

Développement économique et croissance des usages des métaux

Par Patrice CHRISTMANN

Direction de la Stratégie et de la Recherche, BRGM

Depuis l'origine des sociétés humaines, il y a 2,5 millions d'années, le recours aux ressources minérales n'a fait que progresser au gré des innovations en permettant ou en nécessitant l'usage. Le vrai âge des métaux n'a cependant commencé qu'après la Seconde Guerre mondiale grâce aux effets cumulés de la disponibilité d'une énergie abondante et bon marché et de découvertes réalisées en chimie et en physique permettant l'usage en quantités de plus en plus importantes de la quasi-totalité des métaux. Aujourd'hui, les métaux et autres matières premières d'origine minérale sont indispensables à de nombreux secteurs de l'économie. Ils sont au cœur des enjeux énergétiques : si la consommation énergétique nécessaire à leur production représente 10 % de l'énergie mondiale, ils sont aussi indispensables au développement des énergies renouvelables. Le défi majeur du XXI^e siècle va donc être de repenser nos modes de croissance, nos modes de vie, dont l'usage des métaux fait partie, afin que leurs impacts n'excèdent pas les capacités de résilience de l'écosystème mondial, dont dépend la vie sur Terre.

Les multiples matières premières non énergétiques d'origine minérale (roches, minéraux, métaux) sont essentielles au développement humain par les fonctions qu'elles rendent possibles, au même titre que l'eau, l'énergie, les produits agricoles ou de l'élevage ou encore les ressources halieutiques. Les grandes étapes de l'évolution de l'usage des matières premières minérales sont des marqueurs de l'histoire des civilisations. Leurs multiples usages sont consubstantiels au développement depuis les premiers âges de l'humanité jusqu'à l'époque actuelle. Celle-ci se caractérise par une intensification de plus en plus grande de l'usage des ressources naturelles, un usage à l'origine de nombreux impacts environnementaux.

Si les métaux ont joué un rôle clé dans le développement, puis dans la décadence de cités, de pays et d'empires, dont Athènes et Rome sont des exemples célèbres, jamais le monde n'avait utilisé autant de métaux *per capita* qu'aujourd'hui. À l'échelle mondiale, la période moderne se caractérise par une croissance démographique forte, ainsi que par le développement rapide d'une classe moyenne et de l'urbanisation. Dans les prochaines décennies, l'intensification du recours aux énergies renouvelables devrait encore faire croître la production et la consommation de métaux - et les pressions environnementales associées.

Les risques de conflit liés à la compétition internationale dans l'accès aux ressources productives, la montée des

nationalismes, la dégradation rapide de l'écosystème mondial, dont le changement climatique n'est que l'une des manifestations, pourraient sérieusement compromettre l'avenir de l'humanité et nous entraîner collectivement vers un nouveau Moyen Âge aux sombres perspectives. Seul l'avènement d'une gouvernance internationale des ressources naturelles, y compris des minerais et des métaux, pourrait éviter à l'humanité la catastrophe qui la menace. Cette gouvernance présuppose notamment le développement de l'économie circulaire à l'échelle planétaire, avec l'intégration dans le prix des métaux des externalités générées par leur production et leurs usages, notamment pour pouvoir financer les mesures de mitigation nécessaires. L'avènement d'une gouvernance des ressources naturelles, de manière générale (et donc y compris des minéraux et des métaux), basé sur les 17 objectifs de développement durable des Nations unies, ainsi que la transparence et la responsabilité sociétale élargie (RSE) des acteurs économiques sont des enjeux centraux pour notre avenir.

Préhistoire et Antiquité

Les premiers outils en pierre grossièrement taillée marquant le début du premier âge de pierre datent d'il y a au moins 2,6 millions d'années. Découverts dans la région des Afars, en Éthiopie [1], ils ont permis à l'homme de chasser plus efficacement, et donc de mieux se nourrir. C'est à l'usage des silex que l'on doit probablement la dé-

couverte du feu. Pendant plus de deux millions d'années, le développement humain a été limité au seul usage de la pierre, de plus en plus finement travaillée pour aboutir à la hache en pierre polie, environ 6 000 ans avant notre ère. La première exploitation d'une mine souterraine daterait de plus de 40 000 ans. Il s'agit de la Grotte du Lion (Lion Cave), au Swaziland, une exploitation d'oligiste (un oxyde de fer cristallisé en fines paillettes) ayant servi à la production de peintures rituelles.

Il faudra attendre jusqu'à 9 000 ans avant notre ère pour voir apparaître l'usage des métaux [2], avec l'utilisation de cuivre natif pour produire de petits objets (épingles, poinçons) par martelage de fragments de cuivre collecté dans les montagnes du sud de la Turquie ou de l'Irak, ainsi que de l'ouest de l'Iran actuels. En Amérique du Nord, l'exploitation du cuivre natif de la région de Keewenaw (Lac Supérieur, États-Unis) remonterait à environ -7000 ans.

Puis la découverte de la possibilité d'obtenir une fusion du cuivre natif en le jetant dans le feu a initié l'histoire de la métallurgie, il y a 3 800 ans avant notre ère, à Tepe Yahya, en Iran [2]. D'abord limitée au cuivre natif, cette technique s'est rapidement élargie au traitement de minerais oxydés (azurite et malachite) par adjonction de poudre de charbon de bois lors de la fusion. L'âge du cuivre (chalcolithique) commençait.

Le travail de l'or trouvé à l'état natif dans la nature, métal malléable et donc très facile à travailler, date également de cette époque, les plus anciens objets travaillés en or datant d'environ 5 000 ans avant notre ère (trésor de la nécropole de Varna, en Bulgarie).

La métallurgie du plomb, peut-être initialement développée à partir de minéraux oxydés de plomb particulièrement faciles à traiter pour en extraire le plomb, remonte au minimum à -6 000 ans. Il s'agit d'une baguette en plomb découverte dans la grotte d'Ashalim (désert du Néguev, Israël) [3], le plomb ayant pu être extrait de minerais turcs ou iraniens, les gisements de minerais oxydés les plus proches géographiquement d'Israël.

L'âge du bronze a succédé à l'âge du cuivre environ 3 000 ans avant notre ère, mais le « bronze » du premier âge du bronze était en réalité du cuivre arsénié, un alliage obtenu en sélectionnant empiriquement des minerais oxydés de cuivre provenant de gisements riches en arsenic, un type de gisement relativement courant. Son usage a notamment permis la fabrication de socs métalliques pour les araires, une innovation majeure facilitant le labour tout en le rendant plus efficace. Il s'agit d'une étape majeure dans l'histoire des pratiques agricoles, le gain de productivité obtenu favorisant la sédentarisation de populations jusqu'alors largement nomades et le début de l'urbanisation.

Le véritable bronze est un alliage cuivre-étain contenant environ 12 % d'étain, il est particulièrement résistant à l'usure et est facile à travailler. Son usage ne s'est répandu qu'au cours de la dernière partie de l'âge du bronze, à partir de -1 500 ans.

L'étain est un métal assez rare, dont les gisements ne sont pas localisés aux mêmes endroits que ceux du cuivre. Alors

que ce dernier provenait de Mésopotamie, de Chypre ou d'Iran, l'étain n'existait que dans les Cornouailles ou dans le Devon (Angleterre), la Bohême et la Saxe, soit bien loin de l'est du bassin méditerranéen. Le commerce à très longue distance a été nécessaire pour voir se développer son usage, l'étain étant un métal dont la dureté a permis de nombreuses applications en agriculture, mais aussi dans le domaine militaire. Le développement du commerce sur de très longues distances date d'il y a environ -1 400 ans : de l'ambre de la Baltique ayant été découverte en Égypte, dans les tombes de pharaons, et des perles de verre d'origine égyptienne datant du XXIV^e siècle avant notre ère ayant été trouvées dans une tombe antique danoise [4].

L'utilisation du mercure, un métal très rare, à l'origine de graves empoisonnements, a également commencé au XV^e siècle avant notre ère. Les Grecs l'ont utilisé dans la production... d'onguents, les Romains et les Égyptiens l'utilisant dans des produits... cosmétiques !

La métallurgie de l'argent, sous-produit du minerai de plomb, est plus récente que celle du cuivre ; les vestiges les plus anciens connus attestant de son usage datent d'il y a environ 2 000 ans avant notre ère. Au VI^e siècle avant notre ère, l'extraction à grande échelle de l'argent à partir du minerai des riches mines du Laurion, à l'est d'Athènes (Grèce), a permis le développement de la monnaie métallique dans la partie européenne du monde. La drachme athénienne en argent a été largement utilisée dans la Grèce de l'époque, une source de richesse ayant contribué à l'avènement et à la prospérité de la démocratie athénienne, ainsi qu'à sa puissance militaire. L'argent a notamment permis de décider, en -483, de la construction d'une flotte de 200 trirèmes qui a permis à Athènes de résister à plusieurs tentatives d'invasion par la Perse. Mais il a aussi causé la chute d'Athènes, lorsqu'en -413, les troupes de Sparte, la grande rivale d'Athènes, réussirent à dévaster l'Attique et ses mines du Laurion, entraînant la fuite des esclaves qui y travaillaient et coupant la route permettant l'acheminement de l'argent vers Athènes. Selon De Callatay [5], le stock d'argent disponible en Grèce au VI^e et V^e siècles avant notre ère peut être estimé à environ 400 tonnes (soit moins de 2 % de la production mondiale de l'année 2015, estimée à 27 300 tonnes selon l'U.S.G.S. [6]).

La métallurgie du fer, le métal le plus largement utilisé dans les économies modernes, ne se développe que très progressivement à partir du troisième millénaire avant notre ère, son usage semblant pendant longtemps confiné à la production sporadique de quelques pièces en fer, le bronze demeurant pendant longtemps le matériau métallique le plus largement produit. En Europe, l'usage du fer ne se répand largement qu'au début du premier millénaire avant notre ère.

Des estimations statistiques donnent des ordres de grandeur de la production annuelle de quelques métaux à l'époque de l'Empire romain (voir le Tableau 1 de la page suivante) et une estimation de la production *per capita* fondée sur une évaluation de la population de ce même empire s'établissant à 48 millions de personnes [7]. Comme pour Athènes, la disponibilité des métaux a forte-



Photo © Ratael Ibáñez Fernández, Wikimedia

Figure 1 : Anciennes exploitations d’or à Las Medulas (remontant à l’époque romaine, Espagne).

ment contribué au développement, puis à la chute de l’Empire romain. À l’époque romaine, ils étaient importés à partir de plusieurs grands centres : la Cornouaille, le Pays de Galles et le Devon anglais (pour l’étain), l’Espagne, Chypre et la Turquie (pour le cuivre, l’argent et l’or). De nombreuses petites exploitations d’or et d’argent étaient aussi disséminées dans les massifs cristallins d’âge hercynien (Portugal, Espagne, France, sud de l’Angleterre, Allemagne, République tchèque dans sa configuration géographique actuelle). Le développement de techniques hydrauliques élaborées impliquant le détournement de rivières a conduit à l’exploitation de l’or à ciel ouvert sur plus de 10 km² à Las Medulas (voir la Figure 1 ci-dessus), dans l’actuelle province espagnole de León, une exploitation minière qui a entraîné de profondes modifications du paysage.

Métal	Estimation de la production annuelle (en tonnes)	Source	Population en millions d’habitants (Source : [7])	Intensité en métal, en kg per capita
Argent	200	[5]	48	0,004
Cuivre	15 000	[8]	48	0,330
Fer	82 500	[8]	48	1,719
Plomb	80 000	[8]	48	1,667
Or	6	[5]	48	0,000

Tableau 1 : Ordres de grandeur de la production annuelle de métaux de l’Empire romain et de la production per capita – Source des données : [4], [5], [7].

Encore plus importante fut l’exploitation de l’argent, du cuivre, de l’or et du plomb en Andalousie, dans la mine de Rio Tinto. Un pic de production de l’argent aurait été constaté entre -50 et la fin du premier siècle de notre ère, le stock d’argent produit est estimé à 10 000 tonnes [4] (soit vingt-cinq fois le stock grec lors de l’apogée de la civilisation grecque classique). La métallurgie du plomb était particulièrement importante à cette époque, à la fois comme source d’argent métal, mais aussi pour la réalisation d’objets en plomb qui sont devenus alors d’usage relativement courant [8] (notamment des canalisations et des gouttières en plomb). Le plomb provenait notamment des mines de Rio Tinto (Espagne), de Sardaigne, du sud de l’Angleterre, et sa métallurgie était si intensive qu’une teneur très anormale en plomb datée de cette époque est détectable dans les glaces du Groenland [9]. Le « goût » des romains pour l’acétate de plomb, résultant de la préparation du *sapa*, un jus de raisin lentement épaissi par chauffage dans des chaudrons en plomb, pourrait avoir contribué au déclin de Rome en ayant favorisé le développement du saturnisme.

À la fin de l’Empire romain, la production minière et métallurgique se limitait à un nombre restreint de métaux, une situation qui allait assez peu changer jusqu’à la Révolution industrielle (et même jusqu’à l’époque moderne, XIX^e et XX^e siècles). Les métaux en question étaient l’argent, l’arsenic, le cuivre, l’étain, le fer, le mercure, l’or et le plomb.

Révolutions industrielles et période actuelle

À la chute de l'Empire romain a succédé le Moyen Âge, une longue période d'instabilité politique, de crises et de faible croissance en Europe, surtout au cours de la période allant jusqu'au X^e siècle de notre ère (marqué par l'apparition de la société féodale). Cette première période du Moyen Âge s'est traduite par une chute des productions d'or et d'argent et par des pillages systématiques par les Vikings des stocks monétaires d'argent disponibles dans les villes côtières de l'Europe du Nord-ouest.

La découverte, en 983, de la riche mine d'argent, de cuivre et de plomb des monts Rammelsberg, près de Goslar (centre-nord de l'Allemagne), a constitué une étape importante dans l'histoire du Saint Empire romain germanique, la ville de Goslar devenant ville impériale au X^e siècle, l'empereur s'y faisant construire un palais au XI^e siècle. Le développement progressif de nombreuses exploitations souterraines d'argent dans les Vosges (Sainte-Marie-aux-Mines), la Forêt Noire, la Bohême, la Saxe et la Sardaigne marqua profondément la structure économique et politique du continent européen pendant la seconde partie du Moyen Âge et même jusqu'au début du XIX^e siècle. La poudre noire utilisée pour la première fois comme explosif en 1627 dans la mine de Banská Štiavnica, aujourd'hui située au centre de la Slovaquie, a été l'innovation technologique majeure de cette période. C'est dans cette ville qu'a été créée la première École des mines d'Europe, en 1735.

La Révolution industrielle est en fait une série d'évolutions intervenues au cours d'une période couvrant plus de deux siècles, marquée par des innovations majeures dans les domaines des mines et de la métallurgie :

- La machine à vapeur, mise au point par Thomas Newcomen au début du XVII^e siècle, puis fortement améliorée par James Watt en 1769, a été à l'origine de la première Révolution industrielle, en permettant le pompage des eaux souterraines et donc l'exploitation plus en profondeur des riches gisements d'étain des Cornouailles ;
- La découverte de la stratigraphie et des séquences de déposition des formations géologiques par William Smith dans le sud de l'Angleterre, en 1801, a fourni un guide de prospection jusqu'alors inexistant, qui a permis de trouver des gisements de charbon en profondeur, un élément clé de l'industrialisation de l'Angleterre ;
- La naissance de la métallurgie moderne de l'acier (sidérurgie), avec l'invention du convertisseur Bessemer, en 1857. Avant cette date, l'acier était très rare et presque aussi cher que l'argent ;
- La naissance de la production industrielle d'aluminium grâce aux procédés Bayer de production d'alumine à partir de la bauxite (1898) et de production d'aluminium à partir de l'alumine, par électrolyse, au moyen du procédé Hall-Héroult (1886-1888). Avant ces dates, la production de l'aluminium à partir du procédé Sainte-Claire Deville (1859) était si coûteuse que son usage était essentiellement réservé à la production d'objets précieux, notamment par l'orfèvre Christofle ;
- La dynamite, découverte par les frères Nobel en 1866, permettant d'énormes gains d'efficacité dans le creusement de galeries et de tunnels ;
- La disponibilité massive d'énergies fossiles bon marché et l'électrification, à partir du XIX^e siècle, permettent l'avènement du machinisme moderne.

Tous les éléments étaient désormais en place pour permettre l'explosion de l'usage des métaux au cours du XX^e siècle. À son commencement, la gamme des métaux cou-

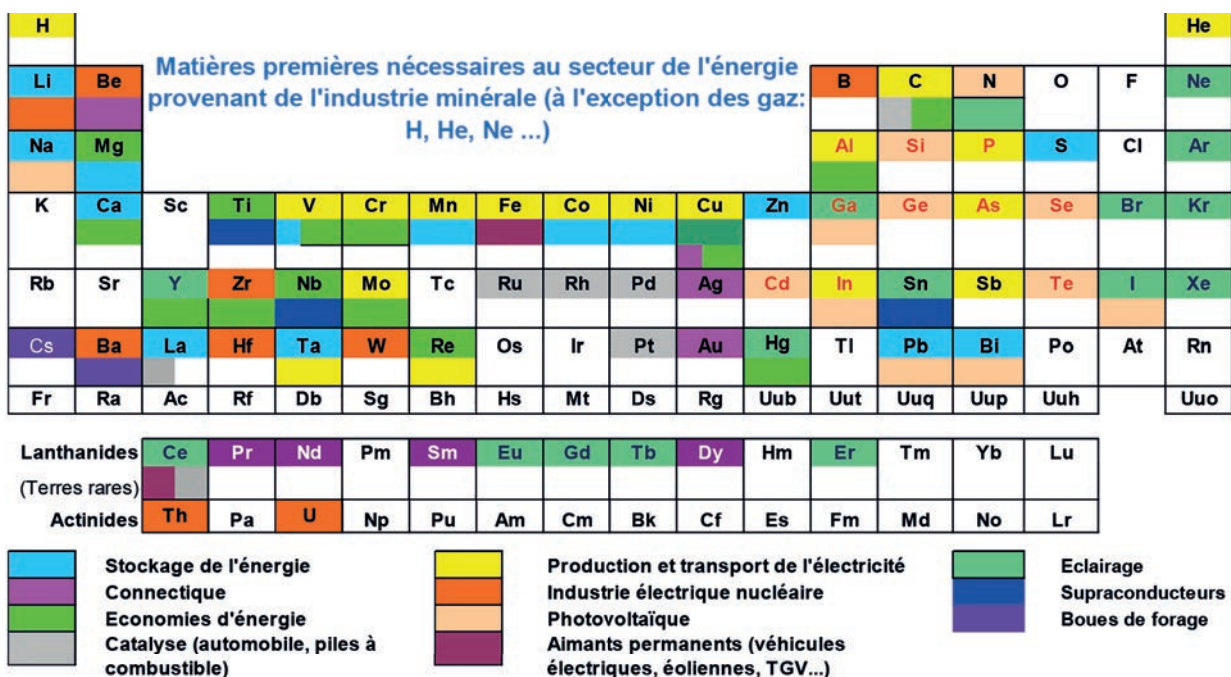


Figure 2 : Éléments nécessaires aux technologies de production et de stockage, ainsi qu'à la distribution ou aux économies d'énergie.

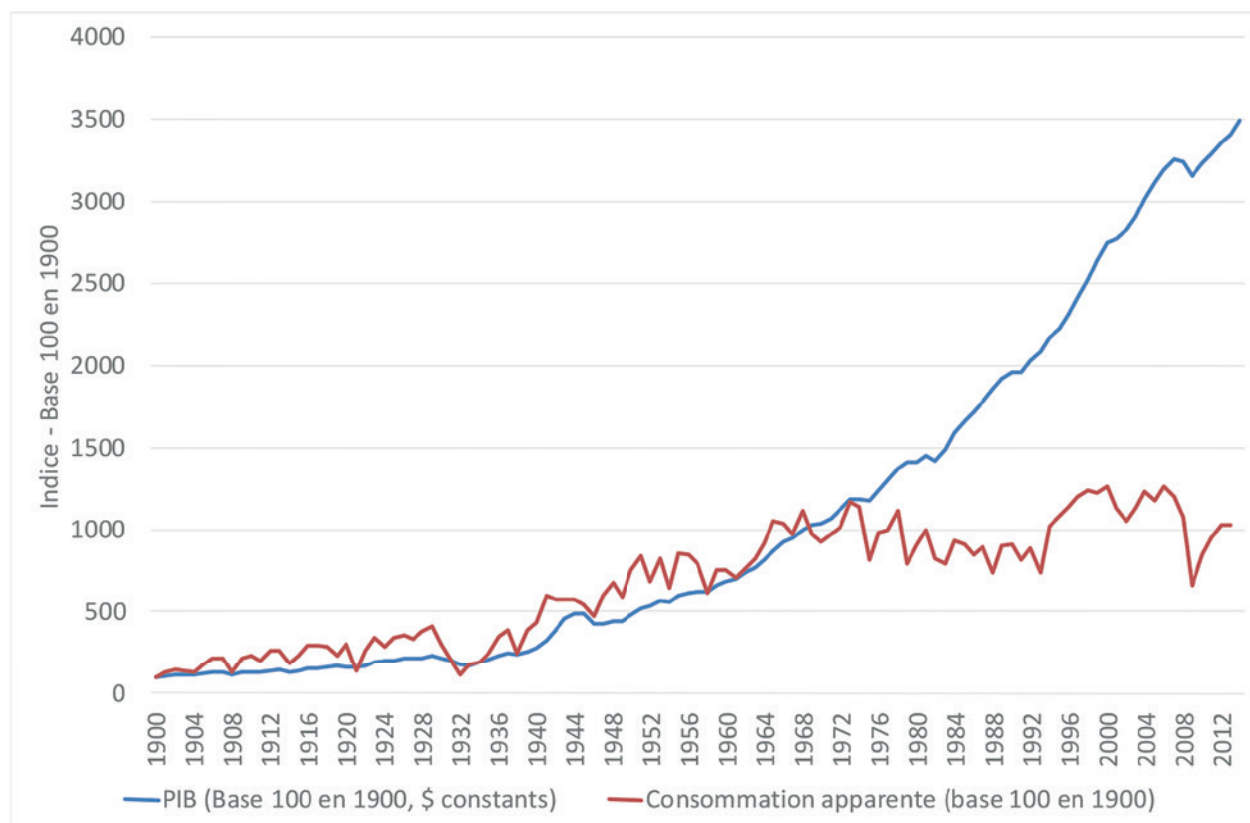


Figure 3 : Évolutions relatives du PIB et de la consommation apparente d'acier aux États-Unis - Période 1900-2013.
Source des données : USGS Data series, Bureau of Economic Analysis (GDP 1929-2013).

ramment utilisés n'avait que peu évolué depuis l'époque romaine, seuls l'aluminium et le zinc étaient venus s'ajouter à la liste des métaux d'usage courant.

Un peu plus de cent ans plus tard, la situation est très différente : aujourd'hui on dispose pratiquement de tous les éléments du tableau périodique des éléments chimiques, qui sont nécessaires au fonctionnement des technologies modernes (voir la Figure 2 de la page précédente, qui prend l'exemple du domaine de l'énergie). À cette diversification se combine une massification de la production.

Plusieurs groupes de métaux sont des marqueurs du développement économique moderne :

- Les métaux indispensables à la construction des bâtiments, des infrastructures et aux transports : ce sont essentiellement l'acier (voir la Figure 3 ci-dessus), l'aluminium, le cuivre, le plomb et le zinc (métaux d'infrastructure) ;
- Les métaux liés à la production, au stockage, à la distribution ou aux économies d'énergie (voir la Figure 2 de la page précédente) ;
- Les métaux nécessaires aux technologies de l'information et de la communication (TIC) : pas moins de soixante éléments chimiques sont utilisés dans la production des ordinateurs, des tablettes et autres *smartphones*.

La production et la consommation des métaux d'infrastructure croissent rapidement tout particulièrement en début de cycle de développement économique. La croissance de la consommation apparente d'acier est alors corrélée à la croissance du PIB, comme le montre

l'exemple des États-Unis (voir la Figure 3 ci-dessus), pendant la période 1900-1972, qui se caractérise par le poids du développement urbain et des infrastructures, ainsi que par l'essor de son industrie productrice de biens, avec au premier rang l'automobile. Après 1972, la croissance du PIB continue mais de manière découplée par rapport à la consommation apparente d'acier, qui, elle, cesse de croître. La croissance du PIB au cours de cette seconde phase est largement sous-tendue par le développement des services et de produits de haute technologie à forte valeur ajoutée. L'économie chinoise se situe actuellement au point de transition entre ces deux stades majeurs du développement économique.

Les deux autres segments (les métaux pour des applications dans le domaine de l'énergie et les métaux destinés aux TIC) se sont rapidement développés au cours des quarante dernières années sous l'effet d'innovations technologiques de plus en plus rapides. Ils font appel à de nombreux métaux rares, dont beaucoup n'étaient auparavant connus que des seuls physiciens et chimistes. Quelques exemples de ces métaux rares et de leurs usages sont indiqués ci-après :

- l'euporium et le terbium, deux terres rares très rares servent à la génération des couleurs de nos écrans lumineux (postes de télévision, tablettes, *smartphones*), mais aussi, avec l'holmium, à la protection des billets de banque contre la contrefaçon ;
- l'indium et l'étain sont utilisés dans les conducteurs électriques transparents des écrans plats ;
- le néodyme, le fer et le bore pour la fabrication des ai-

mants permanents présents dans de très nombreuses applications (automobile, aéronautique, défense, éoliennes à entraînement direct, disques durs, *smartphones*) ;

- des métaux réfractaires (niobium, molybdène, rhénium, tantale, tungstène) entrent dans la composition des superalliages indispensables à la fabrication des réacteurs performants des avions modernes ;
- argent, bismuth, arsenic, cuivre, fer, gallium, germanium, or, plomb, silicium, sélénium, tantale, tellure, palladium, yttrium et zirconium nécessaires (notamment) à la production des cartes mères de nos *smartphones*, de nos ordinateurs et de nos tablettes. Ainsi les cinq milliards de *smartphones* construits à ce jour à travers le monde représentent-ils un stock représentant 36 % de la production mondiale annuelle de palladium, et 6 % de celles d'argent et d'or. Le gallium est aussi essentiel à la production des diodes électroluminescentes dont l'utilisation pour l'éclairage croît très rapidement, car elles permettent un gain énergétique d'au moins 75 % par rapport aux ampoules à filament de tungstène, tout en durant, en moyenne, 25 fois plus longtemps ;
- le lithium et le cobalt sont utilisés pour fabriquer les batteries au lithium qui sont omniprésentes dans les appareils électriques et électroniques mobiles, ce marché connaissant actuellement une croissance de l'ordre de 20 % par an ;
- argent, arsenic, bismuth, cadmium, cuivre, iode, indium, gallium, sélénium, silicium et tellure sont utilisés par les

diverses technologies de panneaux solaires photovoltaïques ;

- le béryllium pur présent dans les gyroscopes et les sondes anémométriques des avions, dans les télescopes spatiaux (Hubble, James Webb), dans les haut-parleurs des chaînes audio de haut de gamme ou encore dans les appareillages de rayons X et, sous la forme d'alliages cuivre-béryllium, dans de nombreuses pièces soumises à des frottements intenses (rotules de trains d'atterrissage, charnières des portes d'avion...).

Ce ne sont là que quelques exemples. Nos sociétés modernes ont développé une dépendance absolue vis-à-vis de métaux parfois extrêmement rares, l'exemple extrême étant le rhénium, dont la production mondiale, en 2015, n'a été que de 46 tonnes (selon l'USGS [9]). Sans lui nos avions de ligne seraient plus énergivores.

Le lecteur intéressé trouvera sur le portail français dédié aux matières premières minérales (<http://www.mineralinfo.fr>) des informations détaillées sur nombre des métaux rares évoqués ici.

Les défis pour l'avenir

Les applications d'innovations technologiques peuvent rapidement connaître le succès sur les marchés mondiaux. Cela se traduit par une croissance élevée de la production des métaux (voir la Figure 4), un défi pour l'industrie minière, car il faut trouver et mettre en production

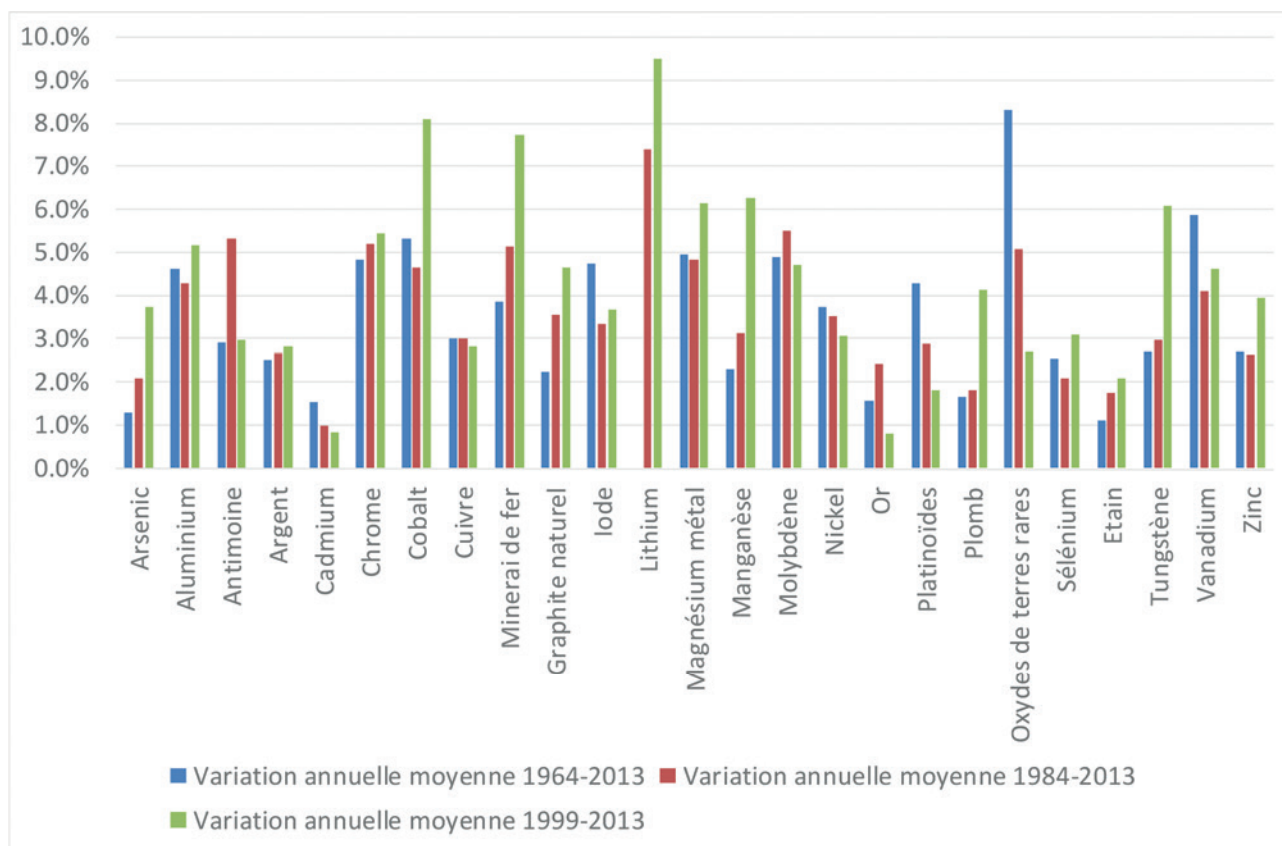


Figure 4 : Évolution au cours de trois périodes (1964-2013 : 50 ans, 1984-2013 : 30 ans, et 1999-2013 : 15 ans) de la production annuelle moyenne d'une sélection de matières premières minérales.

Source des données : USGS Data Series 140 et World Mining Data - Photo © P. Christmann, BRGM.

de plus en plus de gisements. Cela nécessite des investissements importants tant en recherche minière (20 milliards de dollars en 2012, un record historique) que pour la mise en exploitation de nouveaux gisements (un investissement qui a été de 250 milliards de dollars en 2012 [10]). Depuis 1900, l'augmentation de la production de métaux a été massive, elle est sans précédent historique : la production d'acier a été multipliée par 57, celle d'aluminium par environ 7 000, celle de cuivre par 36 et celle de phosphates par 70.

Une telle envolée de la production n'a été possible que grâce à la disponibilité d'énergies fossiles bon marché. La production de métaux et de ciment consomme actuellement environ 10 % de l'énergie produite mondialement, la production de l'aluminium, de l'acier et du ciment représentant environ 90 % de ce total.

La croissance de la production mondiale (et donc de la demande, aux effets de stocks près) est souvent rapide (> 2 %/an), ce qui à terme peut poser nombre de problèmes. Si la disponibilité géologique ne paraît pas devoir être un problème compte tenu du très important stock de gisements encore inconnus disponibles dans les trois premiers kilomètres superficiels de la croûte terrestre - l'espace souterrain exploitable avec les technologies actuelles (voir, par exemple, les travaux de Kesler relatifs au cuivre [11]) ; de nombreux obstacles existent qui pourraient à l'avenir restreindre l'accès aux matières premières minérales. Un problème majeur est l'acceptabilité sociétale de l'industrie minière : une acceptabilité qui est très faible dans les pays développés densément peuplés, où le voisinage d'une mine ou d'une fonderie est considéré comme source de nuisances. Elle est décroissante dans les pays en développement, où là ce sont des conflits d'usage des terres qui freinent les projets miniers.

Ce développement rapide de la consommation de minerais pose aussi d'importantes questions en matière de disponibilité de l'énergie et des impacts liés à sa production, en raison de la part qu'y représentent les énergies carbonées fossiles. Or, la transition vers la production de sources d'énergie dé-carbonées accélèrera encore la demande mondiale en métaux, comme le montrent les travaux du Plan stratégique européen pour les technologies énergétiques [12] et, en France, ceux de l'Alliance nationale pour la coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE) [13].

Il peut aussi avoir un impact important sur la quantité et la qualité d'eau disponible pour d'autres usages humains, ainsi que sur les terres arables. Il est source de rejets dans l'air et les eaux et de déchets (résidus miniers, résidus de traitement des minerais, de la métallurgie) potentiellement polluants. Ces résidus, qui peuvent représenter des centaines de millions de tonnes, peuvent être une source importante de pollutions chroniques, pendant des siècles (voire des millénaires). La dépollution et la mise en sécurité d'anciens sites miniers peuvent, dans certains cas, faire peser des risques importants sur les comptes publics. Ainsi, un récent rapport du Bureau de la vérificatrice générale de la province de l'Ontario [14], l'une des prin-

cipales provinces minières du Canada, estime à environ 1 milliard de dollars américains le coût de la réhabilitation environnementale des principaux sites miniers polluants de cette province (un coût non couvert par des provisions adéquates et donc potentiellement à la charge du contribuable ontarien).

Le développement de la RSE, de la transparence et de la gouvernance de l'industrie minière, l'intégration dans le coût des matières premières minérales d'externalités jusqu'ici laissées à la charge des États (et donc du contribuable), ainsi que celui de la circularisation de l'économie sont des enjeux majeurs pour l'avenir non seulement de l'industrie minière, mais aussi de l'humanité, comme le montre un récent ouvrage du Conseil général de l'économie au titre révélateur « L'économie circulaire ou la compétition pour les ressources » [15].

Dans ce contexte, le rôle de la Chine, actuellement le premier producteur mondial de près de quarante matières premières minérales, sera déterminant. Aujourd'hui, la gestion des entreprises de ce pays est des plus opaques, celles-ci n'adhérant que très marginalement (ou pas du tout) aux initiatives internationales de développement de la transparence et de la RSE, telles que la *Global Reporting Initiative*. Cet organisme non gouvernemental promeut la publication de rapports RSE à l'aide de lignes directrices validées par un vaste groupe d'acteurs, dont le Programme des Nations unies pour l'environnement. Sur les 163 entreprises minières et/ou métallurgiques qui ont publié, au titre de l'année 2013, un rapport RSE conforme aux lignes directrices de la GRI, une seule était contrôlée par un groupe minier et métallurgique chinois.

Depuis l'aube de l'humanité, minerais et métaux sont des ressources stratégiques pour le développement humain. Leur contrôle est un élément important des politiques industrielles, une expression qui semble pourtant frappée d'obsolescence dans de nombreux pays développés d'Europe ou aux États-Unis, lesquels y voient peut être une lointaine réminiscence des pratiques planificatrices de l'ex-URSS. Un point de vue qui ne paraît pas être partagé par les dirigeants de divers pays asiatiques, parmi lesquels la Chine, la Corée et le Japon, trois des pays au cœur de l'émergence de l'Asie de l'Est en tant que nouvelle superpuissance économique mondiale (même si les rivalités territoriales non résolues en Mer de Chine pourraient en marquer les limites). Ces pays accordent une grande importance à la sécurité de leurs approvisionnements considérés comme stratégiques pour leurs filières industrielles qui en dépendent.

Les minerais et métaux étant essentiels au développement humain au même titre que les autres ressources naturelles, le XXI^e siècle se trouve confronté au problème majeur posé par les limites physiques de l'écosystème terrestre et de sa résilience face aux pressions résultant d'une population mondiale qui pourrait atteindre le chiffre de 11 milliards d'individus d'ici à la fin de ce siècle, avec des modes de vie de plus en plus intensifs en ressources mondiales. Le défi majeur de ce siècle est de concilier développement (au sens large) et développement durable.

Le succès de cette transition nécessite une réforme de nos sociétés et de nos modes de pensée qui soit aussi importante que celle introduite par la découverte de l'argent dans le massif grec du Laurion, six siècles avant notre ère.

Bibliographie

[1] SEMAW (S.), ROGERS (M.J.), QUADE (J.), RENNE (P.R.), BUTLER (R.F.), DOMINGUEZ-RODRIGO (M.), STOUT (D.), HART (W.S.), PICKERING (T.) & SIMPSON (S.W.), *2.6-Million-year-old stone tools and associated bones from OGS-6 and OGS-7, Gona, Afar, Ethiopia* - *J Hum Evol.*, 2003.

[2] TYLECOTE (R.F.), *A history of metallurgy - 2nd edition*, Maney, for the Institute of Materials, 1992.

[3] YAHALOM-MACK (N.), LANGGUT (D.), DVIR (O.), TIROSH (O.), ELIYAHU-BEHAR (A.) & EREL (Y.), *The Earliest Lead Object in the Levant*, *PLoS ONE* 10(12): e0142948, 2015 (doi:10.1371/journal.pone.0142948).

[4] VARBERG (J.), KAUL (F.) & GRATUZE (B.), *Danish Bronze Age glass beads traced to Egypt - ScienceNordic*, 2015 - Article en ligne sur Internet, daté du 8 décembre 2014 :

<http://sciencenordic.com/danish-bronze-age-glass-beads-traced-egypt>

[5] DE CALLATAY (F.), « Réflexions quantitatives sur l'or et l'argent non monnayés à l'époque hellénistique (pompes, triomphes, réquisitions, fortunes des temples, orfèvrerie et masses métalliques disponibles) », in *Approches de l'économie hellénistique*, Entretiens d'archéologie et d'histoire 7, Saint-Bertrand-de-Comminges, DESCAT (R.) et al. (eds.), 2006.

[6] U.S. Geological Survey, *Mineral commodity summaries 2016 - U.S. Geological Survey*, 2016, 202 p., <http://sciencenordic.com/danish-bronze-age-glass-beads-traced-egypt>

[7] MADDISON (A.), *The World Economy - Development Centre Studies - Development Center of the Organisation for Economic Cooperation and Development*, 2006.

[8] Article Wikipedia (édition anglaise) : *Roman metallurgy* (https://en.wikipedia.org/wiki/Roman_metallurgy, consulté le 2 février 2016).

[9] HONG (S.), CANDELONE (J.P.), PATTERSON (C. C.) & BOUTRON (C. F.), *Greenland Ice Evidence of Hemispheric Lead Pollution Two Millennia Ago by Greek and Roman Civilizations - Science*; September 23, 1994 ; 265, 5180, pp. 1841-1843.

[10] <http://www.snl.com/>, base de données sur l'industrie minière et métallurgique mondiale (accessible que sur abonnement).

[11] KESLER (S.) & WILKINSON (B.), "Earth's copper resources estimated from tectonic diffusion of porphyry copper deposits", *Geology*, 36:255-25, 2008.

[12] MOSS (R.), TZIMAS (E.), WILLIS (P.), ARENDORF (J.), THOMPSON (P.), CHAPMAN (A.), MORLEY (N.), SIMS (E.), BRYSON (R.), PEARSON (J.), TERCERO ESPINOZA (L.), MARSCHIEDER-WEIDEMANN (F.), SOULIER (M.), LÜLLMANN (A.), SARTORIUS (C.) & OSTERTAG (K.), *Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector*, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport (Petten, Netherlands), 2013 (<http://setis.ec.europa.eu/publications/jrc-setis-reports/jrc-report-critical-metals-energy-sector>).

[13] VIDAL (O.), AUTRET (E.), CHRISTMANN (P.), CLÉMENT (D.), PRIMARD (P.) & RIMBAULT (L.), « Ressources minérales et énergie », Rapport du groupe « Sol et sous-sol » de l'Alliance Ancre, VIDAL (O.) (coordinateur), 2015 (consultable en ligne :

http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.aspx?private_resource=1297&fn=Ancre_Rapport_2015-Ressources_minerales_et_energie_0.pdf).

[14] LYSIK (B.), rapport annuel du Bureau de la vérificatrice générale de l'Ontario (Canada), 2015, 892 p. (consultable en ligne : http://www.auditor.on.ca/fr/rapports_fr/fr15/2015AR_fr_final.pdf).

[15] VALÉRIAN (F.), CURCHOD (A.), OTT (N.) & PERTHAIN (C.), *L'économie circulaire ou la compétition pour les ressources*, ouvrage du Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies publié par la Documentation Française, 2015.