé dans les ordinateurs (40000 t), les systèmes audio (31000 t), les éoliennes (18000 t) et dans les voitures (18000 t). Les stocks de matières premières d'origine anthropique sont cependant dispersés et n'ont qu'un potentiel limité d'exploitation. Nokia estime par

¹² Canada, Environment Canada. National Pollutant Release Inventory. 2012: <http://www.ec.gc.ca/inrp-npri/default.asp?lang=En&n=4A577BB9-1>.

¹³ Ces stocks incluent des biens en usage qui ne sont pas disponibles immédiatement,

exemple que seuls 2 à 3% des téléphones mobiles vendus sont recyclés¹⁴. Selon l'European Electronics Recycling Association, seule une fraction de 25 à 35 % des cartes électroniques sont démontées avant broyage des déchets d'équipements électriques et électroniques en Europe. A l'heure actuelle, des taux élevés (> 30%) de collecte et de recyclage des produits en fin de vie ne sont atteints que pour certains métaux de base tels que le fer, l'aluminium, le cuivre, le molybdène, et les métaux précieux. Pour les métaux spéciaux comme les Terres Rares, l'indium, le tellure ou le tantale, les taux de recyclage au niveau mondial restent faibles et se situent globalement au-dessous de 1 % (UNEP, 2013). Les chiffres sont toutefois variables selon les régions du monde : l'International Copper Study Group (2013)¹⁵ annonce par exemple des taux de recyclage de l'ordre de 40 % pour le cuivre en Europe et les données de l'USGS indiquent un taux de 33 % aux Etats Unis pour 2010-2014¹⁶. Une partie des différences peut s'expliquer par différentes définitions du taux de recyclage. Glöser et al. (2013) reportent 6 indicateurs différents du recyclage de cuivre pour la période 2000-2010 : le taux de collecte des produits en fin de vie (CR) et taux d'efficacité du recyclage (RER) sont d'environ 60 %, le taux de recyclage du cuivre des produits en fin de vie (EOL-RR) est de 45 %, la fraction de vieux déchets dans le matériel recyclé (Old Scrap Ratio, OSR) est de 50 %, le taux de métal recyclé est de 35 %, et la part de métal recyclé par rapport à la production totale est de 15 à 20 %. Grädel et al. (2011) et UNEP (2011) indiquent quant à eux que le taux de recyclage mondial du cuivre (EOL-RR), défini comme le rapport entre le flux de métal réellement recyclée et le flux de métal dans les produits en fin de vie est > 50 %. Deux valeurs de OSR sont reportées dans le rapport UNEP (2013) : celle de Goonan (2010a) qui est de 24 %, et celle de Grädel et al. (2004) qui est de 78 %. Des différences notables existent donc, même pour des métaux bien documentés comme le cuivre. La quantification précise reste en effet difficile en raison des difficultés mentionnées par les auteurs, qui incluent la mesure des flux dans un grand nombre de pays et pour des secteurs industriels très différents. Deux autres difficultés méritent d'être discutées :

– les taux de recyclage reportés dans la littérature font quelquefois l'amalgame entre les vieux déchets et le recyclage de chutes de production. Dans le premier cas, il s'agit d'un vrai recyclage de matériel dans des produits en fin de vie. Dans le deuxième cas, il s'agit de recycler du métal qui n'a jamais été utilisé. Pour cette raison, un fort taux de recyclage ne signifie pas nécessairement que la chaîne de

¹⁴ <https://www.cnet.com/news/nokia-kiosks-collect-phones-for-recycling/>

¹⁵ <http://www.icsg.org/index.php/component/jdownloads/finish/170/1188>

¹⁶ <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/recycle/myb1-2014-recyc.pdf>

valeur soit vertueuse et que les déchets soient bien recyclés après usage. Un fort taux de recyclage peut aussi indiquer une efficacité médiocre d'utilisation des métaux avec une production importante de chutes au moment de l'usinage des pièces. Dans ce cas, le flux de recyclage provient de métal qui est devenu un déchet avant d'avoir été utilisé. La quantité d'énergie pour produire une masse de métal utilisée est alors plus importante que celle, idéale, qui correspondait à un seul cycle de production si les chutes durant la production de produits manufacturées étaient nulles.

– une partie des produits en fin de vie est recyclée en-dehors du pays où ils ont été utilisés, notamment dans des pays où le devenir des déchets n'est pas forcément quantifié. La régulation européenne restreint la possibilité d'enfouissement des déchets et impose des conditions de recyclage respectueuses de l'environnement (donc coûteuse car nécessitant un investissement important). Une conséquence de ces régulations est l'exportation massive de déchets vers les pays asiatiques et l'Afrique, où le recyclage peut se faire dans des conditions pas toujours contrôlées et moins onéreuses. Les exportations de déchets de fer et d'acier, de Ni, Al et Cu ont ainsi doublé entre 1999 et 2011, celles de métaux précieux ont été multipliées par trois¹⁷. Bien évidemment, les statistiques des exportations reposent sur celles qui sont déclarées, or en 2005, une inspection de 18 ports européens a montré que la moitié des exportations de déchets était illégale. Cela concerne les déchets électroniques, classifiés comme déchets dangereux. La situation est similaire aux Etats Unis qui n'ont pas signé la convention de Bâle, où 50 à 80 % des déchets collectés ne sont pas recyclés sur place, mais exportés vers la Chine. L'Inde et l'Asie importeraient entre 1 et 3 Mt de cuivre par an sous forme de déchets, alors que la production annuelle mondiale primaire est de l'ordre de 16 Mt et que le flux mondial de cuivre sous forme de déchets est de l'ordre de 10 Mt (Glöser et al., 2013). Hormis les possibles conséquences environnementales et sanitaires d'un recyclage non contrôlé, l'exportation massive de nos métaux entraîne d'autres effets pervers car elle évite d'investir massivement dans le recyclage et de bâtir l'infrastructure qui permettrait de valoriser nos déchets « chez nous » dans le futur.

Une autre limite du recyclage est posée par la qualité des métaux recyclés. Si le recyclage des métaux purs comme le cuivre n'altère pas la qualité et l'utilisation du métal, il n'en est pas de même pour les alliages, dont les propriétés sont souvent dégradées au cours du recyclage. C'est le cas des aciers spéciaux qui sont recyclés pour produire des aciers de faible qualité, ou du béton et des composites des pales d'éoliennes par exemple. L'aluminium issu de l'aéronautique est un autre

¹⁷ Movements of waste across the EU's internal and external borders, EEA report n° 7/201

exemple¹⁸: traditionnellement, les chantiers de démantèlement de vieux avions fonctionnent comme des casses automobiles; les épaves sont démantelées pour récupérer les équipements réutilisables puis les carcasses sont dirigées vers filières de recyclage après un tri grossier. Or une aile d'avion est faite de différents alliages d'aluminium qui n'ont pas la même valeur et un recyclage sans distinction représente une perte de valeur importante. Une filiale spécialisée du groupe Suez s'est associée avec EADS et Rio Tinto Alcan pour optimiser le tri des alliages d'aluminium après cartographie complète de leur répartition sur les fuselages et ailes d'avion. Une fois ce repérage effectué, la découpe est faite en fonction du cours des métaux au London Metal Exchange qui détermine le prix d'achat de la carcasse de l'avion. Lorsque le prix de l'aluminium est bas, la découpe est grossière et convient à une refonte chez un affineur approvisionnant les fabricants d'emballage. Au contraire, si le prix de l'aluminium est élevé, la découpe s'effectue en suivant la cartographie des alliages afin de fournir des matières premières homogènes à la filière de refonte de Rio Tinto Alcan. Les lingots produits sont ensuite laminés pour produire des tôles destinées à la fabrication de nouveaux avions.

Evidemment, ce qui est vrai pour les gros objets en fin de vie dont le démantèlement se fait à la main n'est pas envisageable pour les appareils électroniques miniaturisés, où la quantité de métal récupérable est trop faible et la dilution trop importante pour qu'un démantèlement manuel soit rentable. Ces aspects économiques seront rediscutés dans le prochain chapitre, à la lumière du coût énergétique du recyclage. Mais à ce stade, on comprend déjà que si le recyclage est plus coûteux que la production primaire, il restera à un niveau faible ou inexistant. Un exemple intéressant est la tentative de recyclage des Terres Rares à partir des lampes fluorescentes compactes par le groupe Solvay, qui a ouvert deux usines de recyclage en France en 2012. Le procédé mis au point permettait de séparer 6 terres rares différentes par des successions de procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques. Quatre ans plus tard, les usines fermaient par manque de rentabilité après une forte baisse du prix des Terres rares primaires. Une autre difficulté était le manque de matière première avec l'arrivée sur le marché des LED. Le marché des lampes à LED est en pleine évolution, mais le gisement qu'elles constituent est difficile à estimer en raison de leur durée de vie théoriquement très longue et du manque d'information sur leur contenu, la composition des LED restant une donnée très confidentielle. Cela dit, le recyclage des LED présente une difficulté que l'on rencontre pour tous les appareils miniaturisés et électroniques : la

¹⁸ <https://www.industrie-techno.com/tarmac-aerosave-recupere-l-aluminium-pour-airbus.18129>

dilution et la complexité, une lampe à LED contenant une carte électronique et un circuit imprimé. Il existe quantité d'autres exemples où le recyclage est limité par la dilution et la complexité, donc par les coûts de recyclage. Falconer (2009) estime par exemple que 60 à 80 % du cuivre contenu dans les câbles sous-marins reliant les fermes d'éoliennes marines au Royaume Uni ne seront pas recyclés pour des raisons technologiques et surtout économiques au prix actuel du cuivre.

Chapitre 3

Les besoins énergétiques des industries minières et métallurgiques

L'exploitation minière, la production de concentrés et la métallurgie pour la production de métaux à partir de leurs minerais naturels sont des activités industrielles très énergivores. D'après l'International Energy Outlook (2013), plus de 20 % de l'énergie consommée par l'industrie est utilisée pour la seule production d'acier et de ciment. D'après Nuss and Eckelman (2014), la demande cumulée d'*énergie primaire* mondiale pour la production des matières premières minérales a été de 49 exajoules (EJ) en 2008, ce qui représente près de 10 % de la production mondiale d'énergie primaire la même année (520 EJ, AIE 2010). Ces chiffres sont en accord avec la *consommation d'énergie* estimée par l'AIE (35 EJ), qui représente également 10 % de l'énergie consommée mondialement en 2008 (353 EJ). La consommation industrielle représentant environ 40 % de la consommation globale, environ un quart de l'énergie utilisée par l'industrie au niveau mondial sert à produire les matières premières minérales. Ce chiffre ne prend pas en compte les granulats, les phosphates et la potasse et d'une manière générale, les minéraux industriels hors carbonates.

	Energie primaire cumulée (MJ/kg) Production primaire	Energie primaire cumulée (MJ/kg) Recyclage après collecte et séparation	Energie Consommée (MJ/kg) Production primaire	Energie Consommée (MJ/kg) Recyclage
Ciment	5,6 ¹ ; 3-4 ³	-	3,1 ⁴ , 4 ⁶	-
Acier(*)	22,7 ¹ ; 21,3 ⁵ ; 23,1 ³ ; 29,2 ⁸	9,7 ¹ ; 9,84 ⁴ ; 14,4 ⁸	25 ^{4,6}	4,5 ⁴ (EU27)
Aluminium	211,5 ¹ ; 194 ³ ; 120 (hydroelectricity)- 211 (coal) ⁷	10,1-17,5 ¹ ; 8 ³ (new scrap)-24 ³ (old scrap)	83 ⁴ ; 93 ⁶	5 ⁴
Cuivre	33 ¹ (Pyro) ; 64,5 ¹ (Hydro) ; 45 ³ (PGM, Noril'sk Mine) - 88 ³ (Au-Ag ores)	5-50 ¹ ; 1,8 ³ (electronic scrap) - 28,1 ³ (scrap)		
Nickel	113,5 ¹ (Pyro) ; 194 ¹ (Hydro) ; 150 ³ (PGM, Noril'sk Mine) - 187 ³ (Ni sulphides co-mined with Cu)	12,9 ¹ ; 6,2 ³		
Zinc	35,8 ¹ (ISP) ; 48,4 ¹ (elect.) ; 33 ³ (Au-Ag ores)-54,4 ³ (Lead/Zinc ores)	4-22 ¹ ; 18 ⁹		
Plomb	19,6 ¹ (BF) ; 32,5 ¹ (ISP) ; 28,9 ³ (Au-Ag ores) - 27,9 ³ (Lead/Zinc ores)	9,4-11,2 ¹ ; 0,4 ³ (electronic scrap)- 11,9 ³ (scrap)		

Tableau 3.1: Energie consommée pour produire une tonne de matière première minérale. 1) Rankin (2011), 2) Ecoinvent 2.2, 3) Nuss and Eckelman (2014), 4) Birat et al. (2014), 5) AIE, 6) Gutowski et al. (2013) ; 7) Norgate et al. (2007) for electricity with 90% efficiency ; 8) Das and Kandpal (1997) ; 9) Grims et al. (2008). () Pour l'acier, les valeurs de production primaire sont données pour un matériaux initial contenant une proportion de ferraille issue du recyclage.*

Dans le détail, la quantité d'énergie nécessaire à la production d'une matière première minérale varie considérablement en fonction de sa nature et des procédés employés pour la produire. L'énergie cumulée (Ecum) pour extraire une unité massique de métal à partir d'une roche naturelle est fonction de nombreux paramètres, dont le type d'exploitation (à ciel ouvert ou souterraine), la dureté de la roche minéralisée, la fraction de métal perdue tout au long de la chaîne de valeur, la concentration du métal recherché dans la roche exploitée, le degré de concassage du minerai avant son traitement métallurgique, le procédé métallurgique utilisé et la nature du minéral porteur (silicate, oxyde, sulfure, carbonate, etc.). Différentes quantités d'énergie sont nécessaires pour produire un même métal à partir de minéraux différents avec des procédés métallurgiques différents. Ces différences sont illustrées dans le Tableau 3.1, qui reporte les valeurs d'énergie primaire consommée pour la production primaire d'une tonne d'une sélection de matières premières minérales produites à grande échelle. Dans le cas du cuivre par exemple,

l'extraction par solvants suivie d'une extraction par électrolyse, utilisée pour les minerais oxydés, consomme le double (64,5 MJ par kg de cuivre raffiné produit) de l'énergie nécessaire à la production de cuivre raffiné à partir de minerais sulfurés, réalisée grâce à la production d'un concentré par flottation suivie d'une extraction du cuivre par pyrométallurgie et d'un raffinage par électrolyse (33 MJ par kg de cuivre raffiné produit). Le Tableau 3.1 illustre également la différence entre énergie primaire et secondaire. L'énergie primaire requise pour la production d'aluminium primaire par le procédé Bayer-Hall Héroult est estimée à environ 120MJ/kg en utilisant l'hydroélectricité avec un rendement de 90 %, alors qu'elle est de 210 MJ/kg si l'électricité est produite avec du charbon avec un rendement de 35 %, et de 150 MJ/kg si elle est produite avec du gaz naturel avec un rendement de 54 % (Norgate et al., 2007). Pour cette raison, la production d'aluminium à partir de minerai est traditionnellement localisée à proximité des cours d'eau dont l'énergie est facilement transformée en électricité à coût modique. Plus récemment, la production d'aluminium s'est implantée en Islande qui ne possède pas de ressource d'aluminium mais une grande quantité d'énergie géothermique renouvelable bon marché. Enfin, le Tableau 3.1 indique que par rapport à la production primaire, le recyclage après collecte et séparation est beaucoup plus économe en énergie car pour les métaux non-alliés déjà triés et séparés, il ne comprend que la part nécessaire à la fusion, pas celle de la transformation chimique d'un minéral porteur en ses constituants. Le Tableau 3.2 reporte les consommations énergétiques moyennes pour la production d'un ensemble plus important de matières premières minérales, dont certaines utilisées dans les hautes technologies. Ces données peuvent avoir une portée limitée car elles sont relatives à quelques gisements. Ainsi, dans le cas des terres rares, les données se réfèrent au gisement de Bayan Obo (Chine) qui assure plus de 90 % de la production mondiale de terres rares légères (Ca, Ce, Eu, Gd, Nd, Pr). Les valeurs moyennes du Tableau 3.2 n'entrent pas non plus dans le détail des différences d'énergie de production des alliages, même si des différences notoires existent. Cela est illustré par le cas de l'acier : Fujii et al. (2005) reportent des valeurs de 20 MJ/kg pour l'acier « carbon steel » primaire produit en hauts fourneaux et 10 MJ/kg pour le même acier recyclé produit par arc électrique, entre 40 et 72.1 MJ/kg pour différents aciers inoxydables primaires, et une variation de 73 MJ/kg (100% primaire) à 23 MJ/kg (100% recyclé) pour l'acier 304 2B. Une estimation fine de l'énergie de production implique donc la connaissance fine de la composition des aciers, mais également de leur provenance et du mode de production. Ce qui est vrai pour le métal le plus produit au monde est évidemment vrai pour les autres métaux. Ces précisions faites, on observe que l'énergie cumulée de production primaire varie entre environ 20 MJ/kg (fer/acier) et 300000 MJ/kg pour l'or et le platine (Norgate and Rankin, 2000, 2002a, 2002b).

Métal	Energie (MJ/kg)	References	Métal	Energie (MJ/kg)	References
Al	190-230	1,3, Tab. 2	Mg	270-350	2,10
Cd	17	2	Mn	52-59	2,9
Ce (oxyde)	56	8	Hg	90-150	2,9,12
Cr	70-83	9,12	Mo	15-380	2,9,12
Co	130	2	Nd (oxyde)	358	8
Cu	30-90	4, Tab. 2	Ni	110-200	Tab. 2
Dy (oxyde)	4154	8	Pd	180000	2
Eb (oxyde)	328	8	Pr	442	8
Eu (oxyde)	97	8	Rh	560000	2
Ferrochrome	37	2	Sm (oxyde)	9159	8
Ferronickel	160	2	Si	1000-1500	2
Gd (oxyde)	320	8	Ag	1500	2
Ga	3000	2	Ta	4400	2
Au	310000	2	Te	160	2
In	2600	2	Tb	7456	8
Acier	20-30	5,2,10,Tab. 2	Sn	250	2,9
Acier inox.	304	2,6	Ti	360-750	9,13
La (oxyde)	61	8	V	3700	9
Pb	20-25	2,9,11	Y	213	8
Pr (oxyde)	31,63	8	Yterbium	294	8
Li	380-850	2	Zn	33-55	7, Tab. 2

Tableau 3.2: Consommation énergétique moyenne nécessaire à la production de matières premières minérales. 1) European Aluminium Association: <http://www.alueurope.eu/>, 2) Ecoinvent 2.2 : <http://www.ecoinvent.org>, 3) <http://veb.rth.edu/2.813/www/readings/ICEv2.pdf.old>, 4) Kupfer Institut: <http://kupferinstitut.de>, 5) world steel association: <http://www.worldsteel.org/>, 6) International stainless forum: <http://www.worldstainless.org>, 7) International Zinc association: <http://www.zinc.org/>, 8) Koltun and Tarumajah (2010), 9) Bath ICE v2.02, 10) Asby (2009), 11) Gabi software: <http://gabi-software.com>, 12) Rankin (2011,2012), 13) Norgate et al. (2010)

Plusieurs études ont montré que $Ecum$ est une fonction puissance de la dilution, qui est l'inverse la concentration ($1/C_{metal}$) du métal exploité dans le minerai (Gutowski et al., 2012; Johnson et al., 2007). La baisse de concentration des gisements exploités avec le temps (Figures 3.9 et 3.10) contribuerait donc à augmenter $Ecum$. Cette situation est bien documentée pour le cuivre (Chapman, 1974; Norgate et Jahanshahi, 2010), l'uranium et l'or (Mudd, 2007). L'augmentation de $Ecum$ avec la dilution a été jusqu'à présent compensée par l'amélioration de l'efficacité énergétique des techniques et moyens de production (Gutowski et al., 2012; Yellishetty et al., 2010). Une question importante est de savoir si la même tendance se poursuivra dans le futur. En effet, les coûts de production dépendent de $Ecum$ et les réserves, soit la partie économiquement exploitable des ressources connues, dépendent quant à elles des coûts de production.

L'évaluation de l'évolution future de E_{cum} est donc un point central pour estimer non seulement le coût énergétique mais également l'évolution des réserves en ressources minérales. Cette évaluation nécessite un formalisme adéquat, que nous essayons d'établir dans la suite. D'autres approches basées sur l'exergie (production d'entropie) sont proposées dans la littérature. Il s'agit d'approches complexes que nous n'aborderons pas ici, mais le lecteur intéressé trouvera des informations précieuses dans les travaux de Goessling-Reisemann (2008) ou Valero et al. (2013) et Valero et Valero (2015).

3.1 Essai de modélisation de l'énergie de production des métaux

3.1.1. Production primaire

Pour les métaux dilués comme l'or et platine par exemple, l'énergie cumulée de production (E_{cum}) est dominée par les processus mécaniques de concassage, d'extraction et de séparation, alors qu'à haute concentration (fer et aluminium par exemple), elle est dominée par les processus chimiques de séparation-réduction. L'énergie cumulée de production peut donc être décomposée en deux termes correspondant 1) aux contributions des processus métallurgiques permettant de transformer le minerai en métal (e_1) et 2) des autres contributions plus en amont, qui incluent les opérations minières d'extraction, broyage et première purification (e_2).

- La valeur minimale de e_1 ($e_{1,min}$) est égale, au signe près, à l'énergie libre de formation du minéral porteur du métal à partir de ses constituants : $e_{1,min} = -\Delta G^{\circ f}$ (J/Mol). L'énergie de transformation des minéraux porteurs du métal en métal pur (métallurgie) augmente donc avec la stabilité thermodynamique des minéraux porteurs. L'énergie libre de formation est élevée pour l'oxyde d'aluminium ($\Delta G^{\circ f}_{Al_2O_3} = -29.5$ MJ/kg), ce qui rend sa purification beaucoup plus énergivore que celle de l'oxyde de fer hématite ($\Delta G^{\circ f}_{Fe_2O_3} = -6.7$ MJ/kg). Cela explique pourquoi $E_{cum}(Al) > E_{cum}(Fe)$, alors que la concentration de ces métaux dans les gisements exploités est du même ordre de grandeur. Dans le cas des métaux natifs, l'énergie libre de formation est évidemment nulle. Pour exprimer $e_{1,min}$ en MJ/kg de métal produit, unité classiquement utilisée dans la littérature, il faut diviser $-\Delta G^{\circ f}$, usuellement tabulée en kJ/mol, par la masse molaire du métal à extraire (M_{metal} en gramme) et le nombre d'atome (n) de métal par unité formulaire du minéral porteur :

$$e_{1,min} \text{ (kJ.g}^{-1} \text{ ou MJ.kg}^{-1}\text{)} = -\Delta G^{\circ f} / (M_{metal}.n) \quad (1)$$

- L'ordre de grandeur de e_2 est plus difficile à estimer, car e_2 dépend de la nature des roches exploitées. D'une manière générale (voir Burford et Niva, 2008 ; de Bakker, 2013 ; Silva et al., 2012) on observe que 1) la taille du broyage dépend de la taille des phases porteuses du métal et de leur concentration, 2) le taux de récupération du métal augmente avec la concentration des gisements et l'intensité du broyage de manière non-linéaire, et 3) les gisements les moins concentrés doivent généralement être broyés plus finement que les gisements plus concentrés. Différentes relations entre taille des particules et e_2 sont proposées dans la littérature pour une gamme de granulométrie avant et après broyage (Silva et al., 2012). Toutes ces équations correspondent à une intégration de la relation suivante, liant énergie de broyage (E_b) et taille des particules (s) :

$$E_b = K \cdot s^{-u} \quad (0.5 < u < 1) \quad (2)$$

L'équation (2) indique que l'énergie de broyage augmente comme une loi puissance de l'inverse de la taille des particules. Elle tend vers l'infini quand la taille tend vers 0. Une tendance comparable est observée entre E_{cum} et l'inverse de la concentration du métal ($1/C_{metal}$). Là aussi, différentes lois puissance ont été proposées dans la littérature (Norgate et Jahanshahi, 2010 ; Mudd, 2007 ; Gutowski et al., 2012 ; Johnson et al., 2007), de forme générale :

$$E_{cum} \text{ (MJ.kg}^{-1}\text{)} = a \cdot (1/C_{metal})^{-u} \quad (3)$$

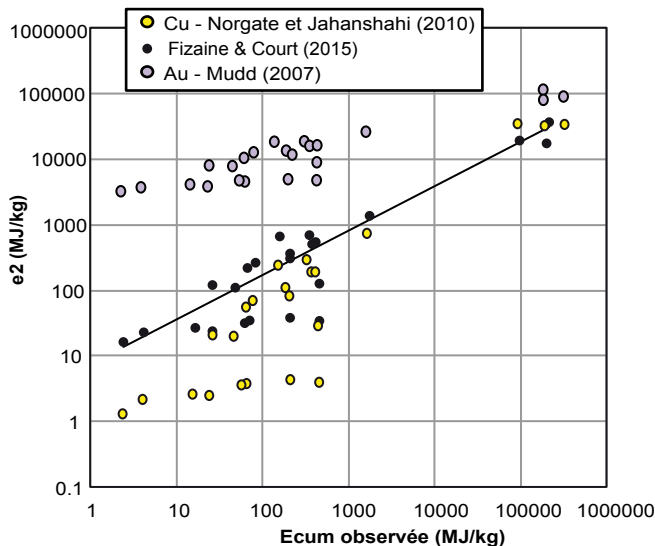


Figure 3.1: Energie de production de différents métaux calculée avec les lois puissance de Norgate et Jahanshahi (2010) pour le cuivre, Mudd (2007) pour l'or, et Fizaine et Court (2015) pour une série de métaux, en fonction de l'énergie de production observée.

Les équations (2) et (3) donnent une bonne estimation de l'énergie de production des métaux en faible concentration, pour lesquels l'énergie de broyage porte la plus grande contribution. Cependant, E_{cum} devrait être proche de zéro dans le cas extrême d'un minerai où $C_{m\acute{e}tal} = 100\% = 1$, alors qu'une loi puissance du type équation (3) prédit $E_{cum} = a$. Or les équations reportées dans la littérature impliquent souvent des valeurs de « a » largement supérieures à zéro, *e.g.* $a = 156266 \text{ MJ.kg}^{-1}$ pour l'or (Mudd, 2007) ou 77 MJ.kg^{-1} pour le cuivre (Norgate et Jahanshahi, 2010). Cela implique que les équations du type (2) et (3) ne sont valables que pour le métal et le domaine de concentration pour lesquels elles ont été calibrées, et une même loi puissance ne peut pas être utilisée pour décrire l'évolution de E_{cum} de tous les métaux. Fizaine et Court (2015) ont proposé une équation de type (3) unique (Figure 3.1), mais E_{cum} calculée pour les minéraux dilués (Au, Pt et Pd) est environ 8 fois plus faible que les valeurs observées et E_{cum} est proche de 8 MJ.kg^{-1} pour une concentration de 100 %, alors qu'elle devrait être proche de zéro. Pour les métaux concentrés, la contribution de e_1 devient importante par rapport à e_2 et ce terme ne peut pas être négligé (comme dans l'équation 3).

Certains travaux proposent que l'énergie de séparation d'un métal d'une roche soit analogue au travail nécessaire à l'extraction d'un gaz pur d'un mélange gazeux (voir par exemple Gutowski, 2008). Pour un métal en concentration molaire $X_{m\acute{e}tal}$ ($0 < X_{m\acute{e}tal} < 1$) dans une matrice homogène et en faisant l'hypothèse d'un mélange idéal, le travail minimum de séparation ($W_{s,min}$) d'une mole de roche en deux fractions (métal et matrice) est proportionnel à l'entropie de mélange (ΔS_{mix}) :

$$W_{s,min} = -T.\Delta S_{mix} = -R.T.(X_{m\acute{e}tal}.\ln(X_{m\acute{e}tal}) + (1 - X_{m\acute{e}tal}).\ln(1 - X_{m\acute{e}tal})) \quad (4)$$

Avec $R = 8.314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ (constante des gaz parfaits) et T en Kelvin. Pour $T = 298.15 \text{ K}$ (25°C), cette équation indique une évolution symétrique de $W_{s,min}$ entre la valeur maximale de 1.7 kJ.mol^{-1} à $X_{m\acute{e}tal} = 0.5$ et 0 kJ.mol^{-1} à $X_{m\acute{e}tal} = 0$ et 1 . Le travail minimum pour extraire une mole de métal est donné par :

$$W_{sm,min} = -R.T.(\ln(X_{m\acute{e}tal}) + (1 - X_{m\acute{e}tal})/X_{m\acute{e}tal}.\ln(1 - X_{m\acute{e}tal})) \quad (5)$$

soit $W_{sm,min} \approx -R.T.\ln(1/X_{m\acute{e}tal})$ pour des métaux dilués. L'équation (5) est croissante avec la dilution et le travail minimum tend vers l'infini quand $X_{m\acute{e}tal} > 0$. Cette tendance est conforme aux observations, à la différence près que dans l'équation (5), $W_{s,min}$ est proportionnel au *logarithme* de la dilution, alors que l'équation (3) indique une loi puissance de E_{cum} de la dilution. En fait, l'analogie entre un métal dans une roche et un mélange de gaz est clairement incomplète car les équations (4) et (5) ne sont valables que dans le cas où il n'y a pas d'interaction entre les composants à séparer. Cette situation peut être approchée dans le cas de

particules d'or dans un placier de sable, mais certainement pas pour les mêmes particules dans une gangue de quartz, où le broyage est nécessaire pour libérer les particules avant séparation. Pour prendre en compte l'énergie de broyage, il est nécessaire de conserver la dépendance de e_2 avec la dilution (équation 3). Deux solutions sont envisageables, la plus naturelle étant de rajouter à l'équation (5) un terme comparable à celui décrit par l'équation (3) :

$$e_{2_1} \text{ (J/mol métal)} = W_{s,\min} + a.(1/C_{\text{metal}})^u \quad (6)$$

Cette solution présente l'avantage de décomposer e_2 comme la somme d'une contribution correspondant à la séparation et d'une contribution correspondant au broyage. Dans ce cas, le terme « a » doit être ajusté pour reproduire les valeurs observées. Une autre approche est de considérer que le terme « a » de l'équation (3) est proportionnel à l'énergie de séparation $W_{s,\min}$. En effet, les lois puissances liant énergie et dilution proposées dans la littérature intègrent à la fois la contribution du broyage et de la séparation. De plus, ces lois indiquent que le terme « a » augmente avec la dilution, comme $W_{s,\min}$. L'énergie e_2 pour cette deuxième approche prend la forme suivante :

$$e_{2_2} \text{ (J/mol metal)} = W_{s,\min}/C_{\text{metal}}^u \quad (7)$$

Le principal avantage de l'équation (7) est d'assurer que $e_2 = 0$ pour $X_{\text{metal}} = 1$, ce qui n'est pas le cas de (6).

Les équations (5) à (7) font référence à des concentrations molaires, alors que les concentrations de métal reportées dans la littérature sont des concentrations massiques. Si le métal est sous forme native, la relation entre X_{metal} et C_{metal} est la suivante :

$$X_{\text{metal}} = \frac{C_{\text{metal}}}{c.C_{\text{metal}} + d} \text{ avec } c = \frac{M_{\text{matrice}} - M_{\text{metal}}}{100} \text{ et } d = \frac{M_{\text{metal}}}{M_{\text{matrice}}} \quad (8)$$

où M = masse molaire (g.mol^{-1}).

Dans le cas de métaux complexés sous forme d'oxydes ou de sulfures par exemple, le métal à extraire est contenu dans une phase minérale porteuse et il faut remplacer X_{metal} par X_{porteur} , et C_{metal} par la concentration massique de ce porteur ($C_{\text{porteur}} = C_{\text{metal}}.M_{\text{porteur}}/(M_{\text{metal}}.n)$, avec n = nombre d'atomes de métal par unité formulaire de porteur). Finalement, l'énergie cumulée d'extraction pour e_{2_1} est la suivante :

$$E_{\text{cum}} \text{ 1 } \left(\frac{\text{MJ}}{\text{Kg metal}} \right) = \alpha_1. e_{1, \min} + \beta_1. \left(\frac{W_{s,\min}}{M_{\text{metal}}.1000} + a. \left(\frac{1}{C_{\text{metal}}^u} \right) \right) \quad (9)$$

et pour e_2 :

$$Ecum\ 2\left(\frac{MJ}{Kg\ metal}\right) = \alpha_2 \cdot e_{1,\ min} + \beta_2 \cdot \left(\frac{Ws,\ min}{M_{metal} \cdot 1000} \cdot \left(\frac{1}{C_{metal}^u}\right)\right) \quad (10)$$

Les termes α et β (> 1) sont des facteurs de mise à l'échelle permettant de passer des valeurs de $e_{1,\ min}$ et e_2 aux valeurs observées de $Ecum$. Le Tableau 3.3 reporte les valeurs de X , C , $e_{1,\ min}$, e_2 , α_1 , α_2 , β_1 et β_2 , $Ws,\ min$, $Ecum1$ et $Ecum2$ pour une vingtaine de métaux couvrant un domaine de concentration massique $2 \cdot 10^{-6} < C_{m\acute{e}tal} < 0.5$ ainsi que du ciment, du verre et des tuiles. Ces valeurs indiquent que la contribution de $e_{1,\ min}$ devient importante par rapport à e_{2_1} et e_{2_2} pour des concentrations inférieures à 10 %.

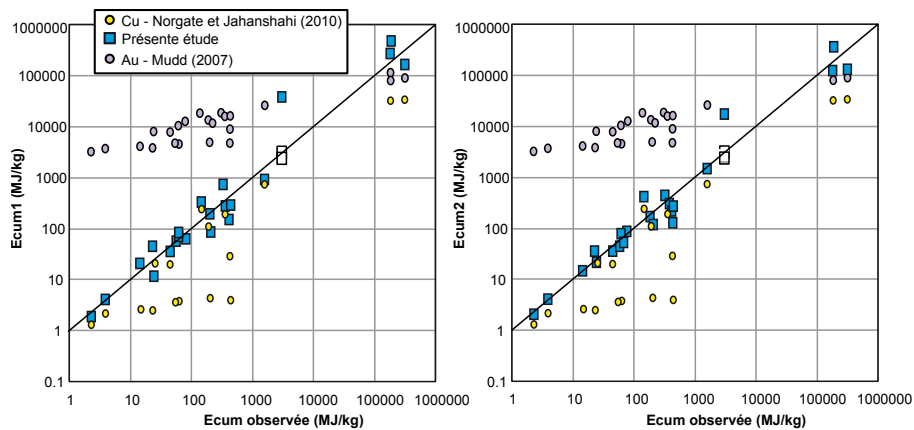


Figure 3.2: $Ecum$ (carrés bleus) calculée avec l'équation (9) à gauche et (10) à droite en fonction des valeurs observées. Les carrés vides montrent les valeurs de $Ecum$ pour le Ga et l'In obtenues avec les deuxièmes valeurs de β_1 et β_2 listées dans le Tableau 3.3. Celles obtenues avec β_1 et β_2 utilisés pour la régression sont largement supérieures (carrés pleins aux mêmes $Ecum$ Obs.).

La Figure 3.2 indique qu'une estimation raisonnable de $Ecum$ est possible avec les équations de type (9) et (10) pour a et $u \approx 1$, en faisant l'hypothèse raisonnable que $M_{matrice} \approx M_{porteur}$, et pour des valeurs de α et β constantes (hormis pour l'indium et le gallium). Dans les deux cas, la prise en compte de la contribution de $e_{1,\ min}$ améliore grandement les estimations par rapport à la loi puissance utilisée par Fizaine et Court (2015). Dans le détail, il existe encore des différences pouvant être importantes entre $Ecum$ calculée et $Ecum$ observée, mais vu la dispersion des données de la littérature, il est difficile d'aller beaucoup plus loin dans l'analyse des résultats. Pourtant, le cas particulier de l'indium et du gallium mérite un commentaire. Pour ces deux éléments, les valeurs calculées de $Ecum$ sont largement

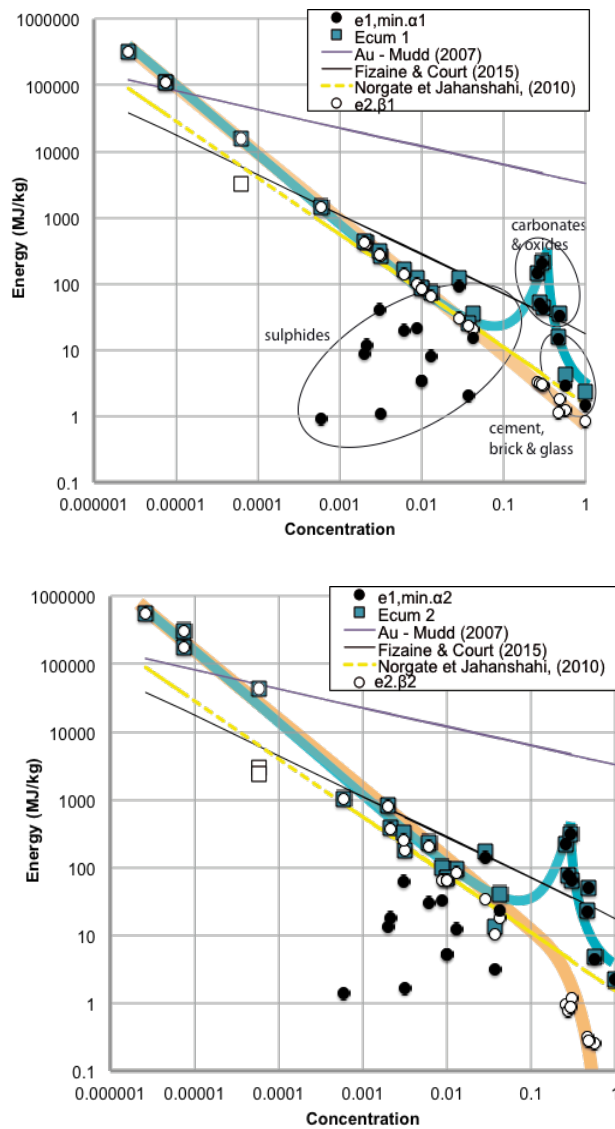


Figure 3.3: Valeurs de $Ecum$ (carrés et ligne épaisse bleus), de l'énergie de séparation chimique ($e1,min$ points noirs) et de la séparation mécanique ($e2$, points blancs et courbe orange) calculées avec les équations (9) à gauche et (10) à droite. Les valeurs de $Ecum$ obtenues avec les lois puissance de Mudd (2007) pour l'or, Norgate et Jahanshahi, (2010) pour le cuivre et Fizaine et Court (2015) sont également reportées. Les carrés vides montrent les valeurs de $\beta1$ et $\beta2$ listées dans le tableau 3.3.

supérieures à celles observées. La différence s'explique par le fait que les deux métaux sont des coproduits de l'extraction du zinc et du cuivre. Les valeurs de E_{cum} reportées dans la littérature sont donc anormalement basses, car une partie du broyage est effectué lors de la récupération du métal principal. Les valeurs de β_1 et β_2 estimées pour que $E_{cum} \text{ calculée} = E_{cum} \text{ observée}$ (Tableau 3.3 et Figure 3.3), indiquent qu'environ 80 % de l'énergie de séparation mécanique e_2 est produite pendant l'extraction du métal principal.

La Figure 3.3 montre que la contribution de la séparation chimique (e_1) est prépondérante pour les métaux extraits de roches où ils sont concentrés à plus de 10 %, alors que la contribution mécanique e_2 devient prépondérante en-dessous de cette valeur. La valeur minimale de e_2 obtenue avec l'équation (9) pour $C = 100\%$ est de 1 MJ.kg^{-1} (courbe orange). Cela est le principal problème de l'équation (9), l'énergie de broyage et de séparation devant être nulle pour cette concentration. À l'inverse, la condition $e_2 = 0$ pour $C = 100\%$ est respectée avec l'équation (10). Même si la Figure 3.3 semble indiquer le contraire, le terme $e_{1,min}$ est indépendant de la concentration, il ne dépend que de la nature du minéral porteur. L'apparente croissance de $e_{1,min}$ avec la concentration reflète simplement l'évolution du type de minerai exploité pour les différents métaux considérés : les métaux les moins concentrés (Pt et Au) peuvent être sous forme native dans les gisements naturels¹⁹ ($-\Delta G^{\circ f} = 0$), les métaux les plus concentrés (Fe, Al, Mn, Mg) sont sous forme d'oxydes ou de carbonates ($-\Delta G^{\circ f}$ élevé) et les métaux à concentration intermédiaire sont de sous forme de sulfures. La ligne jaune sur la Figure 3.3 montre la variation de E_{cum} obtenue avec la loi puissance de Norgate et Jahanshahi, (2010) pour le cuivre calibrée sur une gamme de concentration entre 0.5 et 5 % ($E_{NJ} = 77.585.C(\%)^{-0.857}$). Sur ce domaine de concentration, E_{NJ} est presque parallèle à e_2 et E_{cum} , la pente dans notre cas étant légèrement supérieure car nous avons fait l'hypothèse que $u = 1$ alors que $u = 0.857$ dans l'équation de Norgate et Jahanshahi (2010). Au contraire, l'équation calibrée à partir de 34 métaux par Fizaine et Court (2015) ($E_{FC} = 279.25.C(\%)^{-0.60026}$) présente une pente très inférieure. Cette équation

¹⁹ Le platine était historiquement exploité sous forme native, les arsénures de platine sont aujourd'hui la principale source de ce métal

sous-estime l'énergie de production des métaux faiblement concentrés comme l'or, le platine ou le palladium et celle des métaux concentrés comme le fer, l'aluminium, le manganèse ou le magnésium. Elle surestime l'énergie de production des métaux à concentration intermédiaire comme le cuivre, le mercure ou le plomb ou celles des ressources fortement concentrées comme le ciment ou la brique (voir Tableau 3.3). Enfin, les valeurs de E_{cum} obtenues par la loi puissance calibrée pour l'or par Mudd (2007) ($E_M = 156266.C^{-0.2793}$) sont très éloignées des valeurs observées pour tous les métaux, sauf naturellement ceux dont la concentration est semblable à celle de l'or (Pd, Pt). La plus faible valeur de l'exposant « u » pour l'or dans l'équation E_M que pour le cuivre (E_{NI}) est cohérente avec la diminution observée du même exposant dans les relations entre énergie de broyage et taille des particules (équation (2), voir Silva et al., 2012). Cette diminution observée est en contradiction notre hypothèse que $u = 1$ dans l'équation (11), mais à la lumière des données dont nous disposons et des résultats reportés sur les Figures 3.1 à 3.3, cette hypothèse semble raisonnable.

Les équations (9) et (10) peuvent maintenant être utilisées pour calculer l'évolution de E_{cum} avec la baisse de teneur des gisements. Différents exemples sont illustrés sur les Figures 3.4 et 3.5, qui montrent que l'évolution log-normale de E_{cum} avec la concentration massique est en bon accord avec les tendances publiées dans le cas du cuivre et du nickel (Figure 3.4) ou de l'or (Figure 3.5). Dans le détail, on constate cependant que les valeurs d'énergie que nous prédisons pour le cuivre et le nickel sont inférieures à celles reportées en 1974 par Chapman (1974) pour les gisements à $C > 1\%$ (flèche rouge sur la Figure 3.4). Cela s'explique par l'amélioration des technologies qui ont permis de réduire sensiblement la consommation énergétique de l'industrie minière et de transformation minéralogique en 40 ans. Pour cette raison, E_{cum} pour le cuivre produit à partir de gisements actuels où il serait concentré à 1,3 % (50 MJ.kg^{-1}) est identique à la valeur de Chapman (1974) pour des gisements à 3 %. Pour obtenir une fonction E_{cum} capable de représenter à la fois les valeurs de 1974 et les valeurs actuelles, il faudrait intégrer dans les équation (9) et (10) une dépendance de α et β avec le temps qui représente l'amélioration de l'efficacité énergétique.