



Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

Ressources minérales et énergie

Rapport du groupe « Sol et sous-sol » de l'Alliance Ancre

Juin 2015

Remerciements

Les auteurs remercient chaleureusement toutes les personnes ayant contribué à améliorer le contenu et la présentation du présent document, et en particulier F. Kalaydjian (IFPEN), B. Goffé (CNRS), F. Villieras (CNRS), M-M. Quemere (EDF), J-M. Montel (ensg), A. Geldron (Ademe), F. Renard (Univ. Grenoble) et A. Thorel (mines-paritech) pour leur lecture assidue.

Index

Index	3
Résumé étendu	5
I. Cadre et enjeux	9
a. Une consommation mondiale de matières premières minérales en forte croissance	9
b. Délocalisation des productions, perte d'intérêt des pays industrialisés pour les ressources minérales et dépendance à l'importation.....	13
c. Le lien énergie-matières premières minérales	15
II. Les besoins énergétiques des industries minières et métallurgiques	16
III. Les besoins en matières premières pour l'énergie	21
a. Les besoins par grands domaines d'application dans le secteur de l'énergie.....	21
1 <i>Hydrocarbures et charbon</i>	22
2 <i>Production d'électricité</i>	23
3 <i>Réseaux de transport et distribution d'électricité</i>	24
4 <i>Stockage électrique</i>	25
5 <i>Efficacité énergétique</i>	26
6 <i>Zoom sur les aimants permanents</i>	27
b. Intensité matière de différents modes de production d'électricité	27
<i>Le parc Français d'énergie renouvelable</i>	30
c. Les besoins en fonction des scénarios énergétiques	32
d. Les besoins spécifiques de recherche	36
IV. La chaîne de valeur des matières premières et ses aléas	41
a. Cartographie et analyse de la chaîne de la valeur, des outils essentiels pour déterminer des enjeux de recherche	41
b. Les métaux porteurs et sous-produits primaires	41
c. Aléas et freins affectant les chaînes de valeur	43
1 <i>Aléas politiques et institutionnels</i>	43
2 <i>Aléas liés aux infrastructures</i>	43
3 <i>Aléas économiques</i>	43
4 <i>Aléas environnementaux</i>	44
5 <i>Aléas géologiques (séismes, tsunamis, volcanisme, glissements de terrain, subsidence)</i>	44
6 <i>Aléas techniques</i>	44
7 <i>Aléas sociétaux</i>	44
V. Les capacités de recyclage et le potentiel de substitution	47
a. Le problème entropique des stocks anthropiques.....	47
b. Gisements potentiels français et opportunités de recherche sur les technologies de recyclage des matières premières minérales.....	49
c. L'extraction des terres rares dans les aimants permanents.....	51
d. L'extraction des métaux des lampes à basse consommation d'énergie.....	52
e. Les pistes de recherche.....	53
VI. Ressources, réserves, énergie et criticité	54
Les pistes de recherche	60
VII. Axes de recherche généraux sur les ressources	61
1 <i>Estimation des besoins en ressources minérales</i>	62
2 <i>Acceptabilité sociale et conditions-cadre pour l'approvisionnement en matières premières minérales primaires et secondaires</i>	62

3	<i>Géologie et exploration</i>	63
4	<i>Extraction minière</i>	63
5	<i>Traitement des minerais et métallurgie, purification, conception/ usinage/ production de composants</i>	63
6	<i>Recyclage</i>	64
7	<i>Substitution</i>	64
8	<i>Thèmes transversaux</i>	65
VIII.	Annexe	66
a.	Informations et agendas de recherche disponibles.....	66
1	<i>Niveau international/ mondial</i>	66
2	<i>Niveau européen</i>	67
IX.	Références bibliographiques	70

Résumé

L'accroissement de la population mondiale à 9 milliards d'habitants en 2050 entrainera une augmentation des besoins en matières premières. Parmi celles-ci, les métaux sont en première ligne car ils soutiennent les activités humaines de base, mais aussi tous les développements dans le domaine des nouvelles technologies, de la mobilité et de l'énergie. La consommation de métaux est en augmentation d'environ 3 à 5 %/an depuis une quinzaine d'années, elle a donc quasiment doublé depuis le début du siècle. Si les tendances actuelles se poursuivent, les projections indiquent que pour satisfaire les besoins mondiaux d'ici 2050, nous devons extraire du sous-sol plus de métaux que l'humanité n'en a extrait depuis son origine. La Terre dans sa diversité géochimique reste un réservoir immense d'éléments, mais leur extraction est limitée par nos capacités à accéder à la ressource, par la consommation énergétique de cette extraction et au raffinage des minerais, et par notre capacité à maîtriser les impacts environnementaux associés (pollution, atteintes à la biodiversité, etc.). Les enjeux sont considérables, et ils concernent aussi bien la maîtrise de la ressource elle-même que celle des impacts environnementaux et énergétiques associés à son extraction.

C'est dans ce contexte de forte demande en métaux que se pose celui de l'énergie, dont la consommation globale croît de manière exponentielle depuis plusieurs décennies, et de la transition vers la production et l'utilisation d'énergie décarbonée. Les enjeux liés à l'énergie et aux matières premières minérales (MPM) sont d'ailleurs indissociables, car :

- Les métaux sont nécessaires pour construire les infrastructures de production d'énergie, de son stockage et de sa distribution, pour développer des technologies permettant d'économiser de l'énergie (e. g. en produisant des alliages plus légers et plus résistants dans les transports, des lampes de basse consommation), ou des technologies nécessitant des alliages spéciaux pour opérer dans des conditions extrêmes, comme dans le cas des réacteurs nucléaires ou des turbines), pour répondre aux demandes de la catalyse automobile ou du raffinage du pétrole. L'invention de la machine à vapeur a été à l'origine de la révolution industrielle, des échanges de matière au niveau mondial et de la demande croissante de métaux. 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. Un vingtième de l'acier mondial est employé dans le secteur pétro-gazier, et les turbines et coques des réacteurs nucléaires sont construites à partir de superalliages qui incluent des métaux rares, qualifiés de critiques ou stratégiques. Le passage à une énergie de plus faible intensité 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 produite à partir de sources renouvelables, qui nécessitent de bâtir une nouvelle infrastructure. Cette infrastructure est fortement consommatrice en métaux « conventionnels », tels que l'acier, l'aluminium ou le cuivre, mais

également en 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. 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 devra s'accompagner d'une consommation supplémentaire de métaux.

- l'énergie est nécessaire pour produire les matières premières : A l'heure actuelle, environ 10% de l'énergie mondiale est utilisée pour l'extraction et le raffinage des ressources minérales et 22% de l'énergie consommée mondialement par l'industrie est utilisée pour la seule production d'acier et de ciment. Les gisements de minerais très concentrés et facilement accessibles ne sont plus découverts, et certains déchets de mines abandonnées deviennent économiquement exploitables. Avec la baisse des concentrations de gisements exploités, l'énergie nécessaire à l'extraction, le broyage et aux processus de séparation et de raffinage des métaux est de plus en plus élevée. Dans le cas de nombreux métaux, la baisse progressive de la teneur des gisements a été longtemps compensée par l'emploi de technologies de production de plus en plus efficaces en termes d'énergie consommée par unité de poids de métal produit. Cela a permis de réduire le coût d'extraction et donc l'augmentation des réserves (contrôlées par des facteurs économiques). Mais il n'est pas certain que le gain en efficacité pourra continuer à compenser la baisse des teneurs et la croissance de la production tout en satisfaisant un besoin exponentiellement croissant en énergie.

Bien que le siècle dernier ait été marqué par une augmentation de la consommation en matières premières énergétiques fossiles et en minerais, le prix des métaux de base a en moyenne évolué de manière beaucoup plus modérée. Cette faible augmentation des prix malgré l'augmentation massive de la consommation est largement liée aux progrès technologiques survenus depuis le début du XXème siècle et à une délocalisation de la production hors des pays à fort PIB qui ont permis l'exploitation de gisements moins concentrés. La délocalisation de la production pèse sur les capacités de réponse et d'adaptation des pays occidentaux non producteurs, qui sont actuellement confrontés à l'émergence économique, politique et technologique des pays comme la Chine. Les industries de pays développés non producteurs sont ainsi placées dans une situation de grande dépendance aux importations de ressources fossiles énergétiques, mais également minérales. Dans ce contexte très compétitif, les enjeux matières premières-énergie sont considérables. Notre société doit faire face à ces défis et les gérer de façon à assurer un accès le plus durable possible aux ressources minérales tout en limitant les impacts négatifs de leur utilisation; ce sont les conditions nécessaires d'un développement le plus harmonieux possible.

Une partie de la solution réside dans le recyclage de nos produits en fin de vie, à condition que les pays développés évitent d'exporter leurs déchets valorisables vers des destinations où les procédures de recyclage sont moins réglementées. L'augmentation de la part du recyclage et d'une manière générale de l'économie circulaire est impérative, mais même un recyclage

hypothétique (et impossible) à 100% n'est pas suffisant pour alimenter les besoins dans un contexte de forte croissance. La recherche de ressources primaires restera donc nécessaire.

En matière d'innovation technologique, seules les grandes orientations peuvent être décrites, car il s'agit d'un domaine hautement concurrentiel où les travaux et leurs résultats sont généralement maintenus confidentiels jusqu'au moment de l'obtention de brevets. Certains problèmes technologiques nécessitant des efforts de recherche peuvent donc être en passe d'être résolus au moment de leur identification. Par ailleurs, des recherches peuvent porter sur plusieurs filières concurrentes visant à obtenir une même fonctionnalité, par exemple pour la production d'énergie à partir de sources renouvelables. Si chacune de ces filières a son profil en termes de matières premières minérales mises en œuvre, il est très difficile de savoir laquelle dominera le marché dans 10 ans ou davantage. Par ailleurs, les questions de recherche ne peuvent pas être séparées des questions touchant à la politique des Etats. Ces politiques peuvent par exemple restreindre l'usage de certains métaux, freiner ou favoriser l'accès aux ressources primaires et secondaires, etc. Pour que la recherche puisse être pleinement efficace, les problématiques liées aux matières premières minérales doivent être intégrées dans une stratégie holistique et impliquant toutes les autres politiques de l'Etat.

Cela dit, des pistes de recherche sont listées à la fin des différents chapitres du présent document, et d'autres besoins en recherche identifiables le long de la chaîne de valeur sont rassemblés dans un chapitre dédié. Un enjeu commun est d'utiliser l'énergie et la ressource de manière la plus efficace et la plus économe possible, tout en réduisant les impacts environnementaux dans tous les secteurs de la chaîne de valeur. D'une façon générale, il nous semble important de mener un effort de recherche sur les grands thèmes suivants :

- L'estimation à 30 ans des besoins en ressources minérales pour les différents secteurs de l'énergie en fonction des scénarios énergétiques disponibles pour différentes zones géographiques.
- L'estimation à 30 ans des besoins en énergie pour la production de ces ressources en tenant compte des améliorations d'efficacité énergétique et du lieu de production.
- Les potentiels d'approvisionnement primaire et secondaire au niveau mondial, des potentiels de substitution, et la définition des conditions optimales de l'utilisation des ressources en fonction des contraintes énergétiques, environnementales, économiques et sociétales.
- L'amélioration technologique dans tous les secteurs de production et du traitement des minerais et des déchets, de la purification, de la métallurgie, de la conception, de l'usinage et de la production de composants, des technologies de production, de stockage et de transport de l'énergie, des technologies de réduction de consommation d'énergie, etc.
- L'analyse des évolutions sociétales et économiques et l'impact des dispositions réglementaires, de l'acceptabilité sociale et des conditions-cadre de l'approvisionnement en matières premières minérales primaires et secondaires.
- La modélisation dynamique des interactions industrie-matières premières-énergie-économie-société-environnement et la définition de

scénarios optimaux de transition énergétique et de leur cadence de réalisation en fonction des contraintes technico-économiques, mais aussi de celles liées à l'approvisionnement en matière et en énergie.

I. Cadre et enjeux

P. Christmann (BRGM) & O. Vidal (CNRS)

a. Une consommation mondiale de matières premières minérales en forte croissance

L'accroissement de la population mondiale à 9 milliards d'habitants en 2050, et l'intensification de la consommation de ressources naturelles par les populations 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), entraineront une forte augmentation des besoins en matières premières minérales.

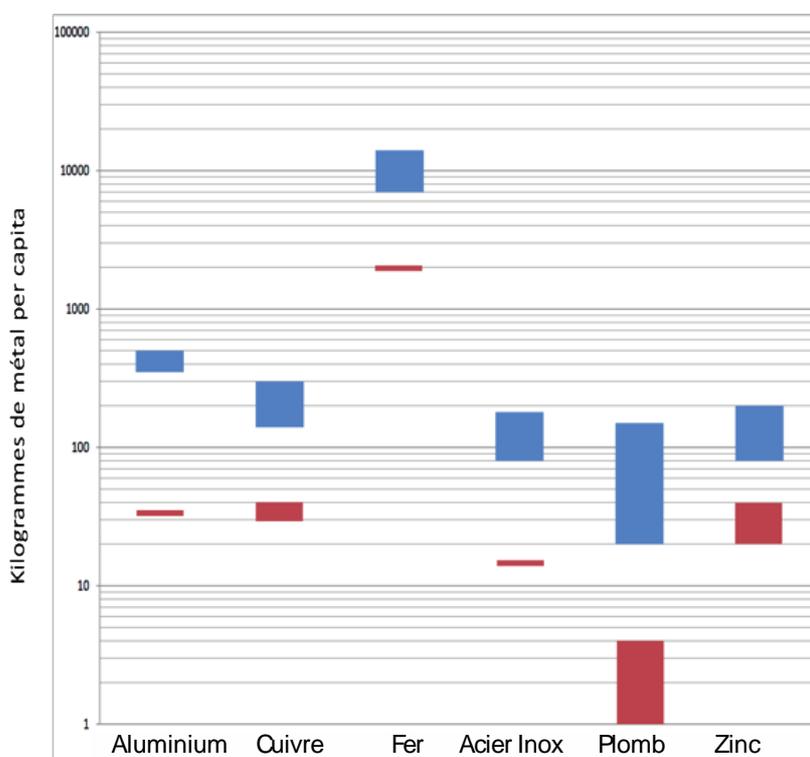


Figure 1 - Estimation du stock per capita (en kg, 2005), en cours d'utilisation, de divers métaux. Les barres bleues désignent les pays les plus développés (860 M personnes), les barres rouges désignent les pays moins avancés (5600 M personnes)- Source des données : Ref. 1

Le XXème siècle a vu la consommation de matières premières minérales

exploser, et la création d'un immense stock de métaux de plus en plus diversifiés dans l'anthroposphère¹. De 1900 à 2012, la population mondiale a cru de 1,7 à 7,2 milliards d'humains (facteur de 4,3), tandis que la consommation de cuivre primaire a cru d'un facteur 34 (Figure 2), malgré un recyclage estimé à 30 à 35%, notamment par l'International Copper Study Group (Ref. 2) en 2011.

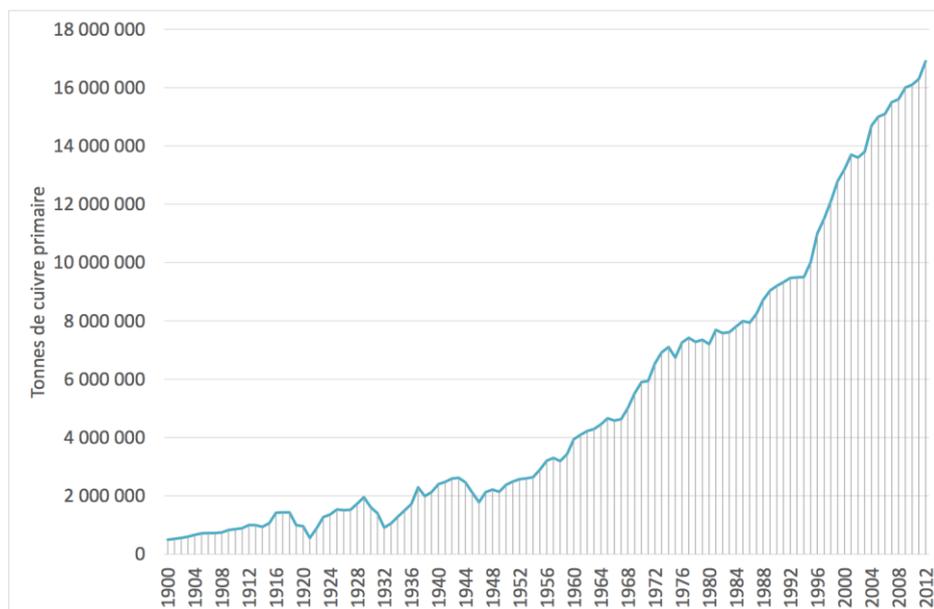


Figure 2: Production mondiale 1900 - 2012 de cuivre primaire (hors recyclage), exprimée en tonnes - Source des données: USGS Data Series 140 (Ref. 2)

Au début du XXème 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 technologies actuelles 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. Le développement industriel s'est donc accompagné d'une augmentation massive de l'exploitation de matières premières minérales (Figure 3, Figure 4) de plus en plus diversifiées avec tout d'abord les métaux légers (Al, Mg..), puis des métaux rares et des matières très pures pour les hautes technologies (terres rares (TR), Si ..). La Figure 3 indique le taux de croissance annuel moyen

¹ Ce stock est en partie immobilisé dans les infrastructures et les biens de consommation. Il devient disponible lorsque ceux-ci arrivent en fin de vie, pour la partie pouvant être collectée et recyclée dans des conditions économiques, environnementales et sociales acceptables. Il représente, par exemple l'équivalent de 35 ans de production minière (2012) dans le cas du cuivre.

(TCAM) de la production² de métaux pendant deux périodes de référence : une période de trente ans (1983-2012) et les dix années les plus récentes pour lesquelles des statistiques de production sont disponibles (2003-2012). Cette dernière période correspond à la phase d'accélération, spectaculaire de la croissance économique chinoise et à l'émergence rapide de hautes technologies, notamment dans le domaine de l'énergie (filiales photovoltaïques, éoliennes, stockage de l'énergie), du transport, de l'électronique, et des technologies de l'information et de la communication (TIC). La concomitance de ces facteurs a pour effet que les TCAM pour un ensemble de métaux indispensables à ces hautes technologies ont dépassé 5%, voire 10% au cours de la période 2003-2012 : antimoine, béryllium, cobalt raffiné, gallium, germanium, lithium, molybdène. L'émergence rapide de l'économie chinoise a également entraîné des TCAM rapides des métaux d'usage plus courants, utilisés pour la construction des bâtiments et des infrastructures. Quelques uns des TCAM enregistrés au cours de la période 1983-2012 sont par exemple : aluminium (5,1%), chrome (5,2%), cuivre (2,1%), fonte³ (4,9%), manganèse (6,1%), nickel (5,1%), zinc (3,6%).

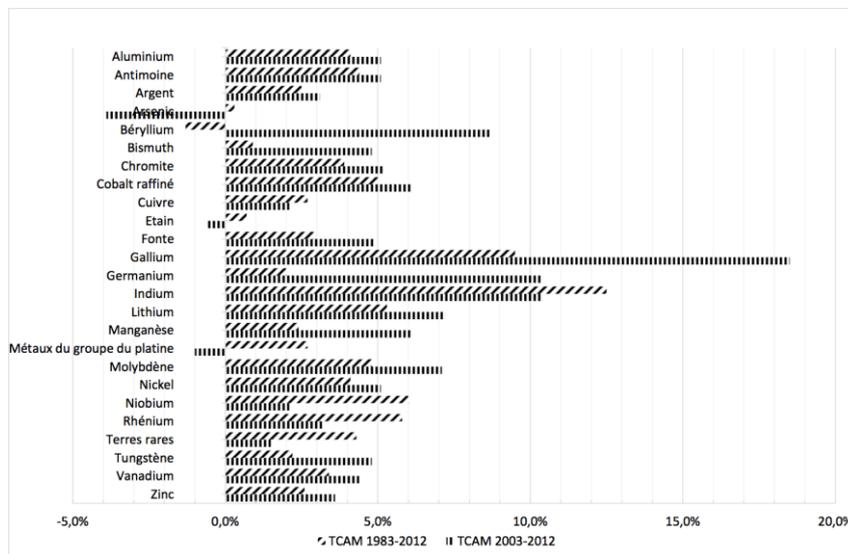


Figure 3: Taux de croissance annuel moyen (TCAM) de la production mondiale d'une sélection de matières premières minérales utilisées pour des applications dans le domaine de l'énergie. Périodes de référence : 1983-2012 (barre du haut) et 2003-2012 (barre du bas) – Source des données : USGS Data Series 140 (Ref. 4)

² Il n'existe pas de statistiques relatives à la consommation des matières premières minérales, seules existent des statistiques de production. A l'échelle de l'année production et consommation ne s'équilibrent pas du fait de l'existence de divers stocks, par contre on peut estimer que sur une durée de plusieurs années cet équilibre est atteint.

³ La production de fonte est une étape intermédiaire dans la production d'acier « primaire » (produit à partir de minerais de fer). Les statistiques de production d'acier incluant souvent une part de production secondaire (acier issu du recyclage de produits en fin de vie), les données relatives à la fonte reflètent mieux la dynamique de la demande en fer « neuf » de l'économie mondiale.

Nous sommes donc actuellement dans un contexte très dynamique 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 en a extrait depuis son origine. L'augmentation de la part du recyclage et d'une manière générale de l'économie circulaire est nécessaire, mais ne sera pas suffisante pour alimenter les besoins dans un contexte d'augmentation continue. Parmi les matières premières d'origine minérale, les métaux sont en première ligne car ils soutiennent non seulement les activités humaines de base mais aussi la plupart des développements dans le domaine des nouvelles technologies, par exemple dans les domaines du transport et de l'énergie.

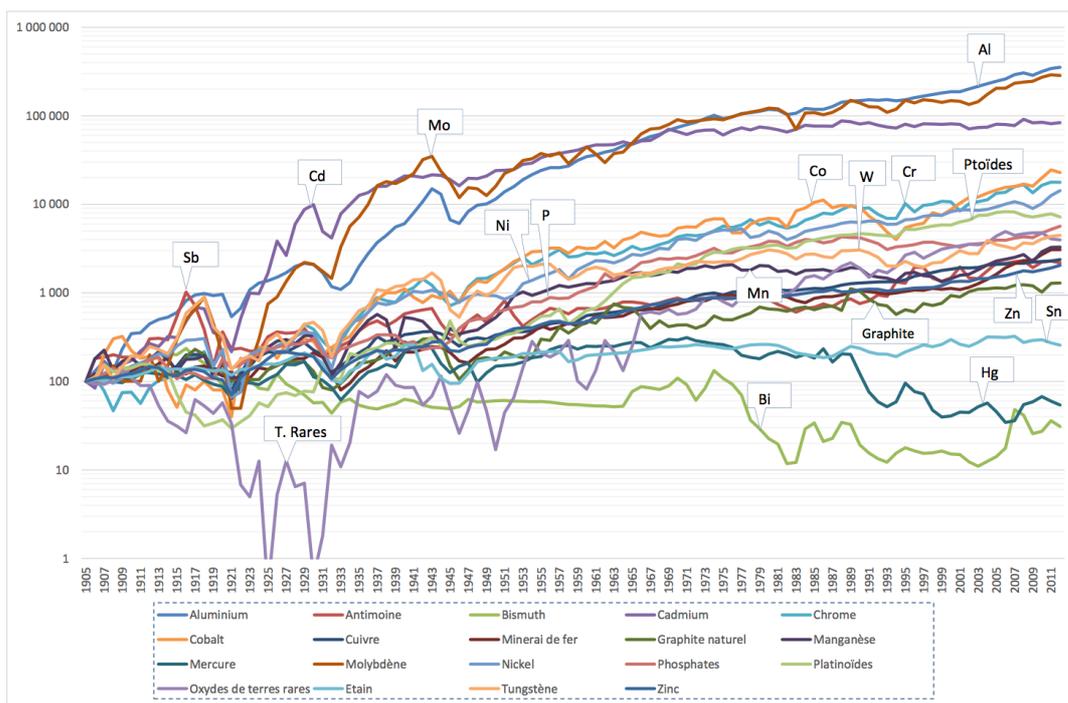


Figure 4: Evolution de la production mondiale (tonnes) d'une sélection de matières premières minérales entre 1905 (base 100) et 2012 – Représentation en échelle logarithmique – Source des données : Ref. 4

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 environnementaux et sociaux associés à l'extraction (pollution, atteintes à la biodiversité, consommation énergétique, relation négative entre dotations en ressources naturelles et croissance, Ref. 3). Les défis sont considérables, y compris en termes de quantité d'eau et d'énergie nécessaires pour maintenir les volumes de production actuels. Notre société doit faire face à ces défis et les gérer de façon à assurer un accès le plus durable possible aux ressources minérales, tout en intensifiant les efforts nécessaires pour permettre une transition vers une économie circulaire, garante d'un développement le plus durable possible. La recherche fondamentale et l'innovation sont une des clefs du succès.

b. Délocalisation des productions, perte d'intérêt des pays industrialisés pour les ressources minérales et dépendance à l'importation

Bien que le siècle dernier ait été marqué par une augmentation de la consommation en matières premières énergétiques fossiles et en minerais, le prix des métaux de base a en moyenne évolué de manière beaucoup plus modérée : l'indicateur de prix calculé sur la valeur, en \$ US constants, d'un panier de 15 matières premières minérales couramment employées, a pour une base 100 établie en 1900 (Figure 5) structurellement et fortement baissé au cours du XXème siècle, pour atteindre son niveau le plus bas en 2002 (valeur de l'indice : 55), puis fortement rebondir depuis, notamment sous l'effet de la croissance spectaculaire de l'économie chinoise (valeur de l'indice fin 2011 : 136). La variation historique des cours moyens annuels a été, par ailleurs fortement marquée par les conflits du XXème siècle, à l'exception notoire de la seconde guerre mondiale qui n'a eu qu'un impact faible sur les cours. Cette relativement faible variabilité des prix, malgré l'augmentation massive de la consommation, est largement liée aux progrès technologiques survenus depuis le début du XXème siècle, permettant une très forte augmentation de la productivité, l'exploitation de gisements moins concentrés (augmentation des réserves) et une délocalisation de la production hors des pays à fort PIB.

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 (hors Asie) vis à vis des enjeux liés aux ressources minérales.

En France, ce désintérêt a été notamment exprimé par la fin de l'Inventaire Minier National français en 1992 et par l'abandon de la thématique « matières premières minérales » dans la politique de coopération au développement de la France. Ceci aura eu pour conséquence de la placer, comme le reste de l'Union Européenne dans une situation de grande dépendance aux importations de ressources minérales. En France, les 80 mines de fer encore en activité après-guerre en Meurthe-et-Moselle et dans la Meuse ont été fermées, dont plus de la moitié pendant les années 70-80, ainsi que la totalité des autres exploitations pour minerais et la totalité des grands bassins houillers.

Le désintérêt pour les questions relatives aux matières premières a été également marqué par une diminution du soutien à la recherche publique dans les domaines miniers mais aussi de la métallurgie, et une perte de savoir-faire et de compétences sur ces sujets dans tous les organismes publics de recherche et de formation Français. La mission du BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière) a évolué vers les problèmes environnementaux, les Ecoles des Mines ont largement diversifié leur formation, et les formations universitaires en géologie économique ont disparu, à l'exception de l'application aux énergies fossiles. Le sous-investissement chronique dans la recherche sur les MP minérales, tant par l'Etat que l'industrie, s'est accompagné d'une fragmentation des communautés, d'une perte des compétences scientifiques, techniques et

des formations. Cela affaiblit considérablement les capacités de réponse et d'adaptation des pays occidentaux (dont la France), actuellement confrontés à l'émergence économique, politique et technologique des pays en développement.

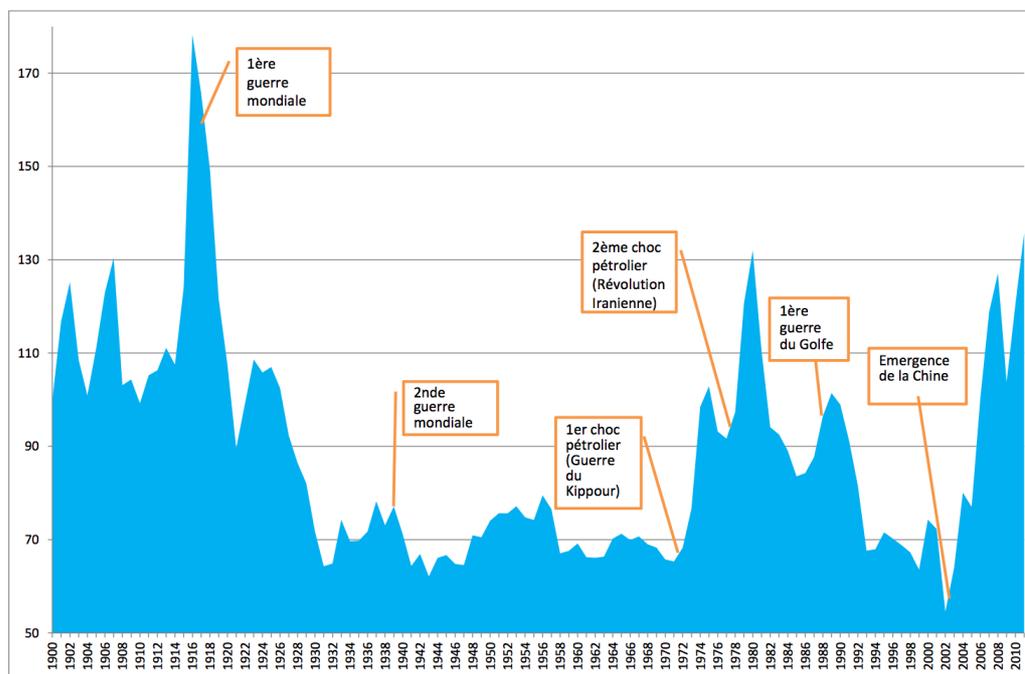


Figure 5: Evolution du cours annuel moyen, d'un panier de 15 matières premières minérales (Al, Au, Ba, B, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, P, Pb, Pt, Zn), en US \$ constants, entre 1900 et 2011 et grands événements historiques ayant pesé sur l'évolution des cours - Base 100 en 1900.

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 (TR) 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 (TR) est emblématique. Contrairement à ce que leur nom peut laisser penser, les Terres Rares ne sont pas rares, les réserves mondiales d'oxyde de TR étant estimées à 115 millions de tonnes en 2011 (Ref. 14) pour une consommation annuelle de 150 à 200 mille tonnes à l'horizon 2014, et elles sont assez bien réparties dans le monde. Avant 1965, les TR étaient extraites en Afrique du Sud, Brésil, Inde (10kt/an), puis de 1965 à 1985, aux USA (50kt/an). A partir de 1985, avec une production > 100kt/an c'est la Chine qui en prend le monopole de production à plus de 95 %, alors que ses réserves sont estimées à 35%. La principale raison est d'ordre économique : le gisement de TR de Bayan Obo, en Mongolie occidentale, a été exploité initialement pour le fer, les TR 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. Ces techniques, bon marché et ne nécessitant pas d'investissements lourds, ont été extrêmement polluantes et elles ne seraient pas envisageables dans les pays développés. La pollution est aggravée par l'abondance des actinides (thorium, l'uranium et le radium) qui sont naturellement associés aux TR. Ces éléments, non traités, se retrouvent dans les déchets miniers, les eaux et l'environnement. Les déchets miniers s'apparentent alors aux déchets radioactifs qui dans les pays occidentaux 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 leur production. Pourtant dès 2005, la Chine a annoncé que les conséquences environnementales de sa production devaient être traitées et en 2010, les Chinois ont annoncé que les problèmes environnementaux étaient tels qu'ils diminuaient leurs productions et exportations. On imagine aisément que d'autres raisons stratégiques et politiques ont également motivé cette décision. Mais quelles qu'en soient les causes, la diminution d'exportations a été un signal d'alarme et en quelques années, des centaines de projets miniers de TR ont vu le jour hors Chine. Tous n'iront pas à terme car la forte volatilité des prix rend l'investissement risqué, mais cela confirme que les monopoles de production ne sont pas une fatalité géologique.

c. Le lien énergie-matières premières minérales

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 de 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. Le passage à une énergie de plus faible intensité 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 produite à partir de sources renouvelables, qui nécessitent de bâtir une nouvelle infrastructure. Cette infrastructure est fortement consommatrice en métaux « conventionnels », tels que l'acier, l'aluminium ou le cuivre, mais également en métaux plus rares : néodyme, praséodyme et dysprosium dans les super-aimants de certaines éoliennes (600 kg d'aimants permanents/MW, en moyenne, dans les éoliennes à entraînement direct et à aimants permanents, (EDAP), Ref. 5, Ref. 6), tellure, indium, gallium sélénium pour les couches minces photovoltaïques, lithium pour les batteries des véhicules hybrides ou électriques, etc. 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 devra s'accompagner d'une consommation supplémentaire de métaux.

Le maintien de vecteurs d'énergie pour nos utilisations quotidiennes ne se résume pas à la disponibilité de la source primaire. Il concerne également la production de toute l'infrastructure nécessaire à son captage, traitement, stockage et distribution, ainsi qu'à son 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 le chapitre II.
- d'autre part, car les besoins en MP pour le secteur de l'énergie sont extrêmement variés. Ce sujet est traité dans le chapitre III.

D'autres sujets connexes sont également abordés dans les différents chapitres du présent document. Il s'agit en particulier des aléas de la chaîne de valeur des matières premières (**chapitre IV**), des capacités de recyclage (**chapitre V**), de la criticité des matières premières (**chapitre VI**) et des besoins en recherche (**chapitre VII**).

II. Les besoins énergétiques des industries minières et métallurgiques

P. Christmann (BRGM)

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) (Ref. 7), 22% de l'énergie consommée par l'industrie est utilisée pour la seule production d'acier et de ciment. Les données disponibles sur la consommation énergétique liée à la production des matières premières minérales restent cependant limitées, avec des résultats différant d'une étude à l'autre. Ceci vient du fait qu'un calcul à partir de données réelles de consommation, venant des opérateurs industriels, est impossible. Seuls certains opérateurs publient leur consommation énergétique, notamment dans le cadre de leurs rapports de Responsabilité Sociétale des Entreprises. Dans le cas de producteurs de plusieurs matières premières minérales il peut être impossible d'identifier la consommation énergétique nécessaire à la production de chaque minéral ou métal qu'ils produisent.

La quantité d'énergie nécessaire à la production d'une matière première minérale déterminée varie considérablement en fonction des métaux produits et des procédés employés pour la produire, le **Erreur ! Source du envoi introuvable.** offrant quelques repères synthétiques :

- L'exploitation minière nécessite une quantité très variable d'énergie selon le type d'exploitation (à ciel ouvert ou en souterrain), le taux de

découverte pour les exploitations à ciel ouvert, la dureté de la roche minéralisée ;

- Le traitement du minerai, souvent nécessaire pour obtenir un concentré utilisable pour la production métallurgique du minerai (c'est le cas par exemple pour les minerais de cuivre, pour les gisements à basse teneur de fer, de plomb, de zinc) implique le concassage et le broyage du minerai, l'un des postes les plus énergivores de l'ensemble de la chaîne de la valeur. La métallurgie peut, comme dans le cas de l'aluminium, nécessiter des quantités importantes d'énergie pour obtenir le métal à partir de son oxyde. Les quantités d'énergie requises pour la production d'une unité de poids de métal varient beaucoup en fonction du procédé utilisé.

Tableau 1: Energie consommée pour produire une tonne de matière première minérale (Ref. 8)

	Procédé	Energie contenue (GJ par tonne)	Tonnes de CO2 par tonne de matière première produite (hors recyclage)	Consommation annuelle mondiale d'énergie (en GJ)
Ciment		5,6	0,9	2,30E+09
Plomb	Haut fourneau (blast furnace)	19,6	2,07	7,50E+07
Acier	Haut fourneau	22,7	2,19	2,00E+09
Plomb	Procédé Imperial Smelting	32,5	3,18	
Cuivre	Voie pyrométallurgique	33	3,25	6,13E+08
Zinc	Procédé Imperial Smelting	35,8	3,34	
Zinc	Voie électrolytique	48,4	4,61	4,95E+08
Cuivre	Voie hydrométallurgique	64,5	6,16	
Nickel	Voie pyrométallurgique	113,5	11,45	2,42E+08
Nickel	Voie hydrométallurgique	193,8	16,08	
Aluminium	Procédé Bayer + électrolyse	211,5	21,81	8,00E+09

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, dérivé des travaux de J. Rankin (Ref. 8) fournit une estimation de la quantité d'énergie nécessaire, en 2011, pour la production d'une tonne d'une sélection de matières premières minérales produites à grande échelle⁴. La consommation annuelle mondiale d'énergie résultant de leur production est de 13,7 Exajoules, ce qui représente 2,5% de la consommation mondiale 2011. Cependant, certaines matières premières minérales ne sont pas prises en compte dans ce calcul, par exemple les granulats, les phosphates et la potasse et d'une manière générale, les minéraux industriels. Ceci laisse penser que la réalité pourrait se situer entre 3 et 4%. Ce tableau illustre bien l'impact des procédés utilisés sur la consommation d'énergie. Dans le cas du cuivre l'extraction par solvants suivie d'une extraction du cuivre par électrolyse, utilisée pour les minerais oxydés, consomme le double environ (64,5 MJ par tonne de cuivre raffiné produit) de l'énergie nécessaire à la production de cuivre raffiné à partir de

⁴ Les valeurs sont reportées pour un mode de production d'électricité à partir de charbon. Pour les procédés électrolytiques, les émissions de CO₂ dépendent de cette hypothèse, et donc du lieu d'implantation des industries de production. Des délocalisations de production de pays ayant un mix électrique peu carboné (Canada, France,...) vers des pays au mix moins vertueux a pour conséquence de dégrader le bilan global de production.

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 tonne de cuivre raffiné produit).

Van der Voet et al. (2013) (Ref. 9) estiment que l'industrie minière et métallurgique mondiale consomme entre 7 et 8% de l'énergie totale produite (Figure 6). La partie « métallurgie et raffinage » ressort très nettement comme la partie du cycle de vie des métaux la plus gourmande en énergie.

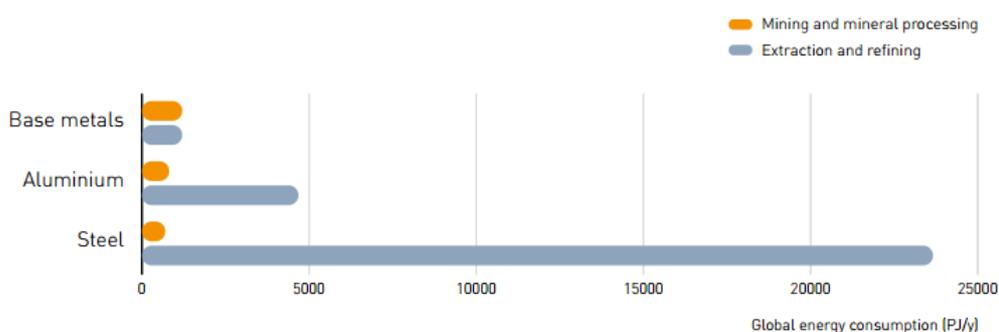


Figure 6: Consommation d'énergie de l'industrie minière et métallurgique mondiale, données pour les métaux de base (Cu, Ni, Pb, Zn), l'aluminium et l'acier. Les barres en orange représentent la consommation d'énergie nécessaire pour l'extraction minière des minerais et leur traitement (production de concentrés). Les barres grises représentent l'extraction du métal à partir du concentré et sa purification (métallurgie et raffinage) – Source : Ref. 9.

Le Tableau 2, compilé à partir de diverses sources spécifiées, dont la principale est le tableau 4.2. du rapport de Van Voet précité (Ref. 9), indique la consommation énergétique pour la production d'un grand nombre de matières premières minérales. Ces données peuvent avoir une portée limitée car elles ne sont relatives qu'à un seul ou 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). Cela dit, le Tableau 2 indique clairement que ce sont les métaux précieux (l'or et les métaux du groupe du platine) qui nécessitent le plus d'énergie pour la production d'une unité de poids de métal. Ceci s'explique par la teneur très faible des minerais, de l'ordre de 1 à 5 grammes par tonne en moyenne, alors qu'un gisement de cuivre de type porphyre cuprifère (le type de gisement le plus important pour la production mondiale de cuivre) contient entre 5 et 10 kilogrammes de cuivre à la tonne. C'est donc entre 2 000 et 10 000 fois plus de roche qu'il faut concasser et broyer très finement en vue de l'extraction métallurgique de l'or ou des métaux du groupe du platine que pour celle du cuivre. Pour autant, en termes de consommation globale d'énergie, les métaux précieux ont un poids limité dans la consommation d'énergie car les tonnages de métaux produits (2 690 t d'or, 183 tonnes de palladium et 201 tonnes de palladium produites en 2012 [12]) restent faibles.

Tableau 2: Consommation énergétique moyenne nécessaire à la production de matières premières minérales

Métal	Energie primaire requise, en GJ par t	Notes	Source des données	Métal	Energie primaire requise, en GJ par t	Notes	Source des données
Aluminium	190-230		European Aluminium Association (1);ecoinvent v2.2 (2); Bath ICE v2.0 (3)	Magnésium	270-350		ecoinvent v2.2; Ashby, 2009
Antimoine	140		ecoinvent v2.2	Manganèse	52-59		ecoinvent v2.2; Bath ICE v2.0
Cadmium	17		ecoinvent v2.2	Mercur	90-180	Liquide	ecoinvent v2.2; Bath ICE v2.0
Cérium (oxyde)	56	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010 [8]	Molybdène	15-380		ecoinvent v2.2; Bath ICE v2.0
Chrome	83		Bath ICE v2.0	Néodyme	358	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010
Cobalt	130		ecoinvent v2.2	Nickel	180-200	Classe I (au moins 99% de Ni)	ecoinvent v2.2; Eckelman 2010 [10]
Cuivre	30-90	Divers procédés de production	Deutsches Kupfer Institut (4);ecoinvent v2.2; Bath ICE v2.0	Palladium	180000		ecoinvent v2.2
Dysprosium (oxyde)	4154	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010	Platine	190000		ecoinvent v2.2
Erbium (oxyde)	328	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010	Praséodyme	442	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010
Europium (oxyde)	97	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010	Rhodium	560000		ecoinvent v2.2
Ferrocrome	37	68% Cr	ecoinvent v2.2	Samarium	9159	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010
Ferromanganèse	23	75% Mn	ecoinvent v2.2	Silicium	1000-1500	Pureté 6N, pour semi-conducteurs	ecoinvent v2.2
Ferronickel	160	25% Ni	ecoinvent v2.2	Argent	1500		ecoinvent v2.2
Gadolinium (oxyde)	320	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010	Tantale	4400	Pureté 3N, pour condensateurs	ecoinvent v2.2
Gallium	3000	Pureté 6N, pour semi-conducteurs	ecoinvent v2.2	Tellure	160	Pureté 7N, pour semi-conducteurs	ecoinvent v2.2
Or	310000		ecoinvent v2.2	Terbium	7456	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010
Indium	2600		ecoinvent v2.2	Étain	250		ecoinvent v2.2; Bath ICE v2.0
Acier	20-25		World Steel Association (5);ecoinvent v2.2; Ashby, 2009 [9]	Titane, métal	360-750		Norgate et al., 2007 [11]; Bath ICE v2.0
Acier inoxydable	-304		International Stainless Steel Forum (6);ecoinvent v2.2	Vanadium	3700		Bath ICE v2.0
Lanthane (oxyde)	61	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010	Yttrium	294	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010
Plomb	25-50		ecoinvent v2.2; Bath ICE v2.0; GaBI (7)	Yttrium	213	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010
Praséodyme (oxyde)	31,63	(a)	Koltun and Tharumarajah, 2010	Zinc	49-55		International Zinc Association (8);ecoinvent v2.2
Lithium	380-850		ecoinvent v2.2	Zirconium	1600		Bath ICE v2.0

Notes:

- (1) European Aluminium Association, site Internet: <http://www.eaa.eu>
 - (2) Les bases de données Ecoinvent (versions 2.2 et 3.0) ne sont disponibles que sur abonnement, voir ici: <http://www.ecoinvent.org/database/>
 - (3) disponible ici: <http://web.mit.edu/2.83/www/readings/IEv2.pdf>
 - (4) Deutsches Kupfer Institut, site Internet: <http://www.kupferinstitut.de>
 - (5) World Steel Association, site Internet: <http://www.worldsteel.org/>
 - (6) International Stainless Steel Forum, site Internet: www.worldstainless.org/
 - (7) GaBI, base de données du cycle de vie de PE International, site Internet: <http://www.gabi-software.com>
 - (8) International Zinc Association, site Internet: <http://www.zinc.org>
- Les références bibliographiques sont indiquées entre [].

La consommation d'énergie de l'industrie minière et métallurgique devrait continuer de croître fortement dans les décennies à venir car la production de métaux à partir de minerais va continuer de croître, malgré les progrès du recyclage. Cette tendance devrait résulter de la croissance démographique, mais également de la hausse de niveau de vie moyen au niveau mondial; plus de cinq cents millions de personnes sont sorties de la pauvreté entre 1978 et 2014 en Chine (Ref. 15). Cette dynamique est très supérieure aux possibilités du recyclage, car tous les métaux et matériaux d'origine minérale utilisés dans la construction d'infrastructures ou de bâtiments (acier, aluminium, ciment cuivre, zinc) ont des temps d'immobilisation très longs (décennies, voire siècles) avant de pouvoir être recyclés. Or la production de ces matières premières consomme beaucoup d'énergie (cf. Tableau 2).

Un autre facteur contribue également à augmenter la consommation d'énergie : il s'agit de la baisse progressive de la teneur en métal des gisements (Exemple du cuivre : **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). En effet, dans le cas de nombreux métaux, la partie des gisements proche de la surface, ou affleurant, a été enrichie par l'action de facteurs climatiques et/ou biologiques. Ces parties riches, aisément accessibles et donc faciles à exploiter, permettent de générer des flux de trésorerie pour amortir plus rapidement les investissements initiaux nécessaires au démarrage d'une nouvelle mine. La baisse progressive de la teneur des gisements a été longtemps compensée par l'emploi de technologies de production de plus en plus efficaces en termes d'énergie consommée par unité de poids de métal produit. Cela a permis de réduire le coût d'extraction et donc

l'augmentation des réserves (contrôlées par des facteurs économiques). Mais le gain en efficacité pourra-t-il continuer à compenser le besoin exponentiellement croissant en énergie avec la baisse des teneurs (Figure 8) et la croissance de la production ? La réponse à ces questions est difficile car il n'existe que très peu de données permettant de faire des analyses rigoureuses de la consommation énergétique par unité de métal produit. En ce qui concerne le cuivre, l'un des métaux les mieux documentés par des séries statistiques, un rapport de l'US Bureau of Mines (Ref. 16) indique une consommation moyenne de 40 627 BTU par livre américaine de cuivre raffiné produit pour l'année 1963, soit l'équivalent de 94,5 GJ par tonne métrique de cuivre produit. Les données publiées par la Commission chilienne du cuivre COCHILCO pour la production chilienne de cuivre en 2013 indiquent une consommation moyenne de 56,8 GJ par tonne de cuivre raffiné (Ref. 17), le Chili représentant 12,9% de la production mondiale de cuivre raffiné en 2013.

Ces chiffres, cohérents avec ceux indiqués dans les tableaux 1 et 2, indiquent une nette amélioration de l'efficacité énergétique dans la production d'une tonne de cuivre raffiné (environ 40% dans l'exemple du Chili), mais ils pèsent relativement peu face à l'augmentation de 294% de la production mondiale de cuivre survenue depuis 1963 (Ref. 4), ce qui a pour conséquence une forte croissance de la demande énergétique de l'industrie du cuivre. Des conclusions similaires peuvent être tirées pour tous les métaux de base.

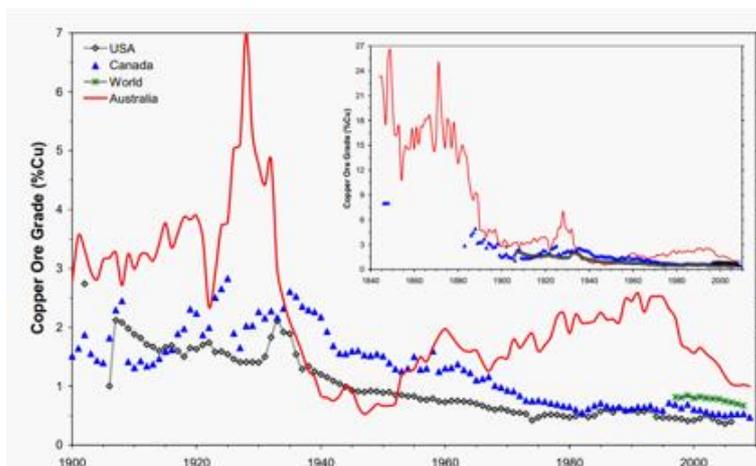


Figure 7: Evolution de la teneur en cuivre des gisements exploités entre 1900 et 2010 (Insert: entre 1840 et 2010) – les teneurs rapportées pour le monde (« World ») représentent entre 70 et 80% de la production mondiale. Source du diagramme: Ref. 18, Ref. 19

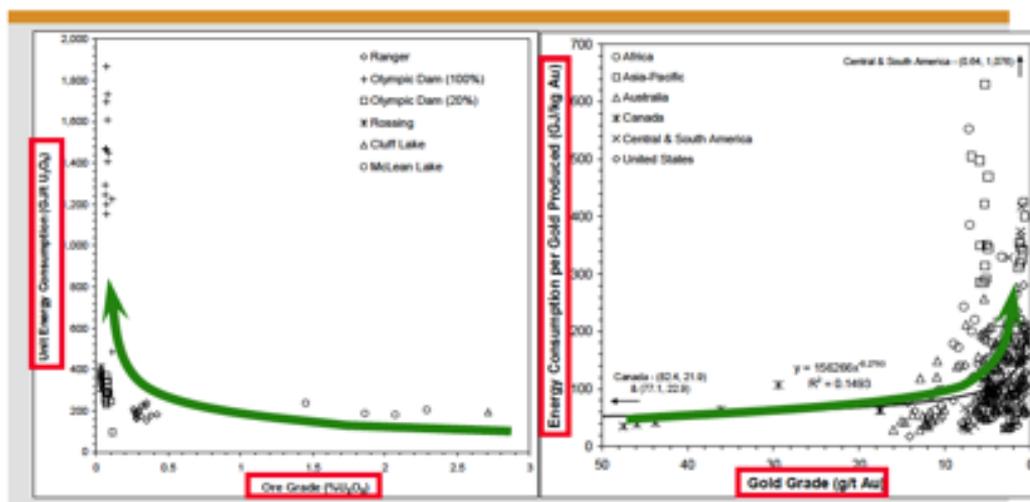


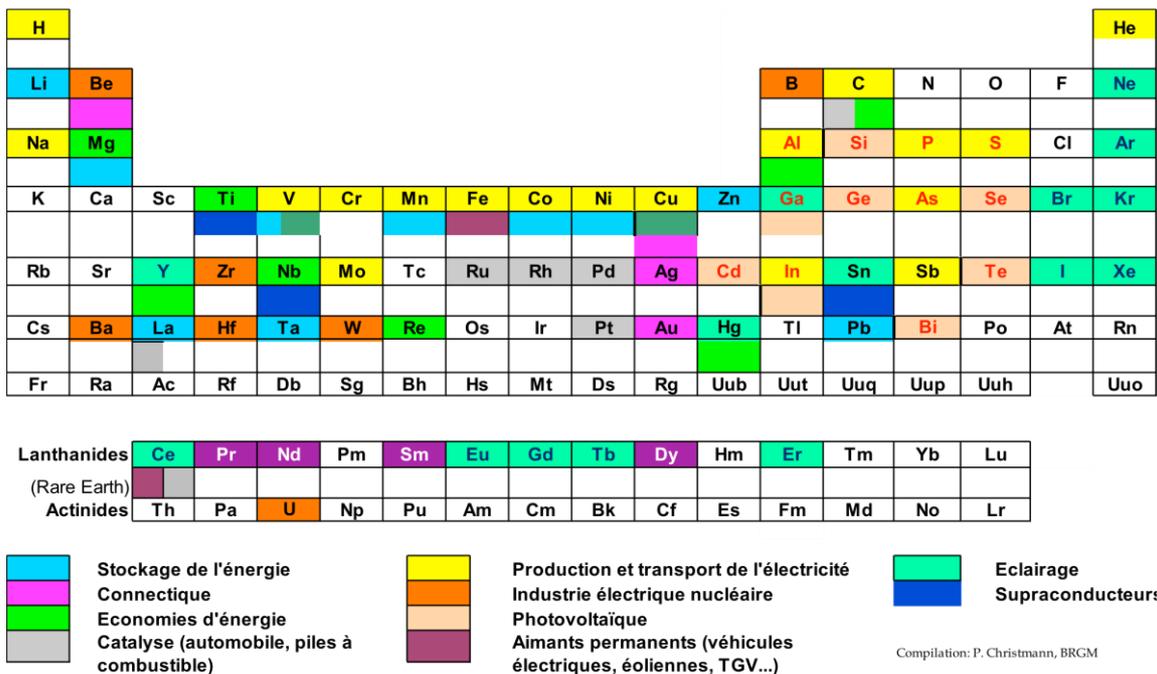
Figure 8: Exemple de relation exponentielle entre teneur de minerais (à gauche : uranium, à

III. Les besoins en matières premières pour l'énergie

O. Vidal (CNRS), D. Clément (ADEME), P. Primard (ADEME)

a. Les besoins par grands domaines d'application dans le secteur de l'énergie

Les besoins en MP pour le secteur de l'énergie sont très variés. Ils concernent le secteur de la production d'énergie, de son stockage, de sa distribution, de la transformation des hydrocarbures fossiles en carburant, mais également des technologies permettant d'économiser de l'énergie, e. g. en produisant des alliages plus légers et plus résistants dans les transports, des lampes de basse consommation, ou des technologies nécessitant des alliages spéciaux pour des conditions extrêmes, comme dans le cas des réacteurs nucléaires ou des turbines par exemple. Un aperçu des principaux secteurs énergétiques concernés par l'utilisation de chaque élément du tableau périodique est donné sur la figure 18, et les utilisations les plus communes sont développées ci-dessous de façon très largement inspirée par les travaux de Talens Peiro et al. (2011) (Ref. 26) et Zepf et al. (2014) (Ref. 27).



Les symboles chimiques des éléments semi-conducteurs sont indiqués en lettres rouges

Figure 9: Eléments d'origine minérale (à l'exception des gaz rares Ne, Ar, Kr, Xe) utilisés en relation avec des technologies du domaine de l'énergie.

1 Hydrocarbures et charbon

Exploration-Production d'hydrocarbures

L'exploration et la production de pétrole et de gaz sont totalement dépendantes d'aciers spécialisés. L'acquisition sismique sur terre ou sur mer, le forage et les pipelines pétroliers nécessitent différents alliages d'aciers avec du chrome, du nickel, du molybdène, du manganèse, du cobalt, du vanadium ou du tungstène. L'extraction d'hydrocarbures très enfouis (plusieurs milliers de mètres en conditions très corrosives) repose sur la disponibilité d'aciers à faible pouvoir de corrosion pour la tuyauterie et devant résister aux hautes pressions et différences de température. Le gaz (dont 40% des réserves conventionnelles sont acides) est traité, expédié et stocké dans des cuves en acier.

Charbon

De grandes quantités d'acier de bas degré sont utilisées pour les galeries de mine, des aciers plus spécialisés pour les machines d'extraction. Le cuivre est également un composant essentiel pour les moteurs des mines modernes. La majeure partie du charbon est actuellement utilisée pour la production d'électricité, qui nécessite des aciers spécialisés pour la fabrication des turbines des génératrices.

Catalyse

Automobile : 95% des automobiles neuves sont équipées de pots d'échappement catalytiques, qui permettent de réduire les émissions de CO et de NOx. Ils contiennent des combinaisons de PGM (Pt-Rh-Pd) et des oxydes de TR (Ref. 31). En moyenne, les convertisseurs catalytiques contiennent de 2g (Ref. 32) à 10 g (Ref. 33) de Pt-Rh ou de Pt-Pd et selon les équipements et le niveau d'hydratation considérés, de 100g (Ref. 34) à 7000 g (Ref. 33) de métaux rares.

Raffinage du pétrole : Les catalyseurs sont utilisés pour améliorer la production d'hydrocarbures légers durant le processus de craquage (procédé FCC) des huiles lourdes et pour reformer les fractions lourdes résiduelles après distillation de brut. Les catalyseurs utilisés sont des minéraux synthétiques de type zéolite contenant des PGM (principalement du rhénium) et des TR (La et Ce) (Ref. 35). Environ 4.7 kg de catalyseur sont utilisés par litre d'huile lourde entrant dans le processus FCC. Le contenu en TR peut varier entre < 1% et 3% (Ref. 36, Ref. 37). En 2008, 1,668 milliards de litres d'hydrocarbures ont été traités par FCC (Ref. 38), qui ont requis environ 16000 tonnes de TR (environ 10 g/l) dont 1600 tonnes de cérium et 14500 tonnes de lanthane. En 2010, 9.24 tonnes de rhénium ont été utilisées dans l'industrie pétrolière.

Captage et Stockage de CO₂

Les solvants utilisés pour le captage de CO₂ sont souvent des amines corrosives, qui exigent des aciers spéciaux contenant des éléments comme Cr, Co, Mn, Mo, Ni, Nb et Hf, Re, Ta, Y.

2 Production d'électricité

Charbon

Les filières de production d'électricité à base de charbon évoluent vers des technologies aux rendements plus élevés, obtenus avec des procédés fonctionnant à de plus hautes températures et pressions, nécessitant le recours à des aciers spéciaux.

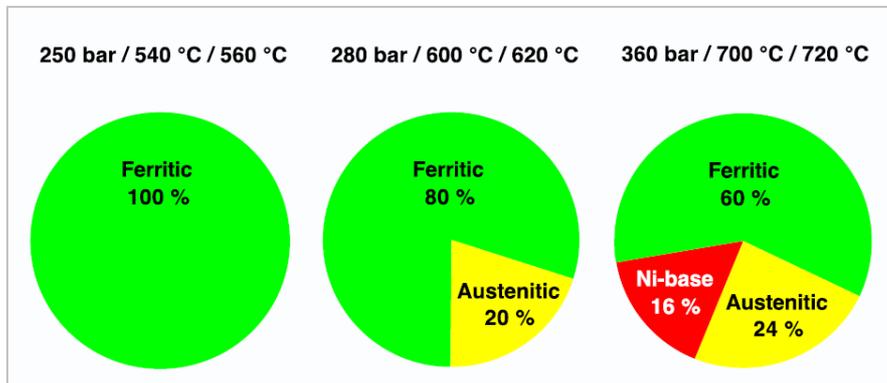


Figure 10 : Composition des aciers pour les chaudières à charbon pulvérisé sous, super et ultra-super critiques (ALSTOM)

Nucléaire

Ce secteur énergétique nécessite une foule d'aciers spécialisés et de matériaux, y compris le lithium et les terres rares, pour contrôler les réactions et confiner les réacteurs, de l'indium pour les barres de contrôle, et selon les réacteurs, de l'étain, du zirconium, du niobium, du fer, des alliages à nickel-chrome (zircaloy) pour le gainage du combustible. Comme pour tous les générateurs électriques, les turbines des centrales nucléaires utilisent des alliages d'aciers spéciaux pour assurer des rendements soutenus à haute température et fortes contraintes.

Eolien

L'acier est nécessaire pour construire les tours et la nacelle accueillant le générateur et le mécanisme transformant l'énergie des pales rotatives en électricité induite dans de forts champs magnétiques. Ce champ magnétique est généré soit par des aimants permanents riches en terres rares (néodyme, praséodyme et dysprosium), soit par des aimants classiques et des bobinages en cuivre formant un collecteur d'induit. Le cuivre est également présent dans les pôles inducteurs et les pôles auxiliaires de la génératrice. La grande majorité des systèmes utilisant des TR sont actuellement fabriqués et installés en Chine. A l'heure actuelle, les quantités de TR utilisées pour les éoliennes sont de l'ordre de 200 kg/MW de puissance électrique nominale, mais l'augmentation du prix des TR stimule l'innovation technologique et la recherche visant à réduire significativement leur utilisation dans les aimants permanents. Deux types d'éoliennes sont en activité: celles utilisant une boîte de vitesse et celles à entraînement direct, qui offrent une plus grande fiabilité et nécessitent moins d'entretien, mais nécessitent des aimants de plus grandes tailles et donc plus de TR.

Hydro-électricité

Ce secteur est lui aussi tributaire d'acier pour les conduits forcés, les aubes

de turbines résistantes à l'abrasion et la cavitation.

Solaire

Il existe actuellement trois technologies: photovoltaïque, solaire thermique solaire et puissance solaire concentrée (CSP).

- Les systèmes photovoltaïques qui convertissent directement l'énergie solaire en l'électricité utilisent deux technologies différentes: les cellules de silicium qui représentent environ 90% du marché et la technologie à couche mince basée sur des combinaisons d'éléments comme le gallium, l'arsenic, le cadmium, le tellure, le cuivre, l'indium et sélénium. L'avantage de la première technologie réside dans une efficacité plus importante, mais elle présente l'inconvénient d'être plus coûteuse. Les deux technologies utilisent l'argent comme matériau de contact. De nouveaux semi-conducteurs sont en cours développement, e. g. des composés organiques, mais ils ne sont pas encore commercialement viables.
- Le solaire thermique, qui est utilisé pour chauffer l'eau sanitaire, est dominé par le cuivre et le zinc.
- Les systèmes CSP (Concentrated Solar Power) utilisent l'énergie solaire pour chauffer un fluide avec un point d'ébullition plus élevé que l'eau, qui est stocké dans un réservoir. Les échangeurs de chaleur utilisent cette énergie stockée pour produire la vapeur qui actionne des turbines et des générateurs d'électricité. Les réflecteurs utilisés pour concentrer l'énergie solaire reposent sur des surfaces polies, généralement avec un revêtement d'aluminium ou d'argent. L'échelle des installations CSP est illustrée, par exemple, par trois centrales solaires à Andasol en Espagne, chacune composée de 200.000 miroirs paraboliques et pouvant générer 50 MW d'électricité.

Chaleur fatale

Il existe des technologies pour produire de l'énergie électrique ou thermique de façon décentralisée en utilisant les sources de chaleur de basse à moyenne température, dont les sources fatales. Il s'agit par exemple de technologies à Cycle Organique de Rankine (ORC) ou des Pompes à Chaleur Haute Température développées par la société Française Enertime, qui couvrent des domaines de puissance de l'ordre du MWe (<http://www.enertime.com/fr/machines-a-cycle-organique-de-rankine>).

Le développement de ces technologies reste limité, mais leur marché potentiel est important, de l'ordre de 1500MWe au niveau européen et probablement trois à quatre fois plus au niveau mondial. Les infrastructures demandent essentiellement des métaux de base, dont principalement de l'acier carbone et de l'aluminium et du cuivre pour la génératrice asynchrone. Ces systèmes ne demandent pas de synchronisation en général (car équivalent à de l'effacement) et se différencient en ce point d'une ferme solaire ou éolienne.

3 Réseaux de transport et distribution d'électricité

Les réseaux d'électricité nationaux et transnationaux ont été construits à l'aide de grandes quantités d'aluminium et de cuivre pour les câbles, les générateurs et les transformateurs, ainsi que de l'acier pour les pylônes.

Aujourd'hui, ces réseaux subissent une mutation qui suit l'évolution des modes de production et l'intégration des systèmes solaires et éoliens (production distribuée et fluctuante) qui complètent et/ou remplacent les grandes centrales thermiques.

Pour bâtir et connecter ces nouveaux générateurs, des besoins en métaux sont nécessaires. Cela est vrai pour les câbles, mais aussi pour les systèmes sophistiqués de commutation et de contrôle. De nouveaux réseaux de transmission longue distance sont également prévus pour connecter les grands parcs éoliens offshore en mer du Nord aux réseaux électriques européens. En Europe, le « Ten Year Network Development Plan » (Ref. 40) est très ambitieux puisqu'il prévoit d'ici 2030 en Europe environ 45000 km de nouvelles lignes dont 18000 km de lignes haute tension en courant continu sous-marines (Cu) et 5000 km de lignes aériennes (FeAl), 18000 km de lignes en courant alternatif aériennes (FeAl) et 5000 km d'anciennes lignes à mettre à niveau. Cela représente 1400 kt de Fe, 6100 kt de béton, entre 260 et 450 kt de Cu en fonction du type de câble utilisé, 255 kt de Pb, entre 100 et 250 kt d'Al et 20 kt de Zn. Ces chiffres sont probablement à multiplier par 3 à 6 pour les besoins mondiaux. A cela s'ajoutent les jonctions, stations de compensation et toute l'infrastructure de puissance (transformateurs, onduleurs, redresseurs, etc.). Pour transporter l'électricité sur de grandes distances, il est envisagé d'utiliser un nouveau type de conducteurs de type alliages fer-terres rares, ou de type étain- ou cuivre-argent pour les courants continus à haute tension, et l'aluminium pour les courants alternatifs. Comme pour les réseaux de production décentralisée, les systèmes de contrôle demanderont une grande variété et d'énormes quantités de métaux.

4 Stockage électrique

Le stockage est indispensable dans le domaine du transport (véhicules hybrides et électriques) ou nomades (appareils électroniques mobiles). En 2010, environ 20000 tonnes de cobalt ont été utilisées pour la fabrication d'accumulateurs électriques (76000 tonnes produites mondialement). D'autres métaux sont également utilisés en abondance, comme le Ni dans les batteries de type NiMH, et le lithium et le cobalt dans celles du type Li-ion. Actuellement, les quantités d'équivalent Li métal sont < 1 g, dans les téléphones portables, de l'ordre de 10 g dans les ordinateurs, 3.3 kg dans les véhicules électriques et 1.3 tonne pour un stockage de 8MWh. Le ruthénium et l'iridium, et les TR sont également utilisés (e.g. 13000 tonnes de TR ont été utilisés pour la fabrication d'accumulateurs de type NiMH (Ref. 28)). Au niveau national, l'étude PEPS commanditée par l'ADEME, l'ATEE et la DGCIS en 2013 a montré que pour la France métropolitaine, les besoins de stockage supplémentaire sur le réseau électrique seront assez faibles jusqu'en 2030 (entre 1 et 2 GW) et qu'il se ferait prioritairement sous leur forme les plus compétitives, à savoir les STEP (pompage hydraulique) et non électrochimique.

Le pilotage de la demande pourrait couvrir de façon efficace le besoin de flexibilité induit par le développement des énergies renouvelables. Cela dit, à défaut d'interconnexions massives, le stockage d'électricité pourrait rester indispensable pour mettre en phase la demande et la production d'énergie à partir de sources renouvelables. Les technologies mises au point

sont très variables et peuvent nécessiter des matériaux de construction conventionnels comme l'acier (stockage d'air comprimé) ou des éléments plus rares dans le cas de batteries géantes utilisant du vanadium ou des cellules lithium-ion. A titre d'exemple, la technologie à air comprimé qui couvre une gamme de puissance de l'ordre de 10 MW et un temps de décharge de l'ordre de la dizaine d'heure, donc compatible avec les productions éoliennes, utilise de l'ordre de 320 t/MW d'acier, 2,5 t/MW d'Al et 5 t/MW de Cu (Ref. 29). Un système de stockage sous forme d'hydrogène de 2 MW contient quant à lui 120 t d'acier, 2,25 t de Cu et 0,6 d'Al. Dans les deux cas, les infrastructures de stockage d'électricité ont une intensité matière en métaux de base du même ordre de grandeur que celles des systèmes de production reportés sur la Figure 11.

5 Efficacité énergétique

Alliages et économies d'énergie

Certains éléments sont utiles pour produire des « superalliages » permettant d'améliorer les performances énergétiques (diminution du poids et meilleure résistance mécanique). Les éléments critiques sont principalement le cobalt, l'indium, le niobium, le tellure, le tantale, le tungstène et les TR (scandium, yttrium and cérium). L'établissement d'une liste exhaustive est difficile, mais parmi les exemples phares, on peut citer le cobalt, présent dans certains superalliages de haute température. En 2010, 16600 tonnes de cobalt ont été utilisées pour les alliages de moteurs d'avion. La même année, 69 tonnes d'indium ont été utilisées pour la fabrication d'alliages à forte résistance mécanique dans les secteurs du transport aérien et automobile (Ref. 26). Le niobium permet quant à lui d'améliorer la résistance mécanique à haute température des aciers : aciers fer-niobium contenant entre 40% et 70% de niobium et aciers à niobium-tantale. Des aciers à faible concentration en niobium sont également utilisés pour les carrosseries automobiles, les plateformes pétrolières off-shore, les pipelines, et pour certaines applications de l'industrie pétrochimique. En 2008, 63000 tonnes de niobium ont été consommées pour la fabrication d'acier et d'alliages et en 2010, 200 tonnes de tellure pour produire des alliages d'acier et de cuivre et de plomb à performances mécaniques élevées (Ref. 26). Le tantale, le rhénium, le chrome, le molybdène, le nickel et le tungstène, le zinc, le titane, le scandium, les TR sont également utilisés en quantités variables mais significatives en alliages métalliques. Par exemple, 8000 tonnes d'oxyde de TR ont été utilisées dans des alliages de fer et d'aluminium en 2010 hors applications pour les batteries (Ref. 28).

Eclairage

Avec le remplacement des ampoules de tungstène, le gallium, l'indium, le phosphore et l'aluminium et les TR sont de plus en plus utilisés dans le secteur de l'éclairage, notamment pour fabriquer les diodes électroluminescentes (LED) et les ampoules fluorescentes compactes. Différentes combinaisons de dopant ont été développées pour améliorer la conversion d'électricité en différentes couleurs d'émission claires. Le cérium, l'euporium, le terbium et l'yttrium, sont tous utilisés dans les LED modernes. Les lampes fluorescentes compactes utilisent la fluorescence de la vapeur de mercure. Une variété de matériaux est également utilisée pour modifier la couleur de la lumière émise. Il s'agit des mêmes terres rares que celles employées dans les LED ainsi

que le lanthane.

6 Zoom sur les aimants permanents

Le marché des aimants est actuellement estimé avoir la répartition suivante : 34% ferrites dures, 65% d'aimants à TR (samarium-cobalt et plus récemment néodyme-fer-bore (NIB)) utilisés pour les moteurs de véhicules électriques et les éoliennes, et 1% à aluminium-nickel-cobalt (Alnico) (Ref. 39). Les aimants à ferrite contiennent également des lanthanides, mais les quantités ne sont pas publiées (Ref. 30). En moyenne les aimants NIB contiennent 30% de TRs, 69% de fer et 1% de bore. Les 30% de TR sont composés de 70% de néodyme, 24% de praséodyme, 5% de dysprosium et 1% de terbium (Ref. 28). En 2010, 24060 tonnes de TR ont été utilisées pour la fabrication d'aimants permanents, dont 16700 tonnes de néodyme, 5630 tonnes de praséodyme, 1200 tonnes de dysprosium, 480 tonnes de gadolinium et 50 tonnes de terbium pour un marché des aimants NIB avec une répartition suivante : 61% dans les appareils électriques et électroniques comme les disques durs, les hauts parleurs et les micros, 15% dans les éoliennes, 14% dans les véhicules électriques et 10% pour les scanners à résonance magnétique. Les quantités utilisées pour les éoliennes et les véhicules électriques sont en augmentation, alors que le remplacement des disques durs par des mémoires flashes pourrait desserrer la contrainte en diminuant la demande en TR pour cet usage.

b. Intensité matière de différents modes de production d'électricité

La grande diversité des besoins en ressources minérales par grands secteurs liés à celui de l'énergie est discutée dans la section précédente et elle est illustrée sur la Figure 11 pour le secteur de la production d'énergie. Dans le présent chapitre, nous essayons de quantifier les besoins en quelques éléments « de base » pour la production d'électricité en utilisant différents types de ressources, fossiles et renouvelables. Le but est d'avoir une estimation des quantités en ces éléments pour une même puissance installée. Ces valeurs sont utilisées dans le chapitre suivant pour estimer les quantités de matières premières nécessaires à l'évolution du mix énergétique et à la consommation d'électricité envisagée par différents scénarios existants. La difficulté d'une telle estimation est liée à la grande variabilité des technologies, ainsi qu'à la pauvreté d'études validées qui reportent des intensités de matière première de manière complète. La plupart des études publiées se limitent à l'infrastructure de production isolée des autres équipements (transformateurs, connexion, fondations, etc.) et ont donc un intérêt limité (et souvent focalisé sur les matières premières critiques). De plus, pour un même secteur de production, les technologies peuvent être assez différentes, et leur évolution

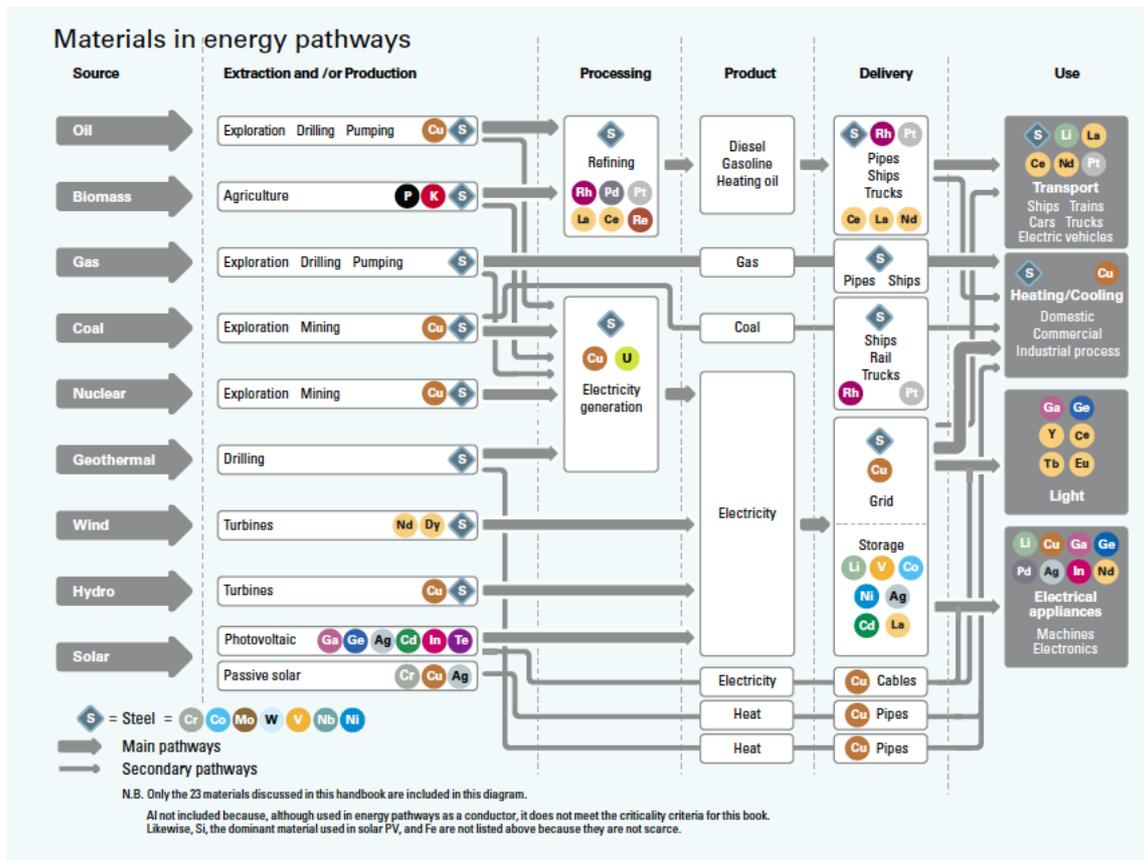


Figure 11: Principaux besoins en matières premières pour la production d'énergie (Ref. 27)

au cours du temps entraîne de nouveaux besoins. A titre d'exemple, quatre technologies éoliennes sont opérationnelles actuellement : Double-fed asynchronous generator (DFAG) ; Conventional asynchronous generators (CAG), Conventional synchronous generators (CSG) et Permanent magnet synchronous generators (PMSG)), qui nécessitent des quantités de cuivre variant entre 0.3 et 4 tonnes de cuivre par MW de puissance (Ref. 41). Les quantités d'acier et de béton sont également très différentes pour les éoliennes terrestres ou marines, et selon les types de fondation. Les mêmes observations sont faites pour les technologies photovoltaïques sur les bâtiments ou en ferme, avec ou sans asservissement. La variabilité ne se limite pas aux éléments les plus courants, et les éléments rares (type REE dans les aimants permanents des éoliennes, ou Gallium, Indium, Sélénium dans les technologies à couche mince des panneaux solaires) montrent également de fortes variations. Cela étant dit, une comparaison de premier ordre est indiquée sur la Figure 12, qui montre les moyennes et le domaine de variation (calculés à partir d'une centaine de sources différentes) des teneurs en béton, acier, Al, Cu de dix technologies de production d'électricité différentes. Il est important d'insister sur le fait que les barres d'erreur ne sont pas statistiquement représentatives du parc installé, mais de la variabilité des résultats entre différentes études, s'appuyant elles-mêmes sur des données qui ne sont pas forcément représentatives de la proportion relative des différentes technologies.

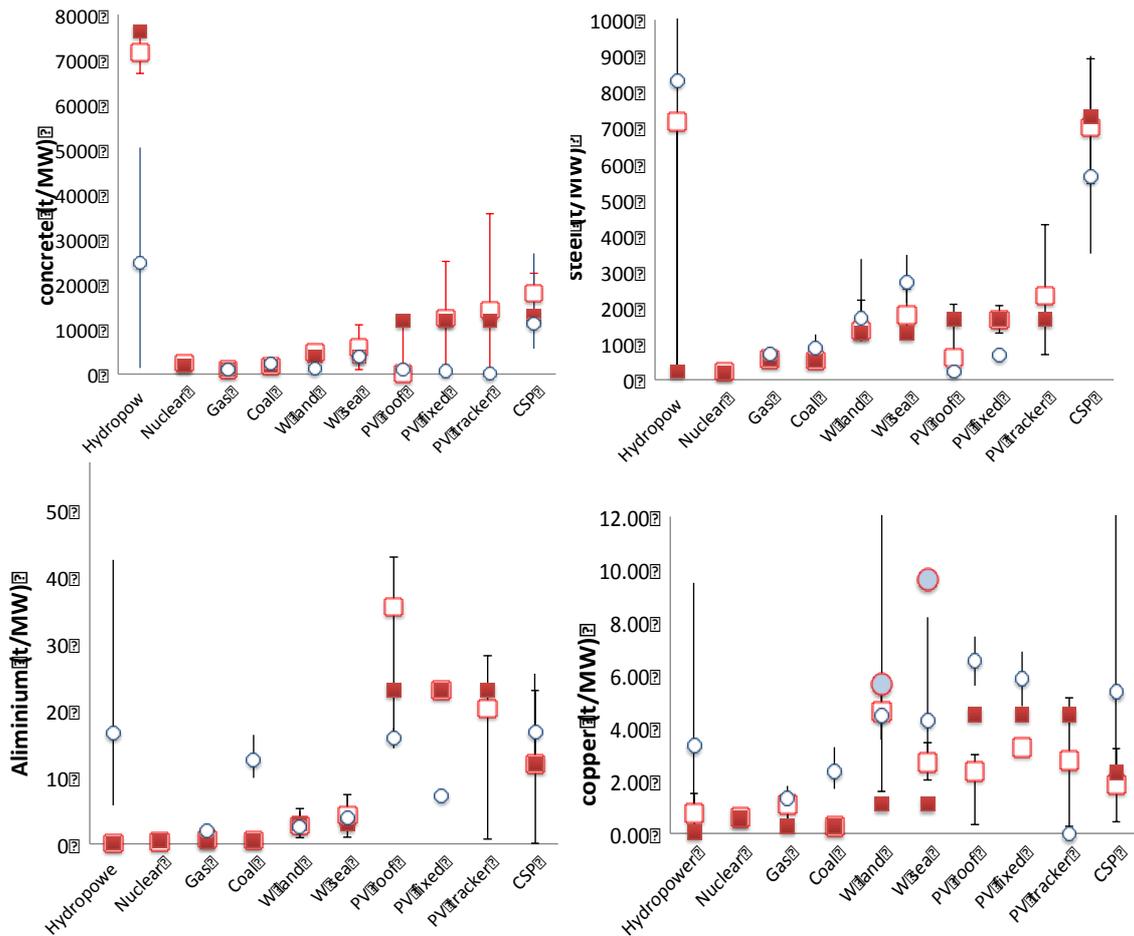


Figure 12: Quantité de 4 matières premières de base utilisées pour la fabrication de différentes infrastructures de production d'électricité. Les « barres d'erreur » indiquent le domaine de valeurs couvert par les données compilées. Les carrés pleins sont les valeurs utilisées par Vidal et al. (2013) (Ref. 42) (pas de distinction des technologies photovoltaïques) qui ont été complétées par les mêmes auteurs en intégrant des sources additionnelles (carrés vides). Les cercles vides sont les moyennes calculées à partir des données utilisées par Hertwich et al. (2014) (Ref. 43) et les cercles grisés sont les quantités de Cu reportées par Falconer (2009) (Ref. 44), qui incluent le Cu utilisé pour la connexion des fermes d'éoliennes.

La figure 12 montre que d'après Ref. 42, pour une même puissance nominale installée, les quantités de béton, acier, cuivre et aluminium pour fabriquer les infrastructures de production d'électricité à partir de sources renouvelables sont globalement supérieures à celles utilisées pour la fabrication d'installations utilisant des combustibles fossiles. Les tendances sont moins claires pour les valeurs utilisées par Hertwich et al. (2014), en particulier concernant le béton et l'acier. L'intensité matière reportée par ces auteurs pour ces matériaux semble faible pour le photovoltaïque en fermes. Il est vrai que des technologies sans fondation et donc utilisant peu de béton se sont développées ces dernières années, mais d'autres technologies impliquant des infrastructures porteuses et un ancrage par fondations sont encore utilisées au niveau mondial. De la même manière, les quantités d'aluminium par unité de puissance pour les centrales à charbon et la production hydroélectrique (égales à celles du photovoltaïque de bâtiment) semblent élevées. Cela mis à part, Les valeurs d'intensité matière compilées par Vidal et al. (2013) et Hertwich et al. (2014) restent assez cohérentes, les premières semblant néanmoins sous-estimer les quantités de

cuire et surestimer celles de béton et de fer. Globalement, les quantités d'acier, cuivre et aluminium et probablement de béton pour les infrastructures de production d'énergie à partir de sources renouvelables sont supérieures à celles utilisées pour les centrales à combustible fossile.

Une comparaison des intensités matière par unité d'énergie produite est plus parlante, car elle prend en compte l'effet du rendement de production de chaque filière électrogène et leur disponibilité dans le temps (Figure 13). Cette comparaison montre que d'après les données de Hertwich et al. (2014), l'intensité d'acier est 2 fois plus importante pour les éoliennes terrestres que pour les centrales à charbon pour une même puissance installée, et 7 fois plus importante pour une même énergie produite (pour un rendement de 0.22 et une durée de vie de 20 ans pour l'éolien, et un rendement de 0.4 et une durée de vie de 30 ans pour le charbon). Pour une même énergie produite, les quantités d'acier peuvent être jusqu'à 50 à 90 fois plus importantes pour le solaire à concentration que pour le nucléaire.

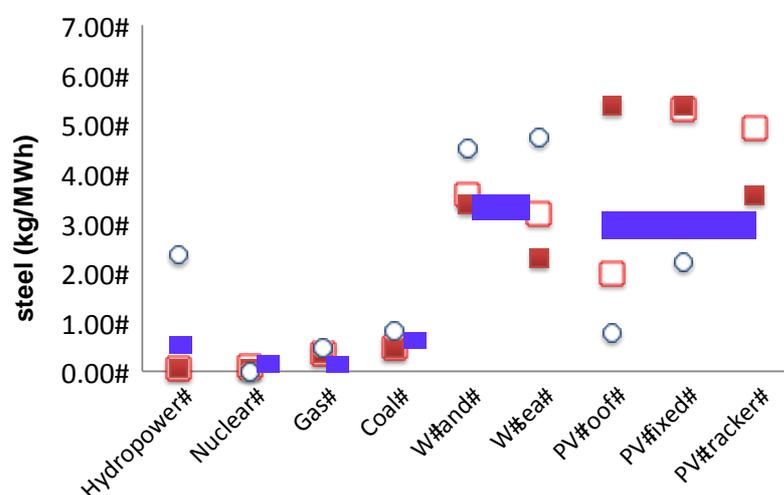


Figure 13 : Quantité d'acier en kg pour produire 1 MWh d'énergie calculée avec les données d'acier/MwW reportées sur la Figure 12. Les rectangles bleus correspondent aux valeurs de la base ECO-INVENT, sans distinction pour le solaire PV et pour l'éolien marin et terrestre.

Pour augmenter le rendement des installations, les technologies en développement utilisent également une grande quantité d'éléments rares (e. g. Ga, In, Se, Te, Dy, Nd, Pr and Tb, voir section précédente). Une augmentation de 10 à 230% de la production mondiale 2010 en ces éléments serait nécessaire entre 2010 et 2030 pour faire face à leur consommation par les seules filières de l'éolien et du solaire (

Ref. 50, Ref. 51), alors que leur disponibilité est limitée et souvent mal connue.

Le parc Français d'énergie renouvelable

La Figure 12 montre l'étendue des valeurs d'intensité matière compilées à partir d'une revue de la littérature et les moyennes. Pour être représentatives du parc installé, les moyennes doivent prendre en compte la part relative des différentes technologies, ce qui n'est pas le cas sur la Figure 12.

Tableau 3: Intensités matières en t/MW calculées par l'ADEME pour un parc représentatif du poids respectif des différentes technologies implémentées en 2020 au niveau français, et comparées aux valeurs utilisées par Vidal et al. (2013) et Hertwich et al., (2014). Pour l'éolien : (t) est pour les éoliennes terrestres, (m) pour les éoliennes marines. Pour le solaire : (r) est pour les panneaux installés sur toits, (t) pour les fermes avec asservissement. Les valeurs reportées par Vidal et al. (2013) comprennent également les technologies de solaire à concentration.

	ADEME (2020), France	Hertwich et al. (2014), monde	Vidal et al. (2013), monde
Eolien			
Béton	309	128(t)- 402(m)	400
Acier	99	173(t)- 269(m)	130
Aluminium	7.5	2.6(t)- 3.8(m)	3
Cuivre	5.5	4.5(t)- 4.3(m)	1.15
Solaire			
Béton	55.2	81	1190
Acier	236	24(r)-69(t)	170
Aluminium	211	15.9(r)- 7.1(t)	35
Cuivre	6.2	6.5(r)-5.9(t)	4.5

En effet, une estimation de cette part relative actuelle est difficile, et elle l'est encore plus pour le futur. Au niveau national, l'ADEME estime pour le parc français à horizon 2020, une puissance éolienne de 19GW d'éoliennes terrestre dont 2.5% à aimants permanents et 6GW d'éoliennes offshore à aimants permanents. Pour le photovoltaïque, l'ADEME estime qu'à horizon 2017-2018, les technologies avec asservissement devraient représenter 3.5% du parc installé, les centrales à couches minces représenteraient 35.75%, et celles à silicium 60.75%. Selon ces hypothèses, les quantités correspondantes de béton, acier, aluminium et de cuivre sont indiquées dans le tableau 3, et comparées avec les valeurs moyennes (Figure 12) de Vidal et al. (2013) et Hertwich et al. (2014).

Pour l'éolien, les valeurs de contenu en béton et acier de l'ADEME sont en bon accord avec celles de Vidal et al. (2013) et les différences peuvent être expliquées par une prise en compte différente du poids relatif des différentes technologies. Les valeurs d'aluminium de Vidal et al. (2013) et Hertwich et al. (2014) au niveau mondial sont inférieures à celles obtenues au niveau Français par l'ADEME. La principale différence porte sur le cuivre, car la

majorité des éoliennes actuellement installées en France et dans le Monde ne sont pas à aimant permanent. Les technologies à aimant permanent, plus chères, sont envisagées prioritairement pour les marchés offshore, qui d'après l'ADEME resteront minoritaires à moyen terme. Comme déjà mentionné plus haut, la quantité moyenne de cuivre par MW pourrait donc être plus importante que celle utilisée par Vidal et al. (2013), en accord avec les valeurs complétées par les mêmes auteurs (carrées vides de la Figure 12).

En revanche, pour le solaire, seules les estimations d'intensité matière de cuivre sont cohérentes. Pour les autres éléments, des différences énormes sont observables (en particulier pour le béton). Cela est en partie dû à la prise en compte de la technologie CSP (forte consommatrice de béton), par Vidal et al. (2013) avec une part relative égale à celle des technologies photovoltaïques, et une part faible des PV en toiture par rapport aux PV en fermes. Cela dit, une revue de détail reste à faire pour comprendre les différences entre les valeurs observées pour l'acier (quantité moyenne de Hertwich et al., 2014 de 3 à 10 fois inférieure à celle estimée par l'ADEME pour le parc Français et 2.5 à 7 fois inférieure à celle utilisée par Vidal et al., 2013), et l'aluminium (quantité estimée par l'ADEME de 13 à 30 fois supérieure aux valeurs moyenne de Hertwich et al., 2014 et 6 fois supérieure à celle de Vidal et al., 2013). Cette comparaison indique clairement les difficultés à obtenir des valeurs représentatives d'intensité matière pour des technologies en forte évolution et assez différentes en fonction de la zone géographique considérée, ainsi que des particularités nationales des mix énergétiques envisagés.

c. Les besoins en fonction des scénarios énergétiques

Tous les scénarios nationaux (Ref. 45 et Ref. 46) (Negatep, Ademe, Ancre, Sortir du Nucléaire, Negawatt...) et internationaux (Ecofys-WWF Ref. 47 AIE, Ref. 48) prévoient une amélioration de notre efficacité énergétique, une transition vers la production d'énergie à partir de sources renouvelables et son utilisation dans des secteurs variés, comme le transport ou le chauffage. Ces évolutions supposent de bâtir une nouvelle infrastructure dans les secteurs résidentiels, du transport, de l'industrie, de la production et du stockage et distribution de l'énergie. Cette infrastructure nécessitera des ressources minérales et métalliques, dont l'approvisionnement pourrait éventuellement devenir un facteur limitant à la réalisation des scénarios. Cela est d'ailleurs mentionné dans le scénario de l'Alliance Ancre : *«le contexte extrêmement tendu de disponibilité des ressources minérales et métalliques, qui pourrait constituer un frein au développement de la transition énergétique, même si elle est technologiquement, économiquement et socialement envisageable».*

Pour illustrer ce point, la Figure 14 montre l'évolution du mix énergétique selon deux scénarios de l'AIE et de Ecofys-WWF et la Figure 15 les quantités mondiales cumulées de béton, acier, Cu, Al et verre qui seront immobilisées dans les infrastructures de production d'énergie électrique solaires et éoliennes pour les réaliser. Ce dernier calcul a été fait en utilisant les valeurs moyennes reportées par Vidal et al. (2013), dont la représentativité est soumise à critique dans le chapitre précédent. Pour le seul secteur de la production d'électricité à partir de sources éoliennes et solaires, la transition

énergétique envisagée selon les scénarios de l'AIE et d'ecofys (WWF) impliquerait d'ici 2050 une consommation en matières premières de base (acier, cuivre, aluminium, ciment, verre) égale à 2 à 8 années de production mondiale 2010 (lignes pointillées sur la Figure 15). Pour les 35 prochaines années, cette consommation supplémentaire pour les seuls secteurs de la production éolienne et solaire d'électricité correspondrait à une augmentation de production en métaux de base entre 0.2 et 2%/an. Ces taux de croissance de la production peuvent apparaître négligeables par rapport à ceux observés depuis le début des années 2000 (de l'ordre de 3 à

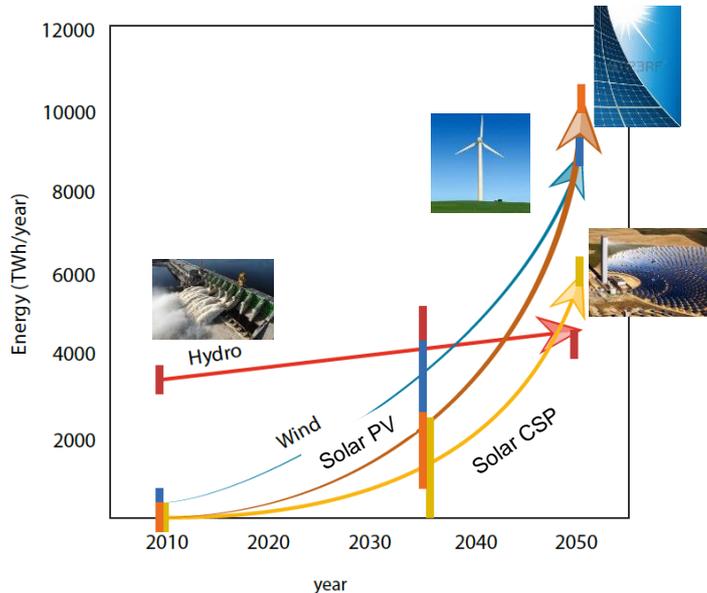


Figure 14: Evolution mondiale de la part d'énergie produite par l'éolien (wind), le solaire à concentration (CSP), le photovoltaïque (PV), et l'hydraulique (Hydro) prévue par les scénarios de Ecofys-WWF (Ref. 47) et l'AIE (Ref. 48)

5 %/an). Les taux de croissance actuels sont particulièrement élevés car les BRIC, et en premier lieu la Chine, sont en pleine croissance.

Nous avons connu la même situation après la deuxième guerre mondiale, au moment de la reconstruction, puis le taux de croissance de la production mondiale de métaux de base s'est stabilisé à environ 1% entre 1975 et 2000, avant de repartir à la hausse. Il apparaît donc que le taux annuel de croissance de la production des matières de base nécessaires à la construction des seules infrastructures de l'éolien et du solaire (0.2 à 2%) serait équivalent au taux de croissance observé pour tous les secteurs industriels confondus pendant les années 1975 à 2000.

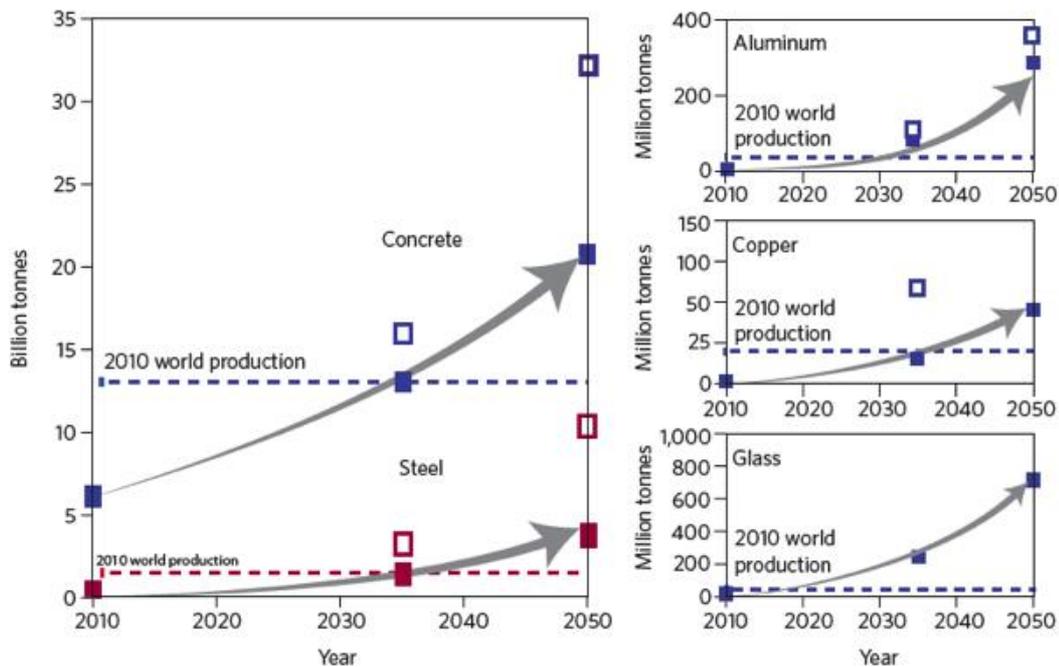


Figure 15 : Quantité cumulée de béton, acier, Cu, Al et verre utilisée dans les infrastructures de production d'énergie solaire (photovoltaïque et CSP), éolienne et hydroélectrique. Les valeurs futures ont été calculées pour réaliser les scénarios énergétiques proposés par Ecofys-WWF et l'AIE. Les symboles ouverts et fermés indiquent les quantités de matériaux calculées avec les valeurs de Vidal et al. (2013) reportées sur la Figure 11, ou les valeurs extrêmes de Pacca et Horvard (2002) (

Ref. 49) pour le photovoltaïque. D'après Ref. 42.

Dans le contexte mondial, la France est un cas particulier, car la production actuelle d'électricité (majoritairement assurée par le nucléaire) est faiblement émettrice de CO₂, et la capacité de production peut être adaptée en fonction de la demande, ce qui limite le besoin de stockage. En accord avec le Grenelle 2, l'objectif des scénarios nationaux est de diviser par quatre ou plus les émissions de CO₂ d'ici 2050 par rapport aux émissions réalisées en 1990. Cela doit être réalisé en partie en limitant l'utilisation des hydrocarbures fossiles, et en améliorant l'efficacité énergétique dans les secteurs du transport, résidentiels et industriels. Les scénarios Sortir du Nucléaire (SN) et Negawatt proposent de proscrire le nucléaire d'ici 2030 (SN) ou 2050 (Negawatt), Negatep propose de maintenir la politique de production nucléaire menée depuis les années 1970, et Ancre envisage le cas d'une réduction de la production nucléaire à 50%. Pour atteindre l'objectif de 23% d'énergies renouvelables dans son mix énergétique en 2020, le Grenelle de l'environnement prévoyait 25 GW de puissance installée en 2020, dont au moins 6 GW offshore, et 5 400 MW pour le photovoltaïque. En utilisant les intensités de matière de Vidal et al. (2013) reportées sur la Figure 12, cela représentait environ 5 Mt d'acier, 20 Mt de béton, 390 kt d'Al, 65 kt de Cu, et 22 kt de terres rares pour une consommation nationale annuelle d'environ 16 Mt d'acier (Ref. 52), 100 Mt de béton (20 Mt de ciment) (Ref. 53) et 1.1 Mt d'Al. La demande en MP associée à l'augmentation de production d'électricité à partir de sources

renouvelables, telle que fixée par le Grenelle de l'environnement pour 2020, reste donc modeste par rapport à notre consommation annuelle nationale (de l'ordre de 20% à répartir sur 10 ans). Le scénario Negawatt anticipe quant à lui 209 TWh d'électricité d'origine éolienne et 90 TWh d'origine photovoltaïque en 2050, ce qui implique de bâtir une infrastructure de production qui devrait immobiliser environ 110 Mt de béton, 25 Mt d'acier, 2.7 Mt d'Al, 400 Kt de Cu, soit un peu plus d'une année de consommation nationale (Figure 16) Les incertitudes de ces estimations sont importantes, car elles impliquent non seulement celles concernant les quantités de matière/MW (Figure 12), mais aussi celles concernant l'évolution de la consommation d'électricité qui varie selon les scénarios de 338 (SN) à 625 TWh/an en 2030. En prenant en compte ces incertitudes, il apparaît que selon les scénarios énergétiques considérés, la quantité de MP immobilisées dans la seule infrastructure de production d'électricité éolienne et solaire pourrait représenter une année de consommation nationale en ces MP d'ici 2025 à 2040.

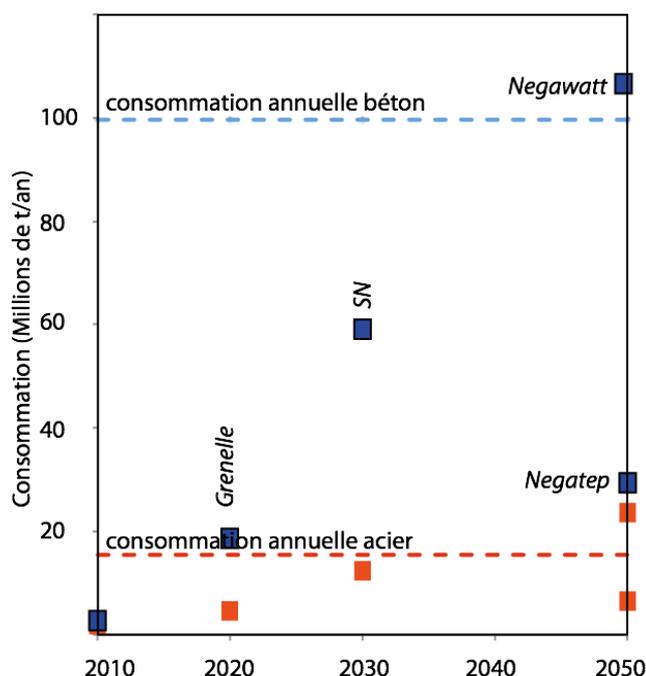


Figure 16: Quantité cumulée de béton (symboles bleus) et d'acier (symboles rouges) utilisée dans les infrastructures de production d'énergie solaire (photovoltaïque et CSP) et éolienne pour suivre les scénarios Negawatt, Negatep, Grenelle et « Sortir du Nucléaire » (SN) à horizons 2020, 2030 et 2050. Les lignes pointillées montrent les consommations nationales en béton et acier en 2010.

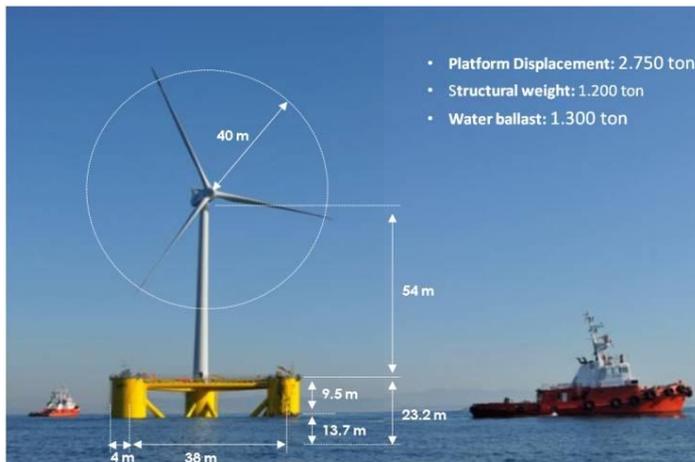
Il faut souligner que la seule utilisation de métaux issus du recyclage ne permettra pas de répondre aux besoins d'équipement, car la durée de vie des installations de captage et de distribution est équivalente ou supérieure à la période de transition énergétique (2050). Une augmentation de la production primaire sera donc nécessaire, qui viendra en addition de la demande des autres secteurs industriels. A l'heure actuelle, l'UE produit environ 3% de la production mondiale de métaux et elle est 100% dépendante de l'importation de la plupart des métaux impliqués dans les énergies renouvelables (Ref. 54). Or les enjeux géopolitiques, économiques,

sociétaux et environnementaux liés à l'accès aux ressources minérales sont comparables à ceux de l'accès aux combustibles fossiles, avec la contrainte supplémentaire que l'extraction et la transformation des minéraux demande une quantité considérable d'énergie, qui proviendra au moins initialement de combustibles fossiles. Cela signifie que la transition énergétique participera, au moins dans les premiers temps, à une augmentation de la consommation d'énergie fossile et qu'elle a un coût environnemental et financier significatif. Une estimation la plus précise possible de ces coûts et des besoins en MP et énergie est vitale pour éviter qu'ils ne deviennent un frein au développement de la transition énergétique dans le contexte extrêmement tendu et compétitif de disponibilité des ressources minérales actuel.

Dans ce contexte, il est important d'évaluer de manière précise les besoins en matières premières associés à la mise en place des différentes infrastructures de production d'énergie selon les différents scénarios énergétiques envisagés, et d'estimer les impacts environnementaux associés à la production de ces MP. Cet exercice devrait permettre d'anticiper les besoins à échelle mondiale mais également de définir les technologies les moins gourmandes et impactantes avant leur déploiement à grande échelle. Le rendement, le coût financier ou le coût du KWh pour le consommateur sont bien entendu des critères importants d'amélioration technologique, mais l'optimum « technico-économique » doit prendre en compte d'autres facteurs, dont l'approvisionnement en matière premières, le recyclage des installations et leur impact environnemental. Une analyse doit être faite pour toutes les MP et tous les domaines touchés par la transition énergétique, et doit être étendue aux besoins liés au stockage et à la distribution d'énergie qui n'ont pas été considérés ici.

d. Les besoins spécifiques de recherche

- Comme cela est discuté plus haut, *l'estimation des besoins futurs en matières premières du secteur de l'énergie* reste difficile à réaliser, et elle nécessite un travail de recherche spécifique, car i) la diversité des éléments utilisés est importante et leurs applications sont variées, ii) les quantités de matière embarquées dans les infrastructures de production d'énergie sont mal connues et les technologies sont en forte évolution, et iii) les scénarios existants d'évolution des modes de production, de stockage et distribution d'énergie, de son utilisation, mais également des évolutions permettant d'améliorer l'efficacité énergétique sont très variables. A titre d'exemple, les éoliennes de dernière génération d'une puissance de 6 MW mesurent 170 m de haut et contiennent environ 1500 tonnes d'acier (mât + nacelle + fondations, passerelles, etc.) quand elles sont ancrées au sol [18]. Ces quantités correspondent à 250 tonnes d'acier/MW de puissance, soit une valeur 70 % supérieure à la valeur moyenne indiquée sur la Figure 12, qui est basée sur une analyse impliquant des technologies développées depuis les années 1990. De nouvelles technologies sont actuellement développées pour fixer les éoliennes marines sur des plateformes flottantes du type Windfloat et ainsi permettre leur installation dans des zones de plus grande profondeur et donc éloignées des côtes, où les conditions de vent sont meilleures.



A FEW WINDFLOAT SPECS	
Turbine sizes	3.6 to 10 MW
Rotor diameters	120 to 150m
Hub heights	80 to 90m
Nacelle weights	250 to 400 tons
Tower weights	200 to 350 tons
Hull weights	1,200 to 1,800 tons
Total displacement (with ballast)	< 6000 ton
Hull draft	< 20m
Operational water depth	≥ 50m
Conventional mooring components	(4 to 6 lines)

Figure 17: Plateforme flottante pour éolienne marine et spécificités techniques
[\(http://www.windpowerengineering.com/construction/floating-turbine-platform-ready-to-tap-the-2-tw-offshore-potential/](http://www.windpowerengineering.com/construction/floating-turbine-platform-ready-to-tap-the-2-tw-offshore-potential/) ; <http://www.antoniovidigal.com/drupal/cd/WindFloat-Quase-há-um-ano-no-Mar>)

Ces plateformes contiennent de 1200 à 1800 tonnes d'acier (Figure 17), ce qui porte l'intensité en acier de l'infrastructure de production à 350 à 500 tonnes/MW, soit une valeur de 130 à 380% supérieure à celle utilisée pour construire les Figure 15 et Figure 16. A cela s'ajoute les besoins pour le stockage d'électricité (de l'ordre de 200 t/MW d'acier pour des systèmes à air comprimé ou à hydrogène), et pour la distribution.

- Un travail important reste à faire pour *bâtir un inventaire du cycle de vie de la production de MP* (voies primaire et secondaire), avec une paramétrisation dans une optique de prospective dynamique. Cette estimation concerne les besoins associés à la production d'EnR (éolien, solaire, marin s.l., biomasse, hydrogène, géothermie), mais également son stockage (accumulateurs électrochimiques, air comprimé, inertie, thermochimie, gravitaire, hydrogène, chaleur sensible et latente, etc...), et sa distribution (réseau) en impliquant des spécialistes des différentes filières pour intégrer les développements scientifiques et technologiques actuels qui pourraient être implémentés au niveau industriel dans le futur.
- *La compilation des données concernant l'intensité énergétique et l'impact environnemental associés à la production primaire et secondaire des MP nécessaires à la transition énergétique doit couvrir, en particulier mais pas uniquement, les métaux « high-tech »* pour lesquels notre connaissance historique des gisements et des processus de concentration naturels, ainsi que des procédés industriels de séparation reste très limitée. L'estimation de l'intensité énergétique et de l'impact environnemental doit aussi intégrer les progrès récents des capacités de recyclage (performances évolutives du recyclage, quantification des stocks anthropogéniques exploitables, taux de recyclage par élément ou par produit), mais également la production primaire (inventaire des développements technologiques visant à diminuer les impacts environnementaux et l'intensité énergétique de l'industrie minière - e.g. projets green mining de TEKES (Ref. 55), et du raffinage des métaux (e.g. Ref. 56). Les développements scientifiques et technologiques concernant l'extraction et la production de métaux

avec des approches biomimétiques (Ref. 57) et géomimétiques doivent également être considérés.

- *L'analyse doit couvrir tous les types de matière première* : Elle ne doit pas se limiter aux « métaux rares », car les volumes de métaux de base utilisés pour le captage, le stockage et la distribution d'énergie décarbonée sont énormes : 800 éoliennes de 6MW, soit 1.2 millions de tonnes d'acier sont nécessaires pour produire la même énergie qu'une centrale nucléaire de 1300MW contenant 3 à 8 fois moins d'acier et ayant une durée de vie 4 fois supérieure. L'acier est le métal le plus utilisé au monde, mais le coût énergétique de sa production varie fortement en fonction des modes de production, des pays producteurs, des qualités (composition) et de la proportion d'acier recyclé. A titre d'exemple, Fujii et al. (2005) (Ref. 58) reportent des valeurs de 20MJ/kg pour l'acier « carbon steel » primaire produit en hauts fourneaux et 10 MJ/kg pour le même acier recyclé produit par arc électrique, 72.1 et 40 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. On peut noter que ces valeurs, en particulier celles concernant l'acier inoxydable, sont inférieures à celles reportées dans le Tableau 2 (304 MJ/kg pour l'acier inoxydable). Dans ces conditions, non seulement la connaissance fine de la composition des aciers utilisés dans les infrastructures de production et distribution d'énergie est nécessaire, mais également la définition des valeurs énergétiques associées à leur production en fonction de leur provenance, du taux de recyclage et du mode de production. Ce qui est vrai pour le métal le plus produit au monde est évidemment vrai pour les autres métaux, en particulier ceux produits en faible quantité et dans des pays lointains...
- *Vision dynamique* : Les études d'impacts ne doivent pas se restreindre à l'analyse le cycle de vie de matériaux ou des produits manufacturés, mais établir une projection dynamique à long terme, car les matières premières considérées comme étant abondantes et bon marché aujourd'hui pourraient devenir critiques demain si elles sont utilisées en masse dans des technologies implémentées à grande échelle. A titre d'exemple, on peut citer le magnésium, qui est envisagé comme un composant prometteur du stockage d'H₂ sous forme d'hydrures MgH₂. En France, la société McPhy Energy est leader dans le développement de solutions technologiques visant à stocker l'hydrogène sous forme d'hydrures MgH₂. Une application envisagée, bien que nécessitant des développements technologiques importants, est le stockage mobile d'hydrogène pour alimenter un véhicule équipé d'une pile à combustible. Un tel réservoir permettant une autonomie de 500 km contiendrait 70 kg de Mg. Il faudrait environ 4 millions de tonnes de Mg pour équiper 10% du parc automobile actuel (1 milliard de véhicules comptabilisés par Wardsauto en 2010 (Ref. 59)), soit l'équivalent de 5

années de production actuelle⁵. D'autres utilisations du Mg sont également prévues dans le secteur automobile afin de réduire le poids des véhicules et ainsi diminuer leur consommation en carburant. En 2009, la consommation était de 5 à 20 kg par véhicule, mais le concept car de Volvo utilise environ 50 kg de magnésium dans les roues, le châssis et les moteurs. A l'heure actuelle, 70% du Mg est produit par la Chine par décarbonatation de la dolomie. Le processus utilisé consomme 10 000 kWh/t, et produit 42 kg eq-CO₂/kg Mg. D'autres voies de production sont possibles, comme l'électrolyse, en sel fondu de MgCl₂ extrait de l'eau de mer ou de saumures (18500 kWh/t), mais les capacités totales de production actuelles restent de l'ordre de 4 millions de tonnes/an, dont 1 million pour les utilisations actuelles. Selon Clark & Marron, la demande pour le métal devrait croître en moyenne de 7,9% par an jusqu'en 2019 (Ref. 60). Le Mg, déjà listé en 2014 comme élément « critique » par l'union Européenne⁶, pourrait voir son niveau de criticité en forte hausse avec des risques d'approvisionnement si la technologie de stockage d'H₂ dans les hydrures de Mg et son utilisation en alliage était généralisée. La même conclusion est à tirer pour le lithium, qui est un élément important des batteries. Le fabricant californien des véhicules électriques de luxe Tesla va mettre sur le marché des batteries dont le prix de vente de l'ordre de 3 500 dollars pour des installations de 10 kWh et de 3 000 dollars pour 7 kWh les rendent accessibles pour des utilisations domestiques. C'est d'ailleurs le but affiché du fondateur la société, Elon Musk, qui annonce vouloir changer « la totalité de l'infrastructure énergétique dans le monde ». Cela suppose évidemment une production correspondante aux besoins d'hydroxyde de lithium de qualité, ce qui d'après le magazine Forbes risque pourrait poser problème (<http://www.forbes.com/sites/greatspeculations/2015/03/16/teslas-lithium-supply-constraints-might-hamper-its-growth/>).

- *Analyse des différents secteurs énergétiques* : en particulier les besoins des secteurs du stockage d'énergie (très important pour « lisser » la production variable des éoliennes et des technologies du solaire) et de la distribution d'énergie, du transport (véhicules hybrides et électriques), qui sont également de gros consommateurs de métaux de base et rares. A notre connaissance, aucune estimation mondiale complète des besoins à 15-40 ans n'a été publiée à ce jour, les prévisions disponibles restant largement focalisées sur métaux rares à un horizon de 15 ans (Ref. 51).

Il est important d'analyser les futurs besoins associés à l'utilisation de nouveaux matériaux dans le secteur du stockage électrique, en particulier pour les accumulateurs qui seront utilisés pour les véhicules,

⁵ Les chiffres estimés ici et discutés plus bas sont hypothétiques, et ils ne remettent pas en question l'intérêt du stockage d'hydrogène sous forme d'hydrure, qui présente de nombreux avantages. Le stockage d'hydrogène sous forme d'hydrures n'est pas envisageable à l'heure actuelle pour des applications mobiles, mais un résultat similaire est obtenu pour un stockage non mobile à destination du transport routier, éventuelle en station service.

⁶ http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-14-377_en.htm

mais aussi des stockages de masse destinés à alimenter les réseaux électriques, du stockage thermique. Pour exemple, une centrale électro solaire de 50 mégawatts nécessite actuellement 28 000 tonnes de sels de nitrate pour stocker la chaleur. Pour atteindre les objectifs affichés par l'AIE pour 2050, soit 10% de la production mondiale d'électricité produite par le solaire à concentration (Ref. 61), il faudrait utiliser chaque année environ dix fois la production mondiale de sels de nitrate.

- *Analyse des évolutions sociétales* : Le domaine technologique est porteur d'incertitudes : les batteries permettront-elles le développement de la mobilité ? Les procédés de synthèse de biocarburants seront-ils abordables ? Le solaire photovoltaïque deviendra-t-il une source majeure d'électricité ? Le domaine sociétal est lui aussi porteur d'incertitudes majeures : Les « citoyens électeurs » sont-ils prêts à accepter un effort financier pour réduire leurs consommations, à modifier leurs comportements et à accepter de nouveaux modes de production d'énergie ? Les évolutions technologiques et sociétales vont-elles changer notre rapport au territoire (étalement urbain, éloignement des lieux d'activité et de résidence, allongement des circuits de consommation) ?

IV. La chaîne de valeur des matières premières et ses aléas

P. Christmann (BRGM)

a. Cartographie et analyse de la chaîne de la valeur, des outils essentiels pour déterminer des enjeux de recherche

La production d'équipements pour la génération, le stockage et le transport de l'énergie dépend du bon fonctionnement de chaînes de la valeur, dont les différentes étapes clef schématisées par la Figure 18 sont complexes et souvent mal documentées.

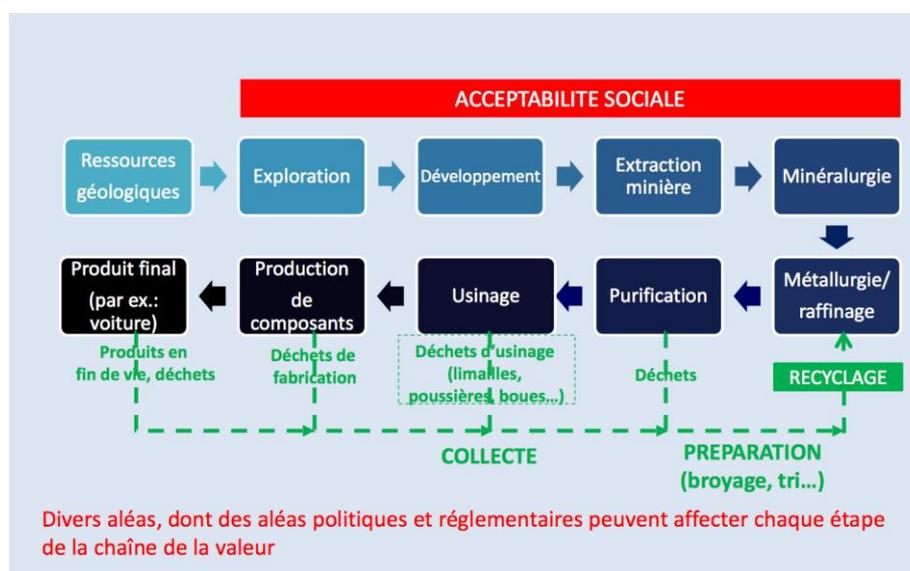


Figure 18: Représentation simplifiée de la chaîne de la valeur nécessaire à la production d'un bien industriel.

La chaîne de valeur varie d'un métal à l'autre, les étapes telles que la minéralurgie et la métallurgie pouvant être absentes (cas par exemple du carbonate de lithium utilisé pour les batteries au lithium qui peut être produit à partir des saumures de lacs salés endoréiques tels que les « salars » du d'Argentine, de Bolivie ou du Chili sans nécessiter ces étapes). La connaissance des principales chaînes de valeur spécifiques à chaque élément, et l'identification des enjeux qui peuvent être associés à chaque étape de la production de composants largement utilisés dans le domaine industriel tels que, par exemple, la production d'aimants permanents à base de terre rares Nd-Fe-B, est très utile à l'identification des besoins en recherche au service de la sécurisation des approvisionnements et de la compétitivité industrielle.

b. Les métaux porteurs et sous-produits primaires

De nombreux métaux importants pour des applications dans le domaine de

l'énergie n'existent qu'à l'état de sous-produits de matières premières minérales principales (Ref. 62). Seules ces dernières se caractérisent par des concentrations suffisamment importantes pour former des gisements économiquement exploitables. Ainsi, la plupart des métaux semi-conducteurs n'existent qu'à l'état de sous-produits (Figure 19) dont la récupération ne se fait, éventuellement, que lors du traitement du porteur, généralement au stade de la métallurgie, et en fonction de la stratégie industrielle spécifique du métallurgiste. Ainsi la bauxite (minerai d'aluminium) est-elle la principale source utilisée industriellement de gallium, le zinc la principale source d'indium et de germanium ou le cuivre la principale source de molybdène, de rhénium, de sélénium, de tellure. Il est impossible, en l'état actuel des statistiques minières et métallurgiques mondiales de connaître les flux annuels de ces sous-produits présents dans les minéraux porteurs extraits et la part qui en est effectivement récupérée au stade de la métallurgie. Cette part, d'après les données disponibles semble être de l'ordre de quelques dizaines de % seulement

Les éléments suivants sont aujourd'hui exclusivement des sous-produits : As, Bi, Cd, Co (il n'existe qu'une mine, au Maroc, produisant du cobalt en tant que minerai principal), Ga, Ge, Hf, In, Ir, Os, Re, Rh, Ru, Sc, Se, Te, Tl, V. Le cas des terres rares est particulier, l'ensemble des 15 lanthanides et l'yttrium étant systématiquement associés, bien qu'en proportions variables au sein des mêmes gisements.

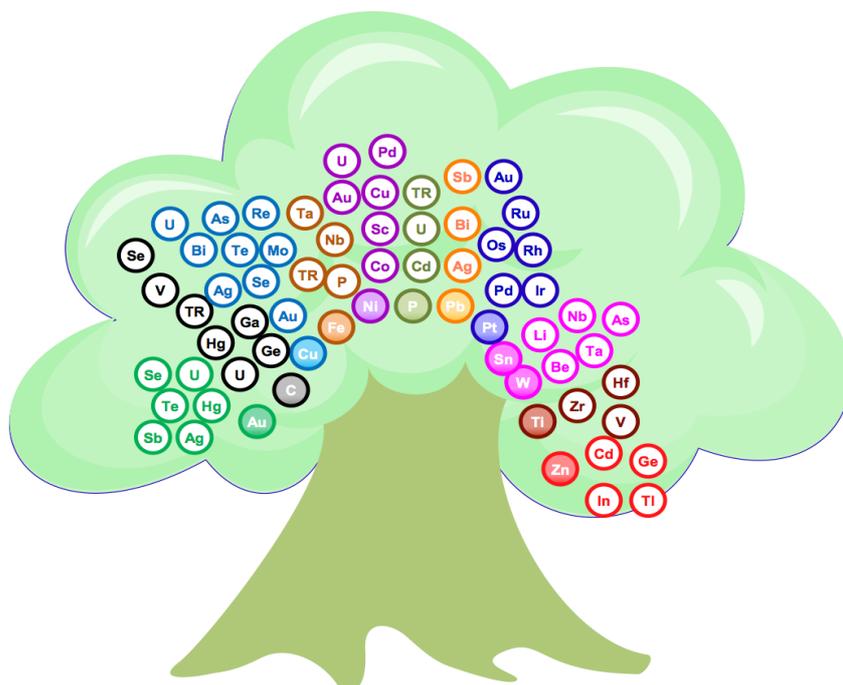


Figure 19: Matières premières minérales porteuses (cercles à fond coloré) et sous-produits (cercles à fond blanc) associés. TR = terres rares, soit l'ensemble des lanthanides. Le Sc est considéré de manière séparée. Sn et W ont des sous-produits communs. Cette figure ne prend pas en compte les exceptions existantes, e.g. certains gisements de magnétite Australiens ou Brésiliens, où le vanadium est le minéral "payeur". Il faut noter que Li, Be, Cr, Mn, Nb, Mo, Ag, Sb, Ta, sont aussi exploités de façon non négligeable dans des mines dédiées. Source: P. Christmann, BRGM.

Si le prix d'un métal sous-produit grimpe, cela ne signifie pas que l'on puisse augmenter l'activité minière pour augmenter sa production, car cela impliquerait d'augmenter la production du minéral principal, dont la demande peut rester stable. Il en découle que l'augmentation de la demande pour un élément particulier ne peut être satisfaite directement par une augmentation de sa production primaire.

c. Aléas et freins affectant les chaînes de valeur

D'un point de vue français, ou européen, de nombreux aléas peuvent plus ou moins gravement affecter les filières industrielles du secteur des ressources :

1 Aléas politiques et institutionnels

- Absence ou changement de politique de l'État
- Pouvoir discrétionnaire de l'État en matière d'attribution des permis d'exploration ou d'exploitation
- Manque de cohérence des réglementations (droit environnemental, fiscal, minier, du travail ...) ayant un impact sur l'industrie minière
- Faiblesses du cadre institutionnel, manque de compétences pour administrer de façon efficiente le cadre réglementaire applicable à l'industrie minière, manque de connaissance de la nature et des spécificités de l'industrie minière
- Manque de capacité de l'État à négocier de manière équitable avec l'industrie minière
- 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
- Mauvaise infrastructure publique de données et de connaissances géoscientifiques, difficulté d'accès à ces données et connaissances

2 Aléas liés aux infrastructures

- Alimentation déficiente en eau et/ou en électricité et/ou en autres intrants
- Déficience du réseau d'infrastructures de transport
-

3 Aléas économiques

- Volatilité des cours des matières premières
- Baisse des teneurs
- Raréfaction des compétences nécessaires au fonctionnement de l'industrie minière
- Augmentation du coût de l'énergie et des équipements
- Insuffisance des investissements en exploration minière
- Rendement insuffisant des investissements
- Baisse de la demande (mutations technologiques, évolution réglementaire...)
- Mauvaise gestion technique ou économique par les opérateurs industriels
- Barrières tarifaires et non-tarifaires affectant le marché des matières premières
- Utilisation de positions dominantes sur le marché en tant qu'instrument géopolitique

- Conditions d'accès et coût des capitaux nécessaires au projet industriel
- Coût des garanties exigées par l'État, notamment en vue de la phase « après-mine », coût des assurances

4 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)

5 Aléas géologiques (séismes, tsunamis, volcanisme, glissements de terrain, subsidence)

6 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)
-

7 Aléas sociétaux

- Différences culturelles importantes, 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 (cycle des projets; ressources et réserves; productions ...)
- Grèves, guerres civiles

La perception de ces aléas et la grande fragilité économique et sociale qui en résulte a motivé d'importants travaux d'analyse et de définition de stratégies impliquant généralement la définition d'agendas de recherche, en France, au niveau de l'UE et sur le plan international (Exemples de travaux récents : voir la section « Exemples de travaux récents » de la bibliographie) avec, notamment les travaux du Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne (Institut pour l'Energie de Petten, Hollande), du Département de l'Energie des Etats Unis.

Les travaux portant sur les aléas affectant la chaîne de valeur et sont d'autant plus importants que la France est dépendante d'importations provenant de l'extérieur de ses frontières, et dans beaucoup de cas de l'extérieur et aux frontières de l'UE. Ces importations sont vitales afin qu'elle dispose sur son territoire d'une métallurgie de pointe notamment dans les domaines de l'acier (incluant les aciers spéciaux et les superalliages), de l'aluminium, du chrome, de l'indium ou du tungstène et d'un tissu industriel diversifié.

Si la rupture d'approvisionnement en une matière première minière déterminée ne s'est jamais matérialisée au XXème siècle, d'importantes tensions se sont manifestées à plusieurs reprises. Il faut souligner que le

paradigme économique qui a prévalu jusqu'ici pour garantir les approvisionnements de la France et de l'Europe a été l'existence d'activités minières dans des pays généralement situés en dehors de l'UE 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 ou d'autres Etats membres de l'UE. Ce paradigme qui a très bien fonctionné au cours du XXème siècle est obsolète aujourd'hui, à cause :

- du développement très rapide de la Chine en tant qu'acteur majeur de l'industrie minière 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 (Tableau 4: Part de la Chine dans la consommation mondiale de métaux, en 2012 - Source des données : The Beijing Axis) afin d'assurer la production de biens industriels à forte valeur ajoutée sur son territoire (notamment dans le domaine de l'énergie ; par exemple production de cellules photovoltaïques ou d'éoliennes à entraînement directe et génératrices synchrones aux aimants permanents (Nd-Fe-B +/- Dy). La Figure 20 montre la part de la production minière et métallurgique 2011 de la Chine pour les 28 matières premières minérales dont elle a été, cette année-là, le premier producteur mondial. Cette production n'est pas destinée à répondre aux besoins des industries aval des pays tiers mais à alimenter l'industrie aval établie en Chine. La consommation chinoise de matières premières (Tableau 4: Part de la Chine dans la consommation mondiale de métaux, en 2012 - Source des données : The Beijing Axis) est souvent supérieure à sa propre capacité de production.

Tableau 4: Part de la Chine dans la consommation mondiale de métaux, en 2012 - Source des données : The Beijing Axis

Acier	45%
Aluminium primaire	44%
Chrome (minerai)	38%
Cuivre raffiné	41%
Nickel raffiné	41%
Zinc raffiné	46%

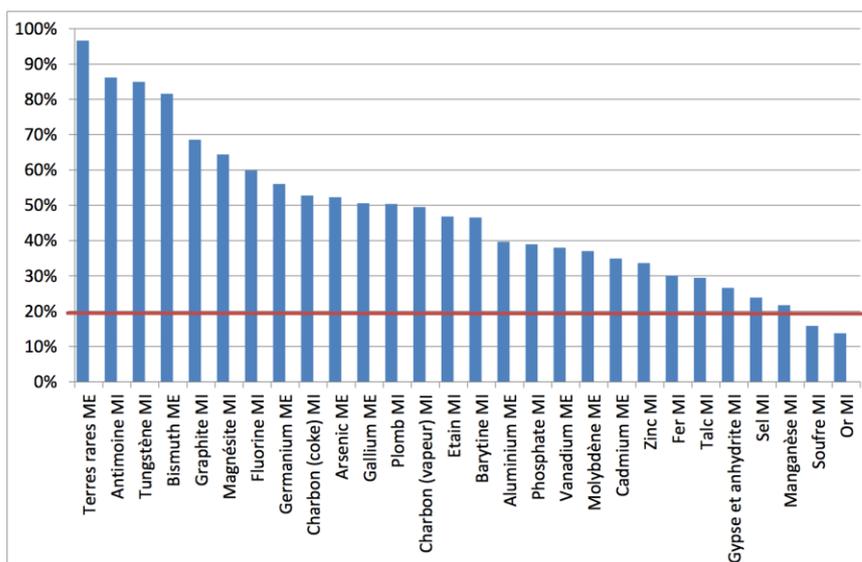


Figure 20: Part relative de la Chine dans la production minière ("MI" après le nom de la matière première) ou métallurgique ("ME") mondiale 2011 – La Chine est le premier producteur mondial de ces 28 matières premières. La barre rouge représente la part de la population chinoise dans la population mondiale – Source des données de production : World Mining Data, édition 2013 (Ref. 63).

- de la volonté d'un nombre croissant de pays producteurs importants de ne plus exporter de matières premières minérales brutes, à faible valeur ajoutée, afin de développer des avalés industriels générateurs de valeur ajoutée. Ceci se traduit par un nombre croissant de barrières tarifaires et non-tarifaires restreignant le libre commerce international des matières premières minérales. L'OCDE recense actuellement plus de 9000 mesures individuelles prises par 69 pays dans sa base de données sur les restrictions aux exportations des matières premières minérales (Ref. 64)
- de problèmes spécifiques à l'industrie minérale tels que 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 ;
- du manque de découverte de gisements de haute qualité. Les grands gisements de minerais très concentrés, affleurant, et situés dans les pays de l'OCDE (ce sont les pays les plus importants pour l'exploitation minière responsable : l'Australie, le Canada, le Chili, le Japon, le Mexique, la Turquie, l'UE en font partie) ont été découverts. Suite à l'épuisement progressif des zones enrichies, proches de la surface, les teneurs exploitées sont historiquement orientées à la baisse, comme le montre l'exemple du cuivre (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), et certains déchets des mines d'autrefois sont maintenant autant concentrés en métaux que les grands gisements actuellement en exploitation. Il existe cependant encore un important potentiel de découverte de gisements riches et affleurant dans des pays où l'environnement n'a pas jusqu'ici été favorable aux investissements dans l'exploration minière moderne (Divers pays africains, Asie Centrale, Chine pro-parte, Russie mais aussi divers pays de l'UE dont le patrimoine minéral n'est que partiellement connu, tel la France dont l'Inventaire Minier National s'est arrêté en 1992.

- de l'augmentation du coût énergétique d'extraction, de broyage et des processus de séparation et de raffinage des métaux, qui est inversement proportionnel à la concentrations de gisements exploités (et donc en augmentation).

V. Les capacités de recyclage et le potentiel de substitution

E. Autret (Ademe) et O. Vidal (CNRS)

a. Le problème entropique des stocks anthropiques

Il y a de vastes «stocks cachés»⁷ de matières premières dans les pays industrialisés, en particulier dans les grandes villes. On estime que Sydney contient par exemple des ressources de cuivre de 600 kg par habitant (Ref. 72). 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 (Ref. 62), ainsi que d'autres matières premières comme par exemple des terres rares. Pour l'année 2007, les stocks de TR dans les produits manufacturés ont été estimés à 448 000 t, dont 144000 t de cérium et 137000 t de néodyme (Ref. 65). 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).

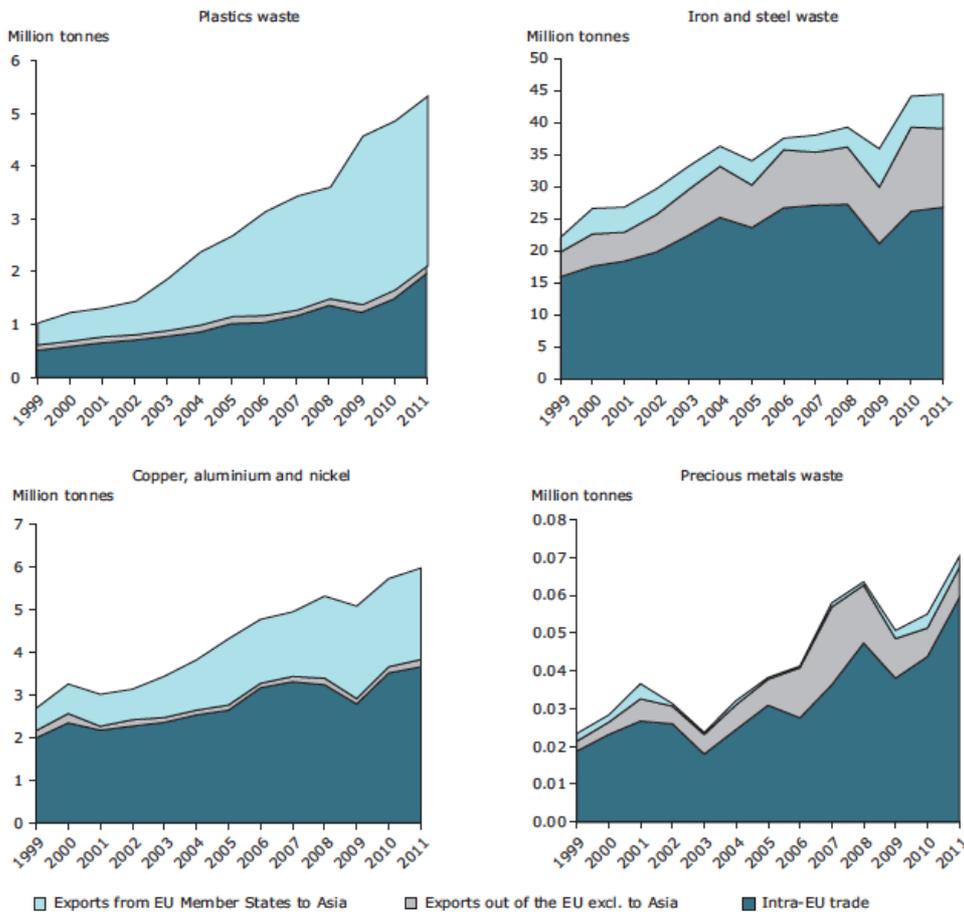
Les stocks de matières premières d'origine anthropique sont cependant dispersés (forte entropie) et n'ont qu'un potentiel limité d'exploitation. A l'heure actuelle, des taux élevés de collecte et de recyclage (> 50%) ne sont atteints que pour certains métaux de base tels que le fer, l'aluminium, le cuivre ou les alliages de métaux manganèse, le niobium ou le molybdène, et les métaux précieux. Les chiffres sont toutefois très variables selon les régions du monde : l'International Copper Study Group (Ref. 66) annonce des taux de recyclage de l'ordre de 40% pour le cuivre en Europe en 2013, alors que les données de l'USGS indiquent un taux inférieur à 10% au niveau mondial jusqu'en 2009.

Pour les métaux spéciaux comme les TR, l'indium, le tellure ou le tantale, les taux de recyclage au niveau mondial restent faibles et se situent globalement au-dessous de 1% (Ref. 72). 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 potentiel d'application, il n'en est pas de même pour les alliages, dont les propriétés sont dégradés au cours du recyclage. C'est le cas des aciers spéciaux qui sont recyclés pour

⁷ Ces stocks incluent des biens en usage qui ne sont pas disponibles immédiatement,

produire des aciers de faible qualité, ou du béton et des composites des pales d'éoliennes par exemple.

Enfin, il faut souligner que le degré de recyclage n'est pas seulement limité par sa faisabilité technique (cas des éléments dilués), mais également par son coût. Tant que le recyclage sera plus coûteux que la production primaire, il restera à un niveau faible. La régulation Européenne restreint la possibilité d'enfouissement des déchets et impose dans conditions de recyclage respectueuses de l'environnement (donc coûteuses car nécessitant un investissement fort). Une conséquence de ces réglementations 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 3 (Figure 21). 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 états unis qui n'ont pas signé la convention de Bâle, où l'on estime que 50 à 80 % des déchets collectés ne sont pas recyclés sur place, mais exportés vers la Chine. On estime ainsi que l'Asie importe environ 4 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. Hormis les possibles conséquences environnementales et sanitaires d'un recyclage non contrôlé, l'exportation massive de nos métaux vers l'Asie, et en particulier vers la Chine, entraîne d'autres effets pervers : 1) elle évite d'investir massivement dans le recyclage et de bâtir l'infrastructure qui permettrait de valoriser nos déchets « chez nous » dans le futur, 2) nous achetons le métal primaire, mais également le métal recyclé, nous payons donc plusieurs fois le même métal après son extraction primaire ! La Chine, qui contrôle une forte partie de la production primaire des métaux (production domestique ou participation à des projets miniers hors de son territoire), risque de contrôler également, et dans un futur proche, la production secondaire.



Source: Compiled by ETC/SCP based on Eurostat, 2012b.

Figure 21 : Exportations de différentes matières premières sous forme de déchets depuis l'Union Européenne. Source : Movements of waste across the EU's internal and external borders, EEA report n° 7/2012

Il existe d'autres exemples d'absence de recyclage de produits en fin de vie et perte de matière première C'est le cas de certains composants des infrastructures de production d'énergie renouvelable : Falconer (2009) (Ref. 44) estime par exemple que 60 à 80% du cuivre contenu dans les câbles sous marins reliant les fermes d'éoliennes marines au continent au Royaume Uni ne sera pas recyclé, pour des raisons technologiques et surtout économiques (au prix actuel du cuivre).

b. Gisements potentiels français et opportunités de recherche sur les technologies de recyclage des matières premières minérales

Avec 1,3 milliard de piles et accumulateurs (P&A) mis sur le marché français en 2012, auxquels s'ajoutent 0,6 milliard d'équipements électriques et électroniques (EEE) (Ref. 44, Ref. 67), la France dispose d'une mine urbaine de matières premières minérales encore sous-exploitée par les filières de recyclage. Les batteries Lithium-ion (Li-ion) par exemple, utilisées dans les

véhicules électriques et de nombreux appareils électroniques grand public, contiennent environ 10 % de cobalt et 2 à 3% de lithium (soit moins de 1g dans un téléphone, environ 10g dans un ordinateur, 3.3 kg dans une voiture électrique). Les tonnages d'accumulateurs Li-ion mis sur le marché en 2012 représentent un gisement potentiel de 792 tonnes de cobalt et 158 tonnes de lithium. Quant aux batteries Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH), utilisées dans des appareils sans fil de la vie courante et dans les véhicules hybrides, elles contiennent, selon les technologies, environ 24 % de nickel, et de faibles quantités de cobalt (2 à 3 %) et de terres rares (en moyenne 4 %, en majorité néodyme, praséodyme, lantane, cérium). Les tonnages d'accumulateurs Ni-MH mis sur le marché en 2012 représentent un gisement potentiel de 73 tonnes de cobalt, 697 t de nickel et 116 t de terres rares.

Cette offre potentielle, lorsque les produits arrivant en fin de vie sont collectés puis traités pour en extraire les matières, est une opportunité d'utilisation efficace des ressources pour les filières de stockage et production d'énergie (piles et accumulateurs, énergies renouvelables, etc) et la fabrication de biens à haute efficacité énergétique tels que les lampes fluocompactes ou diodes électroluminescentes (LED)... à condition que le recyclage soit économiquement plus intéressant que la production primaire.

Dans son rapport annuel de la filière P&A (Ref. 44), l'ADEME comptabilise 272 335 tonnes de déchets de piles et accumulateurs usagés traités en France en 2012 par 14 opérateurs de traitement répartis sur 17 sites de traitement. En cohérence avec les natures de piles et accumulateurs recyclés, les produits récupérés à l'issue des procédés de traitement sont principalement du plomb et ses dérivés (75 %), des papiers/plastiques divers (6 %) et des électrolytes et solvants (6 %). Les autres fractions sont récupérées en quantités plus faibles : laitier et scories (4 %), résidus de broyage divers (4 %), black mass (poudre métallique issue du broyage des piles et accumulateurs usagés, 2 %), nickel (NiFe, 0,9 %), métaux ferreux (0,8 %), acier (0,7 %), zinc et dérivés (0,2 %), cadmium (0,2 %), cobalt / Inox / cuivre / aluminium / argent (< 0,1 %), lithium sel (< 0,1 %) et mercure (< 0,1 %).

Entre 2011 et 2012, la quantité de piles et accumulateurs industriels mis sur le marché a progressé de 9%. Une forte hausse des d'accumulateurs lithium industriels a été observée (2 fois plus d'unités et 3,7 fois plus en tonnages), liée à l'émergence des véhicules électriques sur le marché français et au développement des énergies renouvelables. Toutefois, les procédés de traitement des accumulateurs utilisés dans les véhicules électriques doivent encore faire l'objet de recherches pour permettre une valorisation optimale des matériaux, notamment du lithium, et préparer l'augmentation des volumes à recycler dans les prochaines années. Les solutions de traitement issues de travaux de R&D devront être compétitives, en adéquation avec les marchés nationaux, européens et internationaux et performants en termes de capacités de tri et d'extraction des fractions à haute valeur ajoutée. Deux projets sont ainsi actuellement accompagnés par l'ADEME dans le cadre du Programme Economie Circulaire des Investissements d'Avenir pour favoriser le recyclage des batteries des véhicules électriques : CYCLADE « Recyclage de Batteries pour Véhicules Electriques : Mise en Place d'une Filière Nationale Durable » et R-BE-LIVE « Création d'une filière de Recyclage des Batteries Li-Ion de Véhicules Electriques ». Ils portent notamment sur la récupération de métaux (lithium, cobalt, cuivre, nickel) et des composants organiques.

En 2012, la mise sur le marché français de 0,6 milliard d'équipements électriques et électroniques (EEE) a représenté 1,6 million de tonnes d'équipements, dont les durées de vie sont hétérogènes selon les catégories de produits [8]. Un total de 463 588 tonnes de déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE) a été déclarés traité en 2012, selon la répartition suivante : réemploi (2 %), réutilisation de pièces (< 1 %), recyclage (77 %), destruction (13 %), valorisation énergétique (7 %). Les 215 centres de traitement de DEEE présents sur le territoire français effectuent une ou plusieurs des différentes opérations suivantes : réemploi, réutilisation, dépollution, démantèlement, broyage, tri, recyclage, traitement physico-chimique. Les DEEE ménagers sont composés quasiment pour moitié de métaux⁹, l'acier (métaux ferreux) représentant 45 % et les métaux non ferreux (cuivre, cobalt, indium, tantale, etc.) représentant 7,5 %.

c. L'extraction des terres rares dans les aimants permanents

Les disques durs contiennent environ 20 g d'aimants et du ruthénium (Ref. 68). Il existe plusieurs types d'aimants dans les disques durs : les aimants au néodyme et les aimants au samarium cobalt. La proportion de ces 2 types d'aimants n'est pas connue et les procédés de traitement peuvent être différents. Les aimants permanents au néodyme (Nd Fe B) contiennent en masse environ 30% de Néodyme (ou de néodyme et praséodyme). Selon les propriétés désirées, ils peuvent être dopés en dysprosium (cas des aimants permanents d'éoliennes par exemple) et en terbium à hauteur de 1 à 5 %. Le ruthénium des disques durs représente une part importante (de l'ordre de ¼) de la consommation de ce métal, mais en quantité par disque dur ne représente qu'une couche épaisse de quelques atomes. Les disques durs ne sont pas à l'heure actuelle systématiquement séparés lors de la phase de traitement. Ils sont orientés vers des filières de broyage avec le reste des ordinateurs. Toutefois certains opérateurs réalisent déjà cette séparation pour assurer une destruction des données confidentielles stockées ou pour optimiser la valorisation des matériaux. Les aimants contenus dans les DEEE sont broyés avec le reste du dispositif puis captés par séparation magnétique. Ils se retrouvent alors avec les métaux ferreux qui sont envoyés dans le circuit de la sidérurgie, comme n'importe quelle autre ferraille. Une fois les aimants mélangés à la ferraille, il est très compliqué et coûteux de récupérer les TR car celles-ci s'y retrouvent en très faibles quantités. Il n'existe pas de technologie opérationnelle de recyclage des disques durs et des aimants. Des travaux de R&D sont attendus (séparation, recyclage), que ce

⁸ Les 10 catégories d'EEE sont : 1 Gros appareils ménagers ; 2 Petits appareils ménagers ; 3 Équipements informatiques et de télécommunications ; 4 Matériel grand public ; 5 Matériel d'éclairage ; 6 Outils électriques et électroniques ; 7 Jouets, équipements de loisirs et de sport ; 8 Dispositifs médicaux ; 9 Instruments de surveillance et de contrôle ; 10 Distributeurs automatiques

⁹ Les plastiques (17 %) et le verre (14 %) sont également des composants importants de ces déchets.

soit sur la valorisation des aimants issus des disques durs, ou du flux entier après un premier traitement de broyage/désintégration en élargissant dans ce cas à d'autres types de produits et composants contenant des aimants. C'est notamment le cas du projet «Récupération d'aimants permanents usagés contenus dans les déchets d'équipements électroniques pour une réutilisation et un recyclage (RECVAl-HPM) » financé par l'ANR (Programme MAT&PRO 2013). Les voies de réutilisation développées reposeront sur une recirculation des aimants sélectionnés après contrôle vers de nouvelles applications et sur le reconditionnement pour les aimants les plus massifs (éolien ou applications médicales) par découpe. Des procédés seront mis au point, tels que la récupération des terres rares par extraction par un solvant sélectif (magnésium liquide) à haute température, par hydrométallurgie à l'aide de solvants bio-sourcés et par électro-réduction. Ces travaux permettront de bâtir une réelle vision des possibilités des procédés en rapport avec les matériaux de seconde vie produits : métaux ou concentrés de TR.

d. L'extraction des métaux des lampes à basse consommation d'énergie

Les lampes concernées par la réglementation DEEE (lampes fluocompactes, LED, ...) sont collectées par l'éco-organisme Récyllum et traitées dans des centres de traitement spécialisés pour ce flux. Dans ces centres, les lampes sont broyées pour récupérer les différents matériaux, ce qui permet de recycler plus de 90 % de leur poids :

- les lampes sont constituées majoritairement de verre (88 %), qui est recyclé pour fabriquer de nouvelles lampes ;
- les métaux, qui représentent 5 % du poids des lampes, sont réinjectés dans l'industrie pour fabriquer de nouveaux produits ;
- le mercure, présent en très petite quantité, est neutralisé ;
- les résidus (plastiques, etc.) sont incinérés avec récupération d'énergie.
- les poudres fluorescentes, qui contiennent entre 3 et 30 % de TR selon les lampes, sont envoyées pour recyclage dans un autre centre de traitement (Ref. 67). Une usine de recyclage des terres rares à partir des poudres fluorescentes a été inaugurée en France en septembre 2012. Le procédé mis au point permet de séparer 6 terres rares différentes par des successions de procédés pyrométallurgiques et hydrométallurgiques. Les TR récupérées sont directement réutilisables par les fabricants de lampes. Ce site a une capacité de traitement de 1500 tonnes de poudres par an, soit plus de 33000 tonnes de lampes et a déjà traité plusieurs dizaines de tonnes de poudres fluorescentes. Le gisement en France ne suffit donc pas à faire tourner l'usine (moins de 5000 tonnes de lampes traitées en 2012 en France), qui s'approvisionne sur le marché mondial.

Quant aux lampes à LED, leur marché est en pleine évolution et le gisement qu'elles constituent est difficile à estimer en raison i) de leur durée de vie théoriquement très longue, et ii) du manque d'information sur leur contenu en métaux rares, la composition des LED restant une donnée très confidentielle. Les lampes LED sont susceptibles de contenir, en faibles

quantités, du gallium, du silicium, de l'or et potentiellement d'autres éléments comme l'yttrium, l'indium ou le cérium (Ref. 68). La présence de germanium dans les LED mises sur le marché n'est pas démontrée. La filière de traitement des lampes LED est actuellement identique à celle des lampes fluocompactes et le coût de traitement des lampes LED et d'extraction des métaux rares ne peut pas être déterminé à ce stade. Afin de maximiser le recyclage des lampes LED et d'extraire des fractions suffisamment concentrés en gallium et autres métaux stratégiques pour permettre leur recyclage, il sera probablement nécessaire de les trier après collecte et de les traiter séparément à l'aide de procédé spécialisé.

e. Les pistes de recherche

Des travaux de recherche sont attendus pour développer des solutions technologiques innovantes de recyclage de métaux, sous réserve d'un gisement approprié à l'échelle européenne disponible en quantité et qualité, d'un positionnement concurrentiel favorable et d'une rentabilité avérée. Avec l'ensemble des acteurs de la recherche, il convient aussi d'identifier les métaux spécifiques tels que le tantale et le néodyme pour lesquels il n'existe pas encore de procédé de récupération mais pour lesquels il y aurait un intérêt à développer des solutions de recyclage. Ainsi, il apparaît stratégique que la France poursuive son soutien à la recherche appliqué aux piles et accumulateurs et aux aimants permanents et se renforce sur le recyclage des cartes électroniques et des LED.

Actuellement, le recyclage des cartes électroniques présentes dans les DEEE et les VHU n'est pas réalisé en France mais par quelques fonderies internationales dont les procédés ne permettent pas la récupération de certains métaux stratégiques (tels que le gallium et le tantale). Eco-systèmes estime que 10% des cartes électroniques françaises collectées connaissent un premier traitement en France et que les 90 % restants sont traités directement à l'étranger, chez Boliden (Suède) et Umicore (Belgique) principalement. Les cartes électroniques font partie d'un sous-flux d'une fraction collectée et sont donc récupérées après une première étape de traitement (broyage, démontage, démantèlement, etc.). Selon EERA (European Electronics Recycling Association), seulement 25 à 35 % des cartes électroniques « riches » sont démontées avant broyage des DEEE en Europe. Il y a donc une opportunité à :

- identifier des procédés alternatifs (ex : traitement mécanique ou hydrométallurgie) aux technologies existantes des grandes fonderies de cuivre et fonderies intégrées pour récupérer les métaux des cartes électroniques ;
- évaluer spécifiquement le potentiel de rentabilité et d'aboutissement technologique ;
- identifier des métaux spécifiques (Ex : tantale, néodyme) pour lesquels il n'existe pas encore de procédé de récupération mais pour lesquels il y aurait un intérêt de récupération ;
- développer les procédés (étape de prétraitement et/ou de traitement final) afin de récupérer les métaux spécifiques identifiés.

VI. Ressources, réserves, énergie et criticité

O. Vidal (CNRS) et L. Raimbault (Mines Paritech)

Les chapitres précédents illustrent les liens étroits qui existent entre ressources minérales et énergie. Ils indiquent également que la transition vers des énergies décarbonées devrait accroître significativement nos besoins en ressources minérales et énergétiques fossiles, qui sont par ailleurs utilisées en quantité croissante pour les autres secteurs industriels, en réponse à un accroissement de la population et de son niveau de vie général. Cette conclusion doit être nuancée par le fait que la part d'énergie fossile utilisée pour produire les matières premières devrait diminuer avec l'augmentation de production d'énergie décarbonée. La question essentielle concerne la sécurisation de notre approvisionnement, qui doit être évaluée au regard de nos réserves et besoins... et de ceux de nos voisins plus ou moins proches. Cette question se pose dans un monde où la localisation de production de ressources minérales est très hétérogène.

La prise de conscience de la vulnérabilité française aux importations de ressources minérales nécessaires à son industrie en général, et dans le domaine de l'énergie en particulier, a engendré un regain d'intérêt pour la recherche dans le domaine. Pour exemple, le BRGM a réalisé et publié des monographies¹⁰ sur 14 matières premières minérales de grande importance pour l'économie française : Antimoine, Béryllium, Gallium, Germanium, Graphite, Lithium, Molybdène, Niobium, Platinoïdes (métaux du groupe du platine), Rhénium, Sélénium, Tantale, Tellure, Tungstène. Cette collection d'ouvrages s'enrichira d'une monographie sur le cobalt et sur le groupe des lanthanides (y compris Sc et Y, à paraître dans quelques mois). Chacune de ces monographies présente des informations générales sur l'abondance naturelle des éléments, leurs usages par domaine et par principaux composés dérivés, des perspectives d'évolution de la demande, des données sur les ressources et réserves nationales et mondiales, la production (y compris le recyclage), les principaux acteurs industriels de la chaîne de la valeur internationaux et français, une analyse du commerce extérieur de la France, et une évaluation de la criticité d'un point de vue français.

Au niveau international, des informations annuelles de production et de réserves primaires sont publiées par les grands pays producteurs et consommateurs à travers leurs ministères (e.g. Australie, Canada, Afrique du

¹⁰ L'ensemble de ces monographies est disponible ici : <http://www.mineralinfo.fr/panoramas.html>

Sud) et leurs bureaux géologiques, comme l'USGS américain. Ces informations montrent que malgré une utilisation et une production en constante augmentation, les réserves des métaux de base et leur « durée de vie » (durées restantes d'utilisation avec les réserves connues) restent stables au cours du temps (Figure 22). La figure 22 mérite quelques commentaires : Un gisement est une concentration dont la nature minérale et la géométrie permettent d'envisager une exploitation à fin d'extraction de la ou des substances représentées. A cette définition répond la notion de ressource évaluant la quantité de minerai présente in-situ. C'est une notion d'ordre géologique, théoriquement indépendante du temps. Un projet minier correspond à la transformation d'une ressource en réserve et à son exploitation économique. Une réserve est donc liée à un plan d'extraction, qui est en général envisagé à court terme et à une économie (coût d'exploitation comparé au prix). Une tâche importante d'une exploitation minière consiste à renouveler les réserves, c'est à dire à développer un plan d'extraction pour la part des ressources non incluses dans les réserves. Ces ressources correspondent aux "reserves base" de l'USGS reportées sur la figure 22. Par rapport au plan initial d'une exploitation minière, qui est conçu de façon à rembourser le plus rapidement possible le capital investi, les ressources sub-économiques ou à faible rendement (comptabilisées dans les « reserves base ») peuvent devenir économiques (« reserves ») par simple effet de l'existence d'une infrastructure déjà rentabilisée. Lors de la définition d'un gisement, la notion de réserve répond au court terme (équilibre financier de l'entreprise), alors que la notion de ressource répond au moyen-long terme (qui est plus celui du planificateur). Une réserve peut diminuer pour plusieurs raisons¹¹: par épuisement dû à l'exploitation, mais aussi par diminution du prix des métaux contenus, ou même pour des raisons réglementaires. La ressource correspondante diminue dans le premier cas, mais reste intacte dans les autres. Réciproquement, une réserve peut apparaître ex-nihilo à partir d'une ressource connue par exemple suite à des innovations technologiques permettant d'extraire un métal à partir d'un minerai exploité pour d'autres substances (un exemple pourrait être le lithium avec un procédé d'extraction à partir du mica lépidolite, donnant accès à de nombreuses ressources actuellement inexploitées ou exploitées pour d'autres substances.)

¹¹ Un exemple récent illustrant la possible perte de valeur de réserves est apparu en janvier 2015, période où la valeur des réserves des 10 premières mines mondiales de cuivre a plongé de 130 milliards de dollars en deux jours
https://mlms.infomine.com/ga/Mining%20News%20Digest/20150114/Link/http/www.mining.com/t-op-10-copper-mines-plunge-134-billion-in-value-66653/?utm_source=digest-en-mining-150114&utm_medium=email&utm_campaign=digest&gae=945843

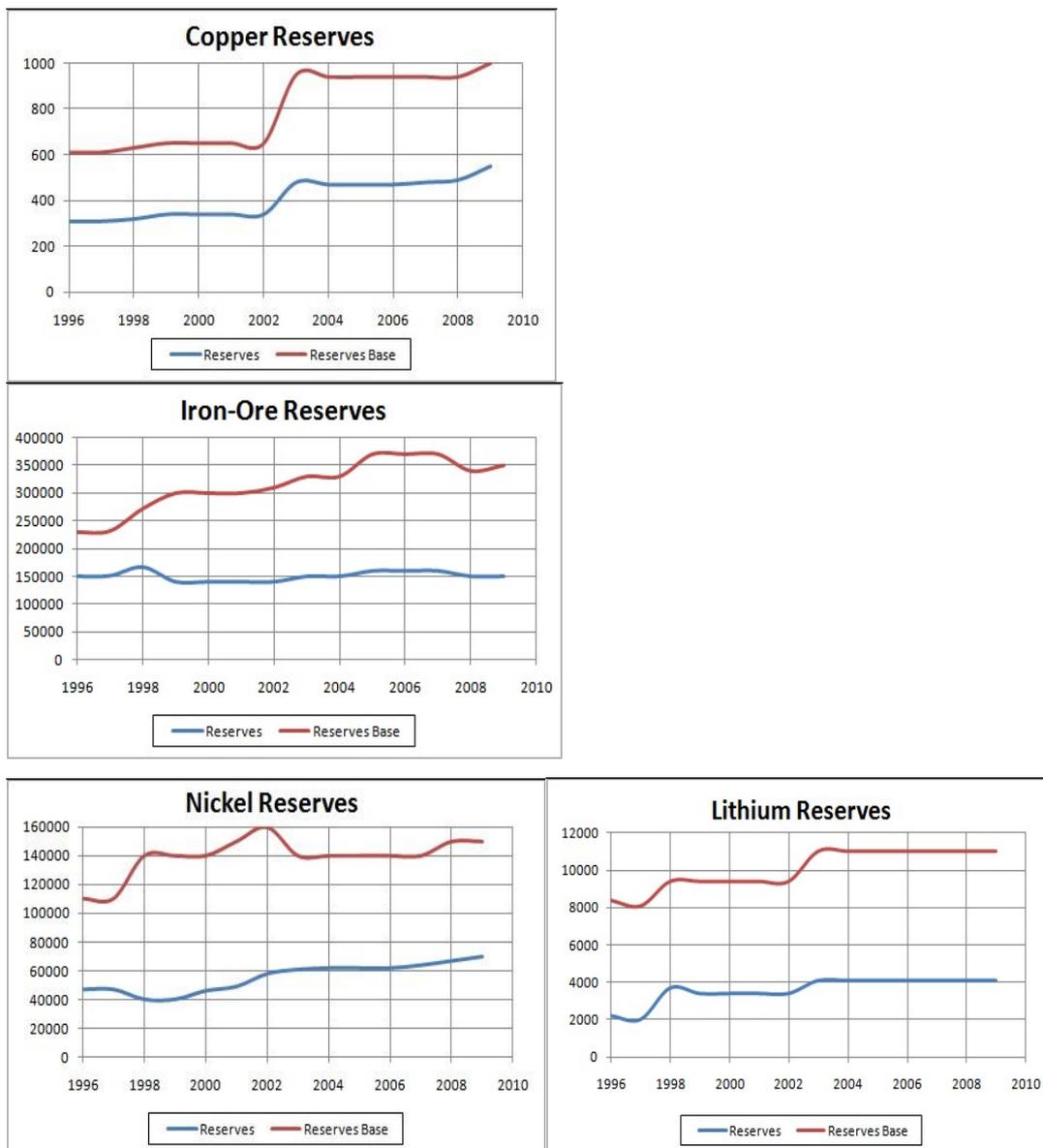


Figure 22: Exemples de d'évolution des réserves de Cuivre, Fer, Nickel et Lithium entre 1996 et 2010 (source USGS). D'après la nomenclature de l'USGS, les "Reserves base" sont la partie d'une ressource identifiée qui répond à des critères physiques et chimiques minimaux d'exploitation minière et de production selon les pratiques actuelles, y compris les critères de concentration, qualité, épaisseur et profondeur. Les « Reserves base » englobent les "Reserves" et la partie des ressources qui ont un potentiel raisonnable de devenir économiquement disponibles dans des horizons de planification au-delà de ceux basés sur la technologie et de l'économie actuelles. Les "Reserves" sont la partie des « Reserves base » qui pourrait être extraites ou produites au moment de la détermination économique. Le terme « Reserves » ne signifie pas nécessairement que les installations d'extraction sont en place et opérationnelles.

Pourtant, certains auteurs annoncent des pénuries à brève échéance, qui suivraient des pics de production dont les dates sont prévues avec une approche similaire à celle utilisée pour les hydrocarbure fossiles (Ref. 69). Cette approche est basée sur une analyse des données historiques de production et leur modélisation à l'aide d'une ou plusieurs fonctions logistique(s). La forme de la courbe logistique et donc la date du pic de production peuvent être déterminées une fois passé le point d'inflexion de la branche croissante.

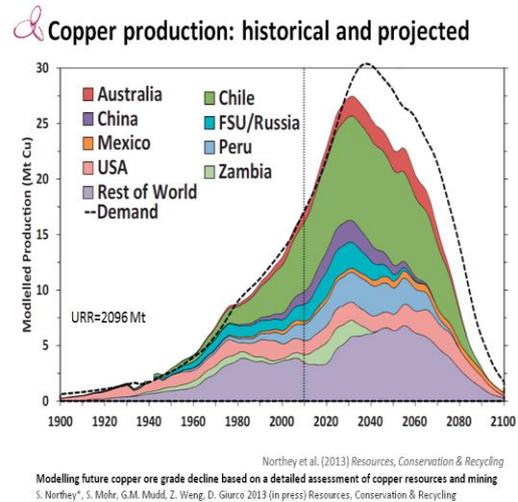
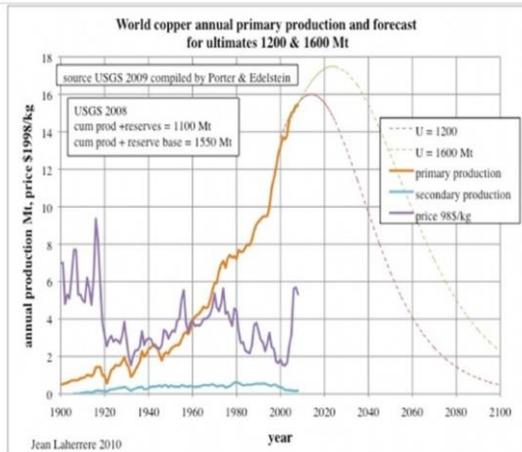


Figure 23: Exemples de modélisation de la production historique de cuivre par une courbe logistique à gauche (Source: Jean Laherrère The Oil Drum: Europe <http://europe.theoil Drum.com/node/6307>), et par agrégation de données logistiques de chaque pays producteur (source : <https://lasttechage.wordpress.com/2014/02/26/is-copper-entering-crisis-mode>).

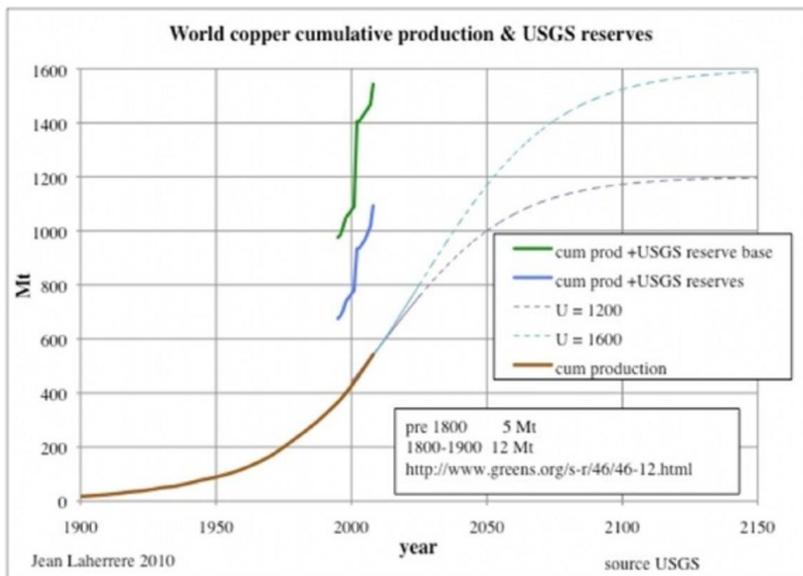


Figure 24: Production cumulée (intégrale de la courbe logistique de la Fig. 23) et comparaison avec les réserves publiées par l'USGS + production cumulée

Son intégrale, de forme sigmoïde (type fonction erreur), indique quant à elle la quantité de ressource non-renouvelable produite au cours du temps, et son asymptote aux temps infinis donne la quantité totale de cuivre qui pouvant être extraite avant «épuisement» (correspondante à une production primaire nulle dans le futur) (Figure 24), appelée «réserve ultime». L'approche logistique, utilisée avec succès pour les hydrocarbures conventionnels aux USA, a été appliquée à différents métaux par différents auteurs pour prédire leurs pics de production. Deux exemples sont donnés sur la Figure 23, qui indiquent des pics de production du cuivre entre 2010 et 2035.

L'intégrale de la courbe logistique du cuivre montrée sur la Figure 24 suggère une réserve ultime de cuivre exploitable à environ 1400 Mt \pm 200 Mt. Elle indique également que la quantité cumulée de cuivre produite pendant 6000 ans et jusqu'à 1900 a été de 17Mt, soit l'équivalent d'une année de production 2013. La même figure compare les estimations faites à l'aide de la modélisation logistique avec les valeurs de production cumulée + estimations des réserves publiées par l'USGS sur la base des informations fournies par l'industrie minière. Sur la Figure 24, l'augmentation des réserves avec le temps est plus forte que celle de la production cumulée. Cela n'indique ni l'abondance, ni la découverte de nouveaux gisements. Elle peut simplement résulter d'une baisse de la concentration en cuivre des gisements exploités, rendue possible par une augmentation du prix du cuivre et une amélioration des performances donc de la baisse du coût de production de l'industrie minière et extractive (voir ci-dessous). Il est également possible que les réserves publiées par l'USGS comptent des réserves probables mais non prouvées, ou soient basées sur des informations possiblement imprécises ou incomplètes fournies par l'industrie minière. On notera que les «réserves ultimes» déduites de l'approche logistique sont également critiquables, car l'intégrale d'une courbe de production ne donne qu'une idée très partielle des réserves, les données historiques de production dépendant tout autant de la demande que de la géologie. La modélisation logistique des données de production jusqu'à 1995 donnait une estimation des réserves de 1000 Mt et une baisse de production sur la période 1975-1995 pouvait être interprétée comme l'annonce d'un pic de production. Pourtant, l'accroissement de la demande mondiale depuis le début des années 2000 a pu être satisfait par un même accroissement de la production, entraînant une modification des courbes logistiques et un accroissement apparent des réserves à 1500 Mt en 2010. Les travaux de Northey et al. (2013) prédisent quant à eux une réserve ultime de 2096 Mt (Figure 23). Un défaut majeur de l'approche logistique réside dans son caractère probabiliste qui consiste en une simplification outrancière des hypothèses de base. En effet, pour toute abscisse sur la courbe sigmoïde, l'estimation des ressources restantes est faite à partir de ce qui est connu, c'est à dire des gisements exploités classiquement, à l'exclusion d'autres types, mais aussi des technologies actuelles. Or l'histoire minière montre à l'envi que les types de gisements exploités changent radicalement suivant les époques¹², et que les technologies évoluent rapidement. La modélisation par une seule sigmoïde d'une courbe composite pour une commodité donnée représente donc une simplification grossière. Il faudrait développer un modèle dans un espace à plusieurs dimensions (types de gisements, performance technologie, etc...) mais dont le nombre de dimensions n'est pas initialement connu. A côté de l'évaluation statistique, il est donc

¹² Pour illustrer ce propos, une projection logistique faite au début de l'âge du bronze aurait prédit l'épuisement des sources de cuivre natif à court terme. De la même manière, le Club de Rome dans les années 1970 a commis cette erreur en n'anticipant pas la mise en exploitation des gisements de cuivre de type porphyres, pourtant déjà identifiés car sous-jacents à de nombreux gisements de cuivre filoniens

nécessaire de mener une étude prospective sur la faisabilité de l'exploitation de nouveaux types de gisements et d'envisager des évolutions technologiques dans le domaine de l'extraction et de l'industrie minière.

La dépendance des réserves à la demande peut paraître surprenante au premier abord, mais elle est compréhensible. En effet, l'augmentation de la production pour satisfaire une demande en forte croissance s'accompagne souvent d'une baisse de la concentration des minerais des gisements exploités. Cette baisse de la teneur des gisements exploités, qui est possible si le prix du métal augmente, permet de comptabiliser dans les réserves des volumes de minerai qui étaient précédemment comptabilisés comme ressources (dont l'exploitation n'était pas rentable économiquement). L'augmentation de la production peut donc entraîner par effet mécanique un accroissement des réserves. On en déduit aisément que les réserves et durées de vie des ressources non-renouvelables dépendent de leur prix de vente, mais aussi des coûts d'extraction et de raffinage, qui dépendent eux-mêmes des progrès technologiques, de l'accessibilité à la ressource et du prix de l'énergie. En l'absence de découverte majeure de nouveaux gisements concentrés, la disponibilité et le coût de l'énergie fixe d'ailleurs la limite ultime de concentration en-dessous de laquelle l'extraction primaire en quantité n'est plus possible. Il ne s'agit pas d'une limite de faisabilité technologique, mais de coût énergétique et donc économique.

Cette brève discussion de l'exemple du cuivre illustre les difficultés et imprécisions associées à l'estimation de nos réserves primaires, car celles-ci sont mouvantes et ne dépendent pas uniquement de facteurs géologiques. Une estimation plus « fiable » devrait intégrer les dimensions économiques, sociales (acceptabilité) et énergétiques. Cela nécessite de bâtir des modèles complets qui manquent cruellement à l'heure actuelle, et qui soient contraints par des données historiques fiables. Une augmentation future de la production primaire de métaux sera probablement conditionnée par l'accès à une source d'énergie bon marché et abondante et/ou la découverte de nouveaux gisements concentrés « non-conventionnels », de type gisements profonds ou marins par exemple. Cette situation est comparable à celle des hydrocarbures. L'augmentation du prix des hydrocarbures conventionnels a entraîné le développement de l'exploitation d'hydrocarbures non-conventionnels, plus difficiles à extraire donc plus coûteux, mais qui sont maintenant comptabilisés dans les réserves mondiales. La grande différence est cependant la possibilité de recycler les métaux, ce qui évidemment impossible pour les hydrocarbures. Les métaux extraits ne disparaissent pas au cours de leur utilisation, ils forment un nouveau stock exploitable, qui sera comptabilisé dans les réserves quand le recyclage aura atteint un niveau significatif au niveau mondial. Mais pour bénéficier de cette ressource, nous devons maintenir les stocks de produits en fin de vie accessibles, ce qui n'est pas fait dans les pays de l'OCDE (voir chapitre précédent).

Plus que la quantité future de métaux à extraire, le taux production est une contrainte majeure pour l'industrie. L'utilisation de métaux rares s'est généralisée depuis une vingtaine d'années. L'emploi de ces métaux a permis des innovations industrielles importantes dans différents secteurs comme celui de l'énergie, du transport, et de l'électronique et de la communication, mais ces innovations ont été découplées de la réalité et des contraintes d'approvisionnement. La forte compétition d'usage

entraînant des tensions forte d'approvisionnement, les spécialistes ont défini un critère de criticité, qui correspond au rapport entre l'importance d'un élément donné pour l'industrie et le risque de son approvisionnement. Plusieurs exercices d'analyse de criticité ont été menés aux niveaux nationaux ou Européens. L'union Européenne a ainsi défini 14 éléments ou groupes d'éléments jugés « critiques » en 2010 et la liste a été complétée en 2014 par 7 nouveaux éléments. Aucun métal de base n'a été jugé comme présentant des niveaux de criticité élevés, car les réserves sont estimées être suffisantes pour satisfaire la demande croissante à un horizon d'une trentaine d'années. Pourtant, il faut souligner que 1) les métaux technologiques ou les technologies utilisant des métaux rares présentent le plus haut potentiel de substitution, alors que les métaux de base sont utilisés pour des usages à faible potentiel de substitution, et 2) l'extraction massive de métaux de base est très énergivores (20% de l'énergie mondiale utilisée par l'industrie est utilisée pour la seule production d'acier et de ciment : Ref. 7), et les conséquences environnementales de cette extraction augmentent fortement avec la baisse de teneur des gisements exploités. La notion de criticité ne prend pas en compte ces facteurs. Elle correspond à une vision d'assez court terme et visant l'optimum technico-économique. Cela ne signifie pas qu'elle ne soit pas pertinente, mais elle doit être complétée par une vision de plus long terme.

Les pistes de recherche

- Compiler les données historiques de production et de consommation des différents métaux (incluant les secteurs primaires et secondaires, la dépendance des métaux mineurs (sous-produits) vis-à-vis de la production des métaux courants, l'évolution des concentrations des gisements exploités, le rapport entre concentration exploitées et réserves pour différents types de gisements, l'effort d'exploration, les flux, etc...), les indicateurs économiques (fonction d'apprentissage, capex, opex, rendement, dette, etc...) et énergétiques (type d'énergie, consommation, rendement, exergie, etc...) au niveaux nationaux et mondiaux. Cette acquisition de données est fastidieuse et difficile, mais elle une étape absolument nécessaire pour comprendre en ensuite modéliser les couplages entre réserves-ressources-économie et pour contraindre des modèles « fiables », ou au moins capables de reproduire les évolutions historiques.
- Envisager les besoins futurs dans leur globalité et prendre en compte le potentiel d'innovation industrielle et potentiel (ou non) de substitution. Des analyses fines (type ACV-ICV) par secteur sont nécessaires, mais elles doivent être basées sur des données « matériaux » et « énergie » fiables et actualisées, elles ne doivent pas se limiter aux composants mais considérer les systèmes dans leur globalité.
- Une analyse de la demande future, si elle reste très difficile, est absolument nécessaire, car la production dépend de la demande, et non l'inverse. Cela suppose de prendre en compte toutes les filières industrielles, et d'avoir des scénarios d'évolution mondiaux les plus réalistes possibles.
- Analyser l'impact des facteurs géopolitiques et de régulation, de la concentration industrielle de la production

- Bâtir des scénarios « ressources » complets intégrant le recyclage, les dimensions économiques, sociales, énergétiques, industrielles et technologiques. Ce type de modèle existe pour la transition énergétique, mais ils ne prennent pas en compte les contraintes liées aux ressources et restent descriptifs, pas forcément prédictifs. D'autres modèles prédictifs prennent en compte les différents aspects mentionnés (modèles type club de Rome), mais ils restent généralement très déterministes, ils ne différencient pas les différentes ressources et l'estimation des réserves disponibles ne prend pas en compte la réalité géologique, ils n'incluent souvent pas de potentiel d'évolution technologique ni de modèle économique complet, et le couplage entre les différents facteurs n'est pas complet. Un couplage type proie-prédateur semble pertinent, mais les modèles publiés de ce type restent très simplistes et n'intègrent pas le volet économique dans toute sa complexité. D'autres approches non déterministes et incluant une dimension thermodynamique sont également envisageables. Dans tous les cas, la physique de ces modèles (et leur « potentiel de prédiction ») devra être contrainte par des données historiques détaillées complètes.

VII. Axes de recherche généraux sur les ressources

La formulation des besoins en recherche ne peut être que générique, car la partie de la recherche liée à l'innovation technologique ne peut être décrite que dans ses grandes orientations. Il s'agit d'un domaine hautement concurrentiel où les travaux et leurs résultats sont généralement maintenus confidentiels jusqu'au moment de l'obtention d'un ou de plusieurs brevets protégeant l'innovation. Certains des besoins en recherche technologique évoqués ici peuvent donc être peu pertinents, le problème posé pouvant être en passe d'être résolu. Par ailleurs, des recherches peuvent porter sur plusieurs filières concurrentes visant à obtenir une même fonctionnalité, par exemple pour la production d'énergie à partir de source solaire. Si chacune de ces filières a son profil en termes de matières premières minérales mises en œuvre, il est très difficile de savoir laquelle de ces filières dominera le marché dans 10 ans ou d'avantage.

Par ailleurs, les questions de recherche ne peuvent pas être séparées des questions touchant à la politique des Etats et de l'UE. Ces politiques peuvent par exemple restreindre l'usage de certains métaux (cas du cadmium et du mercure), freiner l'accès aux ressources primaires endogènes (politiques d'aménagement du territoire et environnementales, coopération au développement), favoriser la disparition de la compréhension des enjeux et des savoir-faire (politiques de formation, politique industrielle). Pour que la recherche puisse être pleinement efficace, les problématiques liées aux matières premières minérales doivent être intégrées dans une stratégie nationale holistique, impliquant toutes les autres politiques de l'Etat. La

complexité des filières industrielles concernées, les facteurs de risque, la globalisation font que le niveau européen paraîtrait le plus approprié pour le développement d'une telle stratégie holistique. C'est là l'esprit de l'Initiative Matières Premières de la Commission Européenne (cf. Annexe), mais il faudra certainement encore beaucoup de temps et d'efforts pour arriver à la mise en œuvre complètement opérationnelle d'une telle stratégie.

Les pistes de recherche spécifiques qui sont listées à la fin des différents chapitres précédents ne seront pas répétées dans ce chapitre. Nous y détaillons plutôt les besoins en recherche identifiables tout le long de la chaîne de la valeur représentée par la Figure 18, pour tous les secteurs industriels.

1 Estimation des besoins en ressources minérales

Le présent rapport est focalisé sur les besoins pour le secteur de l'énergie, mais l'analyse des besoins doit être faite de manière plus systématique et par secteurs industriels, en prenant en compte le développement de toutes les technologies nouvelles qui ont un fort potentiel de déploiement au niveau mondial. Il faut absolument éviter de découpler la recherche et l'innovation technologique de la réalité d'approvisionnement en matières premières, ainsi que des impacts environnementaux et énergétiques de leur production. L'estimation des besoins nécessite des scénarios de développement et des bases de données solides et actualisées d'intensité énergétique par pays producteurs de produits et/ou de matière et/ou d'énergie. Dans les deux cas, il s'agit d'un travail de collecte et d'intégration de données laborieux et difficile, qui n'est envisageable qu'en collaboration étroite avec le milieu industriel. Nous avons constaté les difficultés à accéder à des données fiables et actualisées d'intensité matière pour les seuls équipements de production d'énergie existants. Cette difficulté est beaucoup plus importante pour les technologies en développement qui seront implémentées dans le futur, car les enjeux commerciaux et technologiques ne poussent pas le monde industriel à la transparence. Pour autant, l'exposition des industriels à de possibles difficultés d'approvisionnement dans le futur (et donc des coûts de production) est un facteur de risque qu'il convient d'estimer avec précision. En ce sens, une collaboration étroite entre développeurs industriels et chercheurs « indépendants » permettant une modélisation dynamique des interactions industrie-matières premières-énergie-économie-société-environnement doit être perçue comme une stratégie gagnante.

2 Acceptabilité sociale et conditions-cadre pour l'approvisionnement en matières premières minérales primaires et secondaires

- Analyses de la criticité
- Analyse des cycles de vie, bilans matières, matrices « entrées/ sorties »
- Intelligence minérale, compréhension des enjeux liés à l'industrie minérale, développement de scénarios sur 30 ans
- Médiation sociale, communication des enjeux
- Formation à tous les niveaux (primaire, secondaire, supérieur)
- Connaissance et gestion des aléas
- Recueil des bonnes pratiques, développement du concept de « mine responsable »

3 Géologie et exploration

Les ressources minérales du continent européen, les territoires associés et de son domaine maritime (ZEE), deviennent stratégiques, mais elles restent mal connues. C'est en particulier le cas des métaux rares et des ressources profondes. Si une nouvelle exploration des territoires apparaît indispensable, l'exploitation et le traitement de la matière première ne pourront s'y faire que si la maîtrise des impacts environnementaux et sociétaux aux niveaux exigés par leur population y est acquise. La recherche de nouveaux gisements doit s'accompagner d'évaluations détaillées des impacts environnementaux, en particulier dans des régions frontalières peu accessibles et fragiles (paysage, biodiversité, populations) comme les régions arctiques ou les forêts équatoriales pour lesquelles les impacts environnementaux et sociétaux des projets miniers sont déjà évaluables, mais aussi des fonds des océans, maintenant considérés un nouvel Eldorado, mais pour lesquels ces impacts y sont encore très peu estimables faute de connaissances scientifiques suffisantes

- Métallogénie
- Infrastructure géologique 3D
- Techniques d'exploration (Téledétection (hyperspectral), Géophysique, Géochimie, Géostatistique, modélisation 3D, Ressources minérales marines, Ressources minérales non-conventionnelles (associées par ex. à la matière organique, aux phosphates ...)

4 Extraction minière

- Acquisition des données de base avant exploitation (géochimie des sols, flore, faune, eaux, risques naturels...)
- Réduction de la consommation énergétique
- Réduction de la consommation en eau
- Valorisation des minéralisations difficiles d'accès : couches minces, minéralisations profondes
- Réduction des émissions (CO₂, NO_x, SO_x, COV, particules, déchets liquides et solides, lutte contre le phénomène de drainage minier acide)
- Stabilité des ouvrages souterrains
- Intégration de la phase d'après-mine dans la conception des nouvelles exploitations
- Traçabilité des productions, lutte contre les matières premières minérales issues de zones de conflits
- Développement et généralisation de l'usage d'indicateurs de performance durable

5 Traitement des minerais et métallurgie, purification, conception/ usage/ production de composants

L'amélioration des performances de séparation et de traitement des minerais est un enjeu important pour réduire l'utilisation d'énergie et les impacts environnementaux. La caractérisation structurale et la détermination des propriétés des composés intermétalliques, de leurs hydrures, des nanomatériaux sont également des sujets d'importance pour leurs applications dans le domaine de l'énergie et de l'environnement (e.g. stockage de l'hydrogène, stockage électrochimique, génération thermoélectrique, conversion magnétocalorique, cellules photovoltaïques)

- Réduction de la consommation énergétique
- Réduction de la consommation en eau
- Valorisation des minéralisations difficiles : minerais réfractaires, minerais riches en matière organique ... Valorisation des sous-produits
- Co-traitement des ressources primaires (minières) et secondaires (déchets issus de produits en fin de vie)
- Réduction des émissions (CO₂, NO_x, SO_x, COV, particules, déchets liquides et solides, lutte contre le phénomène de drainage minier acide)
- Gestion des résidus (valorisation, stabilité des ouvrages, lutte contre les émissions polluantes)
- Traçabilité des productions, lutte contre les matières premières minérales issues de zones de conflits
- Développement et généralisation de l'usage d'indicateurs de performance durable
- Production de métaux ultrapurs
- Eco-conception des composants (réduction des quantités de matières premières minérales utilisées, conception en vue de la déconstruction et du recyclage en fin de vie, lutte contre l'obsolescence programmée ...)
- Recherche de substitutions à l'usage de matières premières minérales critiques
- Identification des risques environnementaux et sanitaires

6 Recyclage

Le transfert considérable de matière depuis la ressource naturelle vers l'anthroposphère produit des stocks de matière nouveaux et donne à l'Homme la capacité de devenir un acteur significatif dans le contrôle des cycles de la matière. Mais pour cela, il doit en connaître les cycles de vie et pouvoir en optimiser sa consommation, la réutiliser et la recycler. Ces choses sont actuellement mal maîtrisées, certains métaux par exemple comme les terres rares et le lithium n'étant quasiment pas recyclés.

- Définition et mise en œuvre d'une stratégie nationale pour le recyclage des métaux
- Collecte des produits en fin de vie
- Déconstruction, préparation au recyclage et anticipation de ces process dès la conception des produits
- Déchets inorganiques (résidus miniers, slags, etc...),
- Extraction métallurgique, approches intégrées

7 Substitution

En particulier dans les secteurs suivants : énergies décarbonées, conditions extrêmes, bulk applications, matériel électronique et médical. Le lecteur intéressé est invité à lire le chapitre dédié à ce thème de la feuille de route ERA-MIN, qui détail les différents types de substitutions possibles ainsi que les éléments présentant les potentiels de substitution les plus élevés (Ref. 74)

8 Thèmes transversaux

- Energie, matières premières et environnement, bases de données, séparation minérale, recherche intégrée
- Modélisation dynamique des interactions industrie-matières premières-énergie-économie-société-environnement.

VIII. Annexe

a. Informations et agendas de recherche disponibles

La prise de conscience croissante des enjeux liés au développement durable a, ces dernières décennies, conduit à la formulation de politiques et de législations relatives aux ressources naturelles et à l'environnement. Les questions relatives à l'énergie, à l'eau, au changement climatique ont, dans ce cadre, reçu une attention prioritaire. Ce n'est qu'à partir du milieu de la première décennie de ce siècle que les enjeux liés aux matières premières minérales sont réapparues sur les écrans de décideurs politiques occidentaux, notamment aux USA, dans l'Union Européenne, au Japon et en Corée du Sud (Ref. 71, Ref. 72). Ils en avaient largement disparu lors de la chute de l'URSS, en 1989, lorsqu'a prévalu la croyance en l'avènement, à l'échelle mondiale, d'une démocratie libérale où des pays producteurs fourniraient indéfiniment des matières premières minérales brutes (concentrés et/ ou métaux) aux pays développés qui assureraient les productions industrielles en aval, et la valeur ajoutée qui va avec. L'émergence rapide de la Chine à partir du début du siècle en tant qu'acteur majeur de l'industrie minérale et métallurgique remet profondément en cause cette vision du monde, ce d'autant plus que la Chine a engagé, à marche forcée, le développement des industries de haute technologie aval, notamment dans le domaine de l'énergie, consommatrices de ces matières premières. D'autres pays très peuplés, notamment l'Inde et le Brésil, devraient s'engager dans la même voie de développement.

1 Niveau international/ mondial

Au niveau mondial dans le cadre du Programme des Nations Unies pour le Développement les travaux du Groupe International pour les Ressources (GIR) UNEP International Resource Panel) fournissent des analyses approfondies relatives aux enjeux liés aux matières premières minérales dans un cadre de développement durables. Les analyses actuellement disponibles, publiés sous forme de rapports coordonnés par un groupe d'experts internationaux et sur les données publiées dans les meilleures revues scientifiques à comité de lecture, portent sur :

- les stocks de métaux per capita déjà extraits et capitalisés dans les biens de consommation, les infrastructures et les déchets (produits en fin de vie) (Ref. 1);
- l'évaluation des impacts environnementaux de la consommation et de la production et la définition des produits et matières prioritaires en termes d'utilisation des ressources naturelles et de génération de pollutions (Ref. 71);
- l'évaluation des risques et des défis environnementaux liés aux flux eu aux cycles anthropiques des métaux (Ref. 9);
- l'état du recyclage des métaux (Ref. 72)

- les options, les limites et les infrastructures relatives au recyclage des métaux (Ref. 73);

Un rapport sera rendu public, courant 2014, sur les bénéfices, les risques et les compromis liés aux technologies à basse empreinte de carbone pour la production de l'électricité.

Ces rapports s'inscrivent dans un constat d'ensemble, celui du nécessaire découplage entre la croissance (courbe a de la Figure 25, indispensable à la maximisation du bien-être et du développement social (courbe b), de la consommation de ressources naturelles (courbe c, découplage relatif) et, surtout, des impacts négatifs sur les écosystèmes, dont dépendent la vie sur Terre, causés par cette consommation de ressources (courbe d, découplage absolu). Ce constat est l'un des moteurs du développement de la production d'énergie à partir de ressources renouvelables et, plus largement, du développement du concept d'économie circulaire. La recherche de ce découplage est au cœur des stratégies de développement durable.

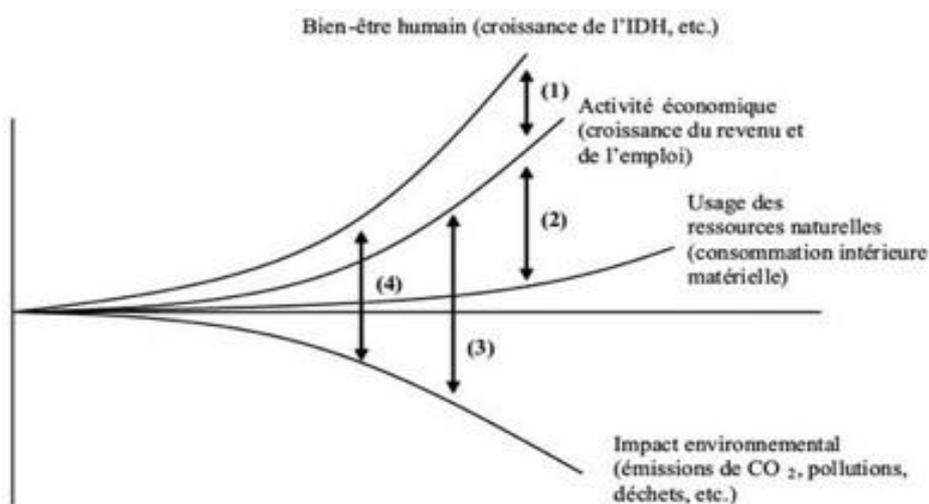


Figure 25: Schéma du découplage

2 Niveau européen

Au niveau européen, la Commission Européenne a lancé plusieurs initiatives ayant trait à la relation matières premières minérales – énergie. Les dispositifs mis en place sont décrits sur le site « Mineralinfo » (<http://www.mineralinfo.fr/page/politique-europeenne-synthese-contribution-France>) et sur le site « Matières premières non énergétiques » de la Commission européenne (http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/index_en.htm).

Hormis sa présence dans les réponses aux projets FP7 puis H2020, la France est également présente dans la « KIC raw materials » (http://eit.europa.eu/sites/default/files/EIT%20Raw%20Materials%20-%20Factsheet%202014_0.pdf) avec un centre de co-localisation à Metz et dans la coordination des deux réseaux européens ERA-MIN et Prometia :

ERA-MIN

En 2011, grâce à un cofinancement européen du 7^{ème} PCRD, 20 partenaires de 15 Etats membres de l'UE, l'Afrique du Sud et l'Argentine, en charge de la programmation et du cofinancement de la recherche en relation avec le domaine des matières premières minérales se sont associés dans le cadre d'un réseau européen formel de type ERA-NET coordonné par le CNRS et impliquant l'Ademe et le BRGM pour la France. Cet ERA-NET « matières premières minérales », appelé ERA-MIN¹³ a pour objectif la coordination des efforts de recherche publique dans ce domaine et le lancement d'appels à proposition en commun. En associant plus de 100 acteurs avec une grande diversité d'expériences professionnelles et provenant de divers Etats membres a élaboré son propre agenda de recherche (Ref. 74) articulé en cinq grands chapitres. Il inclut des volets de recherche dans le domaine social et sociétal ainsi qu'un volet de coopération internationale. Chaque chapitre propose une analyse de la situation et des objectifs de recherche à court-terme (2 ans), à moyen-terme (2 à 5 ans) et à long-terme (+de 5 ans).

Les cinq chapitres de l'agenda de recherche d'ERA-MIN sont :

- **Approvisionnement en ressources minérales primaires (extraites d'un gisement)** : exploration, exploitation, traitement des minerais, métallurgie, fermeture des exploitations minières et gestion de l'après-mine ;
- **Approvisionnement en ressources minérales secondaires (issues du recyclage)** : recyclage des déchets miniers et métallurgiques ; éco-conception des produits, notamment en vue de leur recyclage ultérieur ; distribution et utilisation des produits notamment pour anticiper le développement et la gestion de la « mine urbaine » constituée par les produits en fin de vie ; collecte des produits en fin vie et logistique associée ; prétraitement de ces produits en vue du recyclage des matières premières contenues ; extraction métallurgique ; bouclage de la boucle de l'économie circulaire ;
- **Substitution des matières premières critiques pour un pays ou un type d'entreprises** : l'agenda de recherche a identifié des matières premières à substituer en premier vu les facteurs de criticité qui leur sont spécifiques. Les matériaux pour les technologies énergétiques vertes font partie des priorités identifiées en vue de leur substitution, avec identification d'enjeux précis de recherche qui ont été intégrées dans la synthèse du chapitre VIII.
- **Appui aux politiques publiques et intelligence minérale** : développement d'une capacité publique européenne d'intelligence minérale et d'une infrastructure géologique 3D focalisée sur les zones principales métallifères européennes ; la poursuite et le renforcement des capacités publiques d'analyse des flux de matières entrant et sortant des processus de production des matières premières ; développement de la méthodologie d'analyse des aléas (« facteurs de criticité ») liés aux différentes étapes des principales chaînes de la

13 Lien : www.era-min-eu.org

valeur ; développement des démarches d'éco-efficience et de systèmes d'indicateurs permettant de mesurer les progrès accomplis ; formation de compétences pour le développement d'une économie efficace en ressources ;

- **Formation et coopération internationale** : revitalisation de l'enseignement supérieur dans les disciplines scientifiques et technologiques liées à la chaîne de la valeur des matières premières minérales (fig. 9, page 11) ; création d'une base de données de formations européennes pertinentes et de l'évolution des effectifs en entrée et en sortie (validation diplômante) de ces formations ; développement de cours en ligne ; diffusion d'informations sur les matières premières minérales destinées au public général ; développement de réseaux paneuropéens de recherche publique ; développement de programmes de coopération internationale adaptés à différents partenaires (pays développés pauvres en ressources minérales, pays producteurs développés, pays en développement et pays de la zone périphérique de l'UE.

La mise en œuvre de cet agenda de recherche a commencé dans le cadre des appels à proposition 2013 (budget de 4 M€), 2014 (budget de 8 M€) et 2015 (8 M€).

Prometia

PROMETIA (<http://prometia.eu>) est une association internationale coordonnée par le CEA à but non lucratif dont l'objectif est de promouvoir l'innovation dans le traitement des minerais et la métallurgie extractive pour l'exploitation minière et le recyclage des matières premières. L'Association a pour but de renforcer les compétences techniques européennes et les savoir-faire industriels dans la transformation des matières premières et de soutenir le développement industriel et économique par:

- un accès plus facile pour les partenaires industriels aux équipes de R & D européenne les plus compétentes, ainsi que des services et des installations pour un up-scaling des procédés métallurgiques et minières en Europe,
- la promotion des résultats scientifiques les plus innovants des équipes de recherche européennes vers des partenaires industriels
- la visibilité et l'accès de tous les partenaires à diverses possibilités de financement

IX. Références bibliographiques

- Ref. 1 UNEP - 2010 - Metal stocks in society - A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel - Graedel T. E. - UNEP (Nairobi, Kenya)- <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DItx1264xPA-Metal%20stocks%20in%20society.pdf>
- Ref. 2 International Copper Study Group – 2013 – The World Copper Factbook - International Metals Study Groups (Lisbon, Portugal) - <http://www.icsg.org/index.php/component/jdownloads/finish/170/1188>
- Ref. 3 SACHS, Jeffrey D., & Andrew M. WARNER (1995), « Natural resource abundance and economic growth », working paper, Harvard Institute for International Development.
- Ref. 4 Kelly T. D., Matos G. R. - 2013 - Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States - United States Geological Survey - Data Series 140 - Reston, Virginia, USA - <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/>
- Ref. 5 Janssen L.G.J. , Lacal Arántegui R. , Brøndsted P. , Gimondo P. , Klimpel P. , Johansen B.B. , Thibaux P. - 2012 - Scientific Assessment in support of the Materials Roadmap enabling Low Carbon Energy Technologies: Wind Energy - European Commission - DG JRC Institute for Energy and Transport -Strategic Energy Technologies Information System (Petten, The Netherlands) –
- Ref. 6 U.S. Department of Energy - 2011 - Critical materials strategy - U.S. Department of Energy (Washington, DC, USA)- http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf
- Ref. 7 International Energy Outlook (2013) <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/industrial.cfm>
- Ref. 8 Rankin J. - 2012 - Energy Use in Metal Production - Presentation to the High Temperature Processing Symposium 2012 - Swinburne University of Technology - <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP12183&dsid=DS3>
- Ref. 9 UNEP (2013) Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. van der Voet, E.; Salminen, R.; Eckelman, M.; Mudd, G.; Norgate, T.; Hischier, R. - UNEP (Nairobi, Kenya) - http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Environmental_Challenges_Metals-Full%20Report_150dpi_130923.pdf
- Ref. 10 Koltun, P., A. Tharumarajah - 2010 - LCA study of rare earth metals for magnesium alloy applications. Materials Science Forum 654 – 656(1): 803 – 806.
- Ref. 11 Ashby, M.F. - 2009 - Materials and the environment: Eco-informed material choice. Burlington, Massachussets, United States: Butterworth.
- Ref. 12 Eckelman M. J. - 2010 - Facility-level energy and greenhouse gas life-cycle assessment of the global nickel industry Resources, Conservation and Recycling, Volume 54, Issue 4, Pages 256-266

- Ref. 13 Norgate, T.E. 2010. Deteriorating ore resources: energy and water impacts. Graedel, T., Van der Voet (Eds.). - 2010 - Linkages of Sustainability, Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press (MIT, Cambridge, Massachusetts, USA)
- Ref. 14 USGS - 2014 - Mineral Commodity Summaries 2014 - United States Geological Survey - (Reston., Virginia, USA)
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>)
- Ref. 15 World Bank - 2014 - China overview - (Washington D.C., USA) -
<http://www.worldbank.org/en/country/china/overview>
- Ref. 16 Rosenkranz R. D. - 1976 - Energy consumption in domestic primary copper production - Information circular 8698 - U.S. Bureau of Mines (Washington D.C. - USA) -
<https://ia600801.us.archive.org/26/items/energyconsumptio00rose/energyconsumptio00rose.pdf>
- Ref. 17 Comision Chilena del Cobre (COCHILCO) - 2014 - Statistical database on production and energy use -
<http://www.cochilco.cl/estadisticas/intro-bd.asp>
- Ref. 18 Mudd G., Weng Z., Jowitt S. M. - 2013 - A Detailed Assessment of Global Cu Resource Trends and Endowments - Economic Geology, v. 108, pp. 1163–1183
- Ref. 19 Mudd G. - 2013 - The "Limits to Growth" and 'Finite' Mineral Resources - Re-visiting the assumptions and drinking from that half-capacity glass - INT. J. Sustainable Development Vol. 16 Nos 3/4 pp. 204.
- Ref. 20 G. M. Mudd (2007) An analysis of historic production trends in Australian base metal mining. Ore Geology Reviews, 32, 227-261
- Ref. 21 Committee on Critical Mineral Impacts on the U.S. Economy - 2008 - Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy - Committee on Earth Resources, National
- Ref. 22 Research Council of the National Academies - Washington (D.C., USA). http://www.nma.org/pdf/101606_nrc_study.pdf
- Ref. 23 Commission Européenne - 2008 - Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions du 4 novembre 2008, intitulée "Initiative «matières premières — répondre à nos besoins fondamentaux pour assurer la croissance et créer des emplois en Europe" COM(2008)699-
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0699:FIN:FR:PDF>
- Ref. 24 European Innovation Partnership on Raw Materials, Part 1: Defining priority areas and specific actions - 2013 - Strategic Implementation Plan for the European Innovation Partnership on Raw Materials - European Commission, DG Enterprise (Brussels, Belgium) - https://ec.europa.eu/eip/raw-materials/en/system/files/ged/1026%2020130723_SIP%20Part%20%20%20complet.pdf
- Ref. 25 European Innovation Partnership on Raw Materials, Part 2: Priority areas, action areas and actions - 2013 - Strategic Implementation Plan for the European Innovation Partnership on Raw Materials - European Commission, DG Enterprise (Brussels, Belgium) - https://ec.europa.eu/eip/raw-materials/en/system/files/ged/1027%2020130723_SIP%20Part%20II%20complet.pdf
- Ref. 26 Talens Peiro, L. ; Villalba Mendez, G and Ayres, R. (2011) : Rare and

Critical Metals by-products and the implication for future supply. Faculty and Research Working Paper -

<http://www.insead.edu/facultyresearch/research/doc.cfm?did=48916>

Ref. 27 Zepf V., Reller A., Rennie C., Ashfield M. & Simmons J., BP (2014): Materials critical to the energy industry.. An introduction. 2nd edition. <http://www.bp.com/energysustainabilitychallenge>

Ref. 28 Morgan, J.P. (2011): Rare Earths. We touch them every day, <http://www.gbdinc.org/PDFs/RARE%20EARTH%20PAPER%20FROM%20T.%20STEWART%20JUN%209%202011.pdf>

Ref. 29 Klobasa, M, Sensfuss, F., Erge, T., Wille-Hausmann, B.(2008): Analysis of the contribution of load management to the cost efficient balancing of wind energy and the mitigation of grid congestions. DEWEK 2008, 9th German Wind Energy Conference. Proceedings.

Ref. 30 Schueler, D. et al. (2011): Study on rare earths and their recycling: Oeko-Institut e. V., Darmstadt, Germany.

Ref. 31 Borgwardt, R. (2001): Platinum, fuel cells and future US road transport. Transportation Research, part D : transport and environment, 6(3), 199-207.

Ref. 32 Yentekakis, I.V., Kosolakis, M., Rapakourios, I.A., Matsuka, V. (2007) : Novel electropositively promoted monometallic (Pt-only) catalytic converters for automotive pollution control. Topics in catalysis, 42-43, 393-397.

Ref. 33 CULLBRAND, K. and MAGNUSSON, O. (2011) : The Use of Potentially Critical Materials in Passenger Cars. Report No. 2012:13, ISSN: 1404-8167

Ref. 34 OICA; International Organization of Motor Vehicle Manufacturers 2010 production statistics – 2011 - <http://oica.net/category/production-statistics/2008-statistics/>

Ref. 35 Rahimi, N. and Karimzadeh, R. (2011) Catalytic cracking of hydrocarbons over modified ZSM-5 zeolites to produce light olefins: A review. Applied Catalysis A: General, 398, 1-2, 1-17.

Ref. 36 Basaldella, E.I., Paladino, J.C. and Valle, G.M. (2006) : Exhausted fluid catalytic cracking catalysts as raw materials for zeolite synthesis, Applied Catalysis B: Environmental, 3-4, 189-191.

Ref. 37 Ismail Fluid catalytic cracking (FCC) catalyst optimization to cope with high rare earthoxide price environment. http://www.catalysts.basf.com/p02/USWeb-Internet/catalysts/en/function/conversions:/publish/content/microsites/catalysts/prods-inds/process-catalysts/BF-9626_US_REAL_Technical_Note.pdf

Ref. 38 Davis S, Inoguchi Y (2009) : Chemical Economics Handbook, Report, Zeolites. Colorado: SRI Consulting, 6

Ref. 39 Gutfleisch O, Willard MA, Brück E, Chen CH, Sankar SG, Liu JP. (2011) : Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. *Adv Mater.*, 23(7), 821-42

Ref. 40 Ten Year Network Development Plan. <https://www.entsoe.eu/major-projects/ten-year-network-development-plan/tyndp-2014/Pages/default.aspx>

Ref. 41 Copper content assessment of wind turbines, Final Report V01, by Frost & Sullivan. Presented to EC; July 12, 2010. Available at Leonardo

- Energy - Ask an Expert; <http://www.leonardo-energy.org/ask-expert>
- Ref. 42 O. Vidal, B. Goffé and N. Arndt (2013) : Metals for a low-carbon society, *Nature Geoscience*, 6, 894-896
- Ref. 43 Hertwich, E.G., Gibon, T., Bouman, Arvensen, A., Suh, S., Heath, G.A., Bergesen, J.D., Ramirez, A., Vega, M.I., Shi, L. (2014) : Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies. *PNAS*, pnas.1312753111
- Ref. 44 Falconer (2009) Metals Required for the UK's Low Carbon Energy System: The case of copper usage in wind farms. Dissertation degree of Master Science. https://www.exeter.ac.uk/media/.../lan_Falconer.pdf
- Ref. 45 Rapport Énergies 2050 : les différents scénarios de politique énergétique, ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie: <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Rapport-Energies-2050-les.html>
- Ref. 46 Scénario de l'Ancre pour la transition énergétique (2013). http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.asp?private_resource=984&fn=Doc+complet+ANCRE+version+finale+15+Janv%5F0%2Epdf
- Ref. 47 Deng, Y., Cornelissen, S. & Klaus, S. The Energy Report: 100% Renewable Energy by 2050 (WWF with ECOFYS and OMA, 2011).
- Ref. 48 International Energy Outlook 2013 (US Energy Information Administration, 2013); <http://go.nature.com/Vv1J4x>
- Ref. 49 Pacca and Horvard (2002) : Greenhouse Gas Emissions from Building and Operating Electric Power Plants in the Upper Colorado River Basin. *Environ. Sci. Technol.*, 36, 3194-3200.
- Ref. 50 Örlund, I (2011). Science and Technology Option Assessment : Future Demand from Photovoltaic Cells and Wind Turines (European Parlement, 2011) ; <http://go.nature.com/VUOs7V>.
- Ref. 51 Moss R.L., Tzimas, E., Willis, P., Arendorf, J., Espinoza, L.T. et al. (2013) : Critical metals in the path towards the decarbonisation of the EU energy sector, Assessing rare metals as supply-chain bottlenecks in low-carbon energy technologies. JRC Scientific and policy reports. (Report EUR 25994)
- Ref. 52 <http://www.acier.org/menu-left/statistiques-donnees-economiques.html>
- Ref. 53 <http://www.redressementproductif.gouv.fr/semaineindustrie/activites-industrielles/materiaux>
- Ref. 54
- Ref. 55 <http://www.tekes.fi/en/programmes-and-services/tekes-programmes/green-mining/>
- Ref. 56 Yellishety, M., Ranjith, P.G., Tharumarajah, A. (2010) . *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 1084-1094.
- Ref. 57 Morin, D. (2010) : La biolixivation des minerais sulphurés. *Géosciences*, 11, 82-89. <http://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00520887>
- Ref. 58 Fujii, H., Nagaiwa, T., Kusuno, H., Malm, S. (2005) How to quantify the environmental profile of stainless steel, SETAC North America 26:th Annual Meeting. http://www.euro-inox.org/pdf/health/SETACwrittenpaper_EN.pdf
- Ref. 59 http://wardsauto.com/ar/world_vehicle_population_110815
- Ref. 60 <http://alliancemagnesium.com/fr/alliance-magnesium-participera-a-la-conference->

[americaine-dinvestissement-fsx-interlinked/](#)

- Ref. 61 Energies : comment les stocker ? Journal du CNRS N°271 (2013), 20.
http://www2.cnrs.fr/sites/communiqu/fichier/3_jdc_271_l_enquete_sp.pdf
- Ref. 62 Hagelüken and Meskers, 2010: Complex Life Cycles of Precious and Special Metals, in: Graedel, T., and van der Voet, E. (eds.) Linkages of Sustainability. Strüngmann Forum Report 4. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Ref. 63 Reichl C., Schatz M., Zsack G., - World Mining Data - 2013 - Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit - Vienna, Austria -
<http://www.wmc.org.pl/?q=node/49>
- Ref. 64 OECD - "Restrictions on Exports of Raw Materials" online database - OECD (Paris, France) - Consulted on April, 25th, 2014 -
<http://add.oecd.org/subject.aspx?subject=8F4CFFA0-3A25-43F2-A778-E8FEE81D89E2>
- Ref. 65 Du, X., Graedel, T.E. (2011) Global In-Use Stocks of the Rare Earth Elements: A First Estimate. Environmental Science & Technology 45, 4096-4101.
- Ref. 66 The International Copper Study Group's World Copper Factbook (2013). <http://www.icsg.org/index.php/press-releases/finish/170-publications-press-releases/1188-2013-world-copper-factbook>
- Ref. 67 ADEME, 2013, Rapport annuel 2012 Equipements électriques et électroniques, Réf. 7909
http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=96ED90C9AC6F5C19326BDE07CDB64D38_to_mcatlocal1387532434317.pdf
- Ref. 68 ADEME, 2012, Objectifs de recyclage des métaux stratégiques dans les DEEE et P&A
- Ref. 69 Hubbert, M. K., 1956. Nuclear Energy and Fossil Fuels. Drilling and production practice 23, 7- 25.
- Ref. 70 Jean Laherrère (2010) Copper Peak. The Oil Drum: Europe
<http://europe.theoil Drum.com/node/6307>
- Ref. 71 UNEP - 2010 - Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production: Priority Products and Materials, A Report of the Working Group on the Environmental Impacts of Products and Materials to the International Panel for Sustainable Resource Management. Hertwich, E., van der Voet, E., Suh, S., Tukker, A., Huijbregts M., Kazmierczyk, P., Lenzen, M., McNeely, J., Moriguchi, Y. UNEP - (Nairobi, Kenya) -
http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/PriorityProductsAndMaterials_Report.pdf
- Ref. 72 UNEP - 2011 - Recycling rates of metals - A Status report. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the UNEP International Resource Panel - Graedel T.E., Allwood J., Birat J.-P., Reck B.K., Sibley S.F., Sonnemann G., Buchert M., Hagelüken C. - UNEP (Nairobi, Kenya) -
http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf
- Ref. 73 UNEP - 2013 - Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C - UNEP (Nairobi, Kenya)-
<http://www.unep.org/resourcepanel/Publications/MetalRecycling/tabid/106143/Default.aspx>
- Ref. 74 Vidal O., Weihed P., Hagelüken C., Bol D., Christmann P., Arndt N. -

2013 - ERA-MIN Research Agenda - ERA-MIN, The European Research Area Network (ERA-NET) on the Industrial Handling of Raw Materials for European Industries - (Coordinator: CNRS - the French Research Council, Paris, France) -

<http://hal-insu.archives-ouvertes.fr/docs/00/91/76/53/PDF/roadmap10.pdf>