



HAL
open science

Ressources minérales, progrès technologique et croissance

Olivier Vidal

► **To cite this version:**

Olivier Vidal. Ressources minérales, progrès technologique et croissance. Temporalités : revue de sciences sociales et humaines, 2019, 10.4000/temporalites.5677 . hal-02396623

HAL Id: hal-02396623

<https://hal.science/hal-02396623>

Submitted on 6 Dec 2019

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

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

Ressources minérales, progrès technologique et croissance

Olivier Vidal



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/temporalites/5677>

ISSN : 2102-5878

Éditeur

ADR Temporalités

Référence électronique

Olivier Vidal, « Ressources minérales, progrès technologique et croissance », *Temporalités* [En ligne], 28 | 2018, mis en ligne le 03 avril 2019, consulté le 09 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/temporalites/5677>

Ce document a été généré automatiquement le 9 avril 2019.



Les contenus de *Temporalités* sont mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Ressources minérales, progrès technologique et croissance

Olivier Vidal

Introduction

- 1 L'accélération de l'industrialisation et du développement économique mondial est illustrée par la croissance exponentielle de tous les indicateurs de l'activité humaine, de la prospérité et des impacts environnementaux depuis un siècle (Steffen et al., 2014). La population mondiale et sa proportion urbaine, le revenu et le niveau de vie moyen, la consommation en énergie et en matières premières montrent les mêmes tendances (Fig. 1).

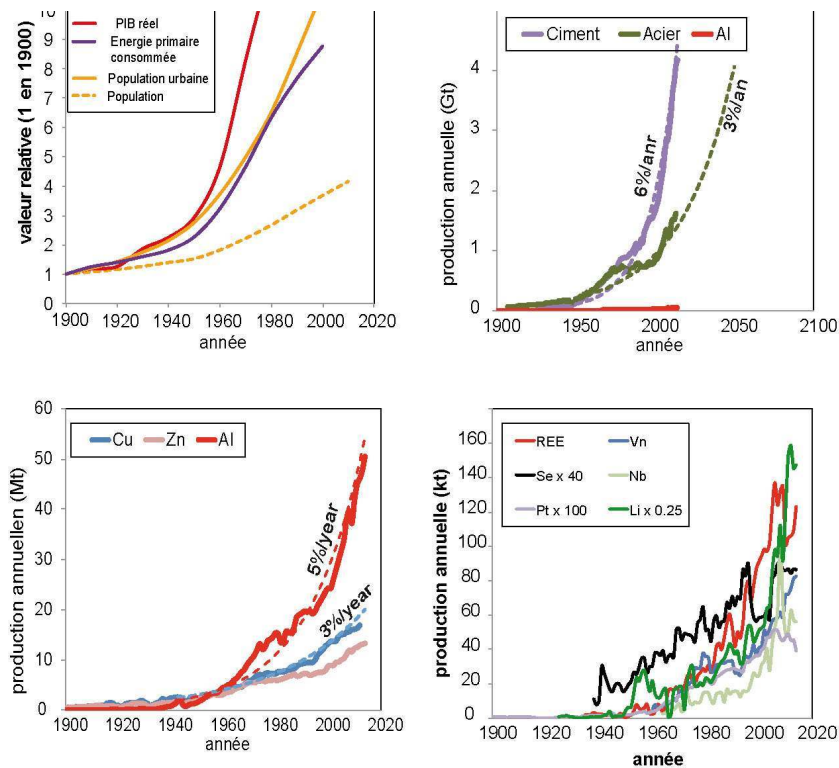


Fig. 1 : Évolution historique de différents indicateurs de prospérité et activité humaine. D'après Vidal (2017)

- 2 Parmi ces matières premières, les ressources minérales (graviers et sable, ciment, minerais, minéraux industriels) sont en première ligne, car elles sont utilisées pour construire les infrastructures urbaines et de transport, les biens de consommation, ainsi que pour la production, la distribution, le stockage et l'utilisation de l'énergie. L'humanité utilise désormais des ressources minérales à un niveau sans précédent, avec 70 milliards de tonnes de matières extraites du sous-sol par an et un niveau de consommation de ressources par habitant sans précédent (Graedel and Cao, 2010 ; Graedel, 2011, Wiedmann et al., 2015, Elshkaki et al., 2016 ; 2018). Cette grande accélération soulève naturellement la question de la durabilité de l'approvisionnement en ressources fossiles. Cette question n'est pas nouvelle et elle a été soulevée à de nombreuses reprises depuis les années cinquante (Hubbert, 1956 ; Meadows et al., 1972, Bardi, 2007 ; Bardi and Pagani, 2008 ; Bardi and Lavacchi, 2009 ; Laherrère, 2010, Kerr, 2014 ; Sverdrup and Ragnasdottir, 2014, Northey et al., 2014). Dans son fameux rapport (*The limit to growth*), le Club de Rome propose la première modélisation dynamique indiquant que la croissance éternelle est une utopie. Les résultats de modélisation montrent que l'épuisement des ressources fossiles et énergétiques au début du XXI^e siècle, conjugué à un impact environnemental croissant des activités anthropiques, engendre un effondrement des sociétés modernes au milieu du siècle. Les conclusions de ce rapport ont été largement critiquées car la variable d'ajustement « prix » n'était pas prise en compte et les réserves de ressources fossiles estimées à l'époque ne représentaient pas les réserves futures. Dans les faits, les prédictions répétées de pénurie en ressources fossiles à court terme n'ont, jusqu'à présent, pas été vérifiées par des pénuries réelles. Au contraire et malgré la croissance exponentielle de la consommation observée depuis plus d'un siècle, les réserves en métaux n'ont jamais été aussi élevées qu'aujourd'hui. L'augmentation des réserves, malgré une croissance forte de la consommation, est expliquée par les progrès de la

technologie, qui permettent de faire aujourd'hui ce qui n'était pas faisable autrefois, en particulier d'exploiter de nouvelles ressources, généralement de moins bonne qualité, à coût constant. Les hydrocarbures de roches mère, considérés comme inexploitable il y a quelques décennies, sont par exemple devenus en quelques années une source majeure d'hydrocarbures, grâce au développement de techniques « non conventionnelles ». La technologie permet aussi d'exploiter des gisements d'hydrocarbures de mauvaise qualité comme les sables bitumineux en Alabama, alors que cela n'aurait pas été rentable il y a quelques décennies. Pour les métaux, les gisements exploités aujourd'hui sont moins concentrés que ceux exploités en 1970 (Mudd, 2010). Des ressources qui n'étaient pas exploitables hier le sont donc aujourd'hui et cette tendance donne la trompeuse impression que la croissance perpétuelle est possible. Trompeuse car par essence, une croissance éternelle de notre consommation de ressources n'est pas possible dans un monde fini, la Terre. Pourtant, cette idée reste abondamment relayée par tous les dirigeants des pays riches, qui annoncent comme objectif premier de maintenir la croissance économique à un taux constant, car le modèle économique de nos sociétés modernes ne peut fonctionner qu'en période de croissance. Le problème est qu'une croissance à taux constant implique une *accélération* de l'activité. Une augmentation de 3 % par an de la production de métaux implique un doublement de cette production tous les vingt ans. Dans les pays en voie de développement, l'enjeu de la croissance économique est l'accès à la nourriture et à l'eau, puis l'aspiration à augmenter son niveau de vie, protéger sa santé et bénéficier d'un système d'éducation pour ses enfants. Tout cela est acquis pour la majorité des citoyens dans les pays riches. Pourtant, la croissance à taux constant y est aussi et encore espérée. Ce schéma de pensée, hérité de l'époque révolue de la révolution industrielle puis des Trente Glorieuses, semble oublier un point essentiel : ce qui a été possible dans le passé ne le sera pas forcément dans le futur. Il reste néanmoins certain que la croissance économique dépend de l'accès à l'énergie et aux ressources de tous types. Une éventuelle pénurie se traduirait par un effondrement rapide de nos sociétés modernes comme cela est prédit par le Club de Rome, même si les hypothèses simplificatrices faites à l'époque n'étaient pas forcément réalistes. Pour autant, chaque ressource possède sa propre temporalité contrainte par l'évolution de la demande et de la capacité de production. Toutes deux dépendent de nombreux paramètres, dont le développement technologique qui change les usages, les modes de production et d'éventuelle substitution, l'alternance des cycles économiques et géopolitiques, la variation de population et de son niveau de vie, l'évolution des réserves et des ressources géologiques, des capacités de recyclage, les temps administratifs et l'évolution de la réglementation, les impacts environnementaux, etc. Tous ces paramètres qui définissent les conditions d'une production économiquement viable de la ressource varient au cours du temps. Ils sont fortement couplés et ne peuvent pas être analysés séparément. C'est la raison pour laquelle il n'existe pas de réponse simple et définitive à la question du futur des ressources minérales.

- 3 Ces différents points sont discutés avec une brève revue des besoins et de certains aspects de la modélisation de la production future de métaux. Notre objectif n'est pas de fournir une réponse définitive aux questions très complexes soulevées par la consommation et l'approvisionnement en ressources minérales, mais plutôt d'identifier certains des points clés qu'il semble important à prendre en compte.

Les tendances à court terme de la consommation des ressources minérales

- 4 La première étape de l'industrialisation de tous les pays se caractérise par la construction d'infrastructures dans les secteurs de l'industrie lourde, du logement, des transports et des communications, ainsi que dans les secteurs de la production, du transport et de l'utilisation de l'énergie. Cette phase de développement consomme principalement des matières premières « structurelles » produites en quantités mondiales supérieures à un million de tonnes par an, telles que le sable et les granulats (50 000 millions de tonnes par an [Mt/an]), le béton (4 600 Mt/an), l'acier et le fer (1 600 Mt/an), l'aluminium (45 Mt/an), le cuivre (20 Mt/an), le manganèse, le zinc, le chrome, le plomb, le titane et le nickel. Après une période de forte croissance, la consommation annuelle de matières premières structurelles se stabilise (Bleischwitz et Nechifor, 2016) lorsque le produit intérieur brut (PIB) par habitant atteint 15 000 à 20 000 US\$ par habitant. De nombreux pays peuplés comme la Chine, l'Indonésie, l'Inde, le Pakistan et de nombreux pays africains ont actuellement un PIB/habitant inférieur à 15 000 US\$. Leur industrialisation sera inévitablement associée à une forte augmentation de la consommation de matières premières, comme cela a été le cas depuis la fin des années 90 avec l'industrialisation et l'émergence économique rapide de la Chine. Cette émergence a grandement stimulé le taux de croissance de la consommation mondiale d'acier et de béton (6 % an), Al (5 % an), Cu (3 % an), (Fig. 1b et c), Cr (5 % an), Mn (6 % an), Ni (5 % an) ou Zn (4 % an). Le stock de fer et d'acier dans les sociétés développées est estimé à environ 10 t/habitant (Wiedmann et al., 2015). Afin d'augmenter le stock actuel de 2,7 t/habitant pour une population de 7 milliards d'individus à un stock de 10 t/habitant pour 9 milliards d'individus en 2050, il faudrait produire 71 000 Mt de fer, soit l'équivalent de 85 % des réserves connues, d'après les chiffres de l'USGS (2017).
- 5 Après la construction de son infrastructure de base, l'économie des pays évolue vers des technologies de pointe, qui nécessitent d'autres matières premières. Au XIXe siècle, la consommation de métal se limitait principalement à Fe, Cu, Pb, Sn, Ag et Au, qui présentaient les propriétés physiques et chimiques de base souhaitées. Jusqu'au milieu du XXe siècle, une vingtaine de métaux était exploitée. Aujourd'hui, les technologies de pointe utilisent de nombreuses propriétés résultant de la structure électronique, des propriétés catalytiques, quantiques ou semi-conductrices spécifiques à une soixante de métaux différents, soit presque l'intégralité des éléments du tableau périodique. Des évolutions rapides d'usage des métaux se dessinent dans le secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC). Alors que la croissance de la consommation en volume depuis 1990 a progressé globalement de 1,9 % par an, celle des TIC a été de 13,2 % par an. En 2017, environ 5 milliards de téléphones portables (Statista ; 2015 IC Market Drivers Report) et 2 milliards d'ordinateurs (1 milliard en 2008) étaient utilisés, Facebook recensait plus d'un milliard d'utilisateurs et le trafic mondial des centres de données était estimé à 4,8 zettaoctets, soit plus de 26 000 siècles de vidéo en *streaming*. Ce secteur des TIC est grand consommateur de substances rares et de grande pureté (Cu, In, Ga, Ge, Ta, Nb, Au, Ag, terres rares, etc.) avec des usages dispersifs résultant de la grande dilution dans de nombreux appareils à durée de vie très courte, ce qui limite le potentiel de recyclage (de l'ordre du pourcent) et engendre des impacts environnementaux potentiellement très forts. La croissance annuelle de production des métaux rares atteint

aujourd'hui des niveaux records d'environ 10 % par an pour Sb, Be, Co, Ga, Ge, Li, Mo et certaines terres rares (Fig. 1d). Ces énormes taux de croissance et les éventuels problèmes d'approvisionnement ont attiré l'attention au cours de la dernière décennie. Cependant, l'évaluation de l'avenir des métaux utilisés dans les hautes technologies est extrêmement difficile à prédire, car leur demande dépend d'innovations techniques rapides. Par exemple, en 2012, Hitachi communiquait sur la fabrication de moteurs synchrones à aimants permanents dépourvus de terres rares. Les moteurs à réluctance utilisant des électro-aimants au lieu d'aimants permanents sont également une option. Si l'approvisionnement en terres rares devenait un problème, l'innovation technologique devrait permettre une réduction de l'utilisation. Cela est vrai pour la majeure partie des éléments utilisés dans les hautes technologies, mais pas pour les métaux « structuraux » tels que l'acier, le cuivre ou l'aluminium, qui ne sont pas substituables et pour lesquels la réduction d'utilisation est difficile pour la plupart des applications.

- 6 Jusqu'à présent, le développement industriel a été possible grâce à l'accès à une énergie fossile bon marché et abondante. Cette situation est susceptible de changer car les émissions massives de dioxyde de carbone et d'autres composants liés à la combustion ont des conséquences environnementales inquiétantes. Les accords de Paris de la COP 21, qui envisagent d'atteindre la « neutralité carbone » dans la deuxième moitié du XXI^e siècle, impliquent une réduction massive des émissions de dioxyde de carbone et une révision en profondeur du système énergétique existant basé sur les énergies fossiles. Malheureusement, il semble que les infrastructures de génération d'énergie à partir de sources solaires et éoliennes nécessitent plus de matières premières par puissance installée et énergie fournie que les installations utilisant des combustibles fossiles (Kleijn et al., 2011 ; Hertwich et al., 2015 ; Vidal et al., 2013 ; Garcia-Olivares et al., 2012 ; Vidal et al., 2017, 2018). Par conséquent, de grandes quantités de ressources minérales structurelles et de métaux de haute technologie seront consommées pour la transition énergétique. Garcia-Olivares et al. (2012) ont estimé qu'un transfert complet vers les énergies renouvelables produisant de l'électricité comme seule source d'énergie utilisée pourrait nécessiter jusqu'à 330 Mt de Cu (20 ans de production mondiale actuelle), 8 Mt Li (160 ans), 66 Mt Ni (40 ans) et 31 Mt Pt (19 ans). L'approvisionnement de si grandes quantités de métaux tout en préservant l'offre pour les autres besoins semble difficilement réalisable d'ici 2050.
- 7 Au total, les stocks totaux de tous les métaux devant être produits d'ici 2050 et les flux de métaux en 2050 pourraient atteindre 5 à 10 fois les niveaux actuels (Graedel, 2011 ; Graedel et Cao, 2010). Cela signifie que la quantité cumulée de métaux à produire au cours des trente-cinq prochaines années dépasserait la quantité cumulée produite depuis l'antiquité jusqu'à aujourd'hui. Ces chiffres, qui donnent le tournis, sont la réalité de la formule « croissance à taux constant ». Pour un taux de croissance constant de 5 % par an, la quantité double tous les douze ans. S'il a été possible de doubler la production d'aluminium depuis 2000, sera-t-il possible de la quadrupler dans les quarante ans à venir ? Au-delà de l'aspect comptable, il existe naturellement d'autres enjeux comme les impacts environnementaux et sociaux d'une croissance exponentielle, ainsi que de la demande énergétique. Ce dernier point est discuté dans la section suivante

La future production peut-elle satisfaire la demande ?

- 8 Plusieurs études suggèrent que l'offre future de matières premières ne pourra pas suivre la demande, car la quantité de ressources fossiles exploitables diminue avec le temps et que la production de plusieurs métaux a déjà atteint son maximum ou atteindra son maximum dans un avenir proche (Hubbert, 1956 ; Meadows et al., 1972, Bardi et Lavacci, 2007 ; Laherrère, 2010, Kerr, 2014 ; Sverdrup et al., 2013 ; Sverdrup et Ragnasdottir, 2014, Northey et al., 2014). Ces travaux font l'hypothèse que la demande et la production augmentent à un rythme exponentiel lorsque des ressources facilement accessibles peuvent être extraites, puis que la production s'effondre lorsque le stock de ressources ultimes récupérables (RUR) est épuisé. Selon ces hypothèses, la baisse du taux de croissance de la production de métaux de base entre 1970 et 2000 (Fig. 1) aurait pu être interprétée, à tort, comme un signe d'épuisement des réserves. En réalité, la stabilisation de la production après la forte croissance observée après la Seconde Guerre mondiale a résulté d'une diminution de la *demande* et non *des réserves*. Il semble donc abusif de supposer que la demande et la production futures de ressources minérales augmenteront indéfiniment à un rythme exponentiel. La théorie du pic de Hubbert (Hubbert, 1956) suppose en outre que les RUR sont finies et quantifiables. Il est vrai que le stock de ressources minérales fossiles sur Terre est limité et non renouvelable à l'échelle humaine. Cependant, les métaux et minéraux ne sont actuellement exploités qu'à partir d'une petite fraction enrichie de la croûte continentale. Si l'amélioration technologique permettait d'exploiter des fractions moins riches ou moins accessibles (plus profondes, en mer), le stock de métaux disponible pourrait être d'un ordre de grandeur supérieur aux RUR estimées aujourd'hui (Arndt et al., 2017). De tout temps, l'amélioration technologique a permis de faire croître les réserves et les ressources au même rythme que la production, et c'est là un argument fort avancé par les détracteurs de l'analyse du Club de Rome et de la théorie du pic Hubbert : au contraire de l'hypothèse de ces travaux, le stock de réserves fossiles définies pour les technologies actuelles n'est pas figé. Il a toujours évolué avec le temps, et pourquoi cela serait-il différent dans le futur ? Pour autant, il convient d'être prudent, car les tendances passées ne nous donnent pas toute l'information sur les tendances futures et ce qui a été possible pendant le XXe siècle ne le sera pas forcément pour le XXIe. Outre le caractère dynamique de la demande et des réserves, deux autres points au moins doivent être pris en compte pour appréhender l'évolution future de la production de métaux : le coût énergétique de la production et le recyclage.

Les besoins énergétiques de la production des métaux

- 9 La disponibilité des minéraux est liée à leur accessibilité, qui est elle-même étroitement liée à l'énergie nécessaire à la production. À l'heure actuelle, environ 12 % de la consommation mondiale d'énergie et environ 35 % de l'énergie consommée par l'industrie dans le monde sont utilisées pour la production de fer et d'acier, de ciment, d'aluminium et des métaux non ferreux (Agence internationale de l'énergie, <https://www.iea.org/Sankey/index.html>, 2013). La production de ressources minérales est donc très énergivore. Par ailleurs, les réserves des métaux dépendent de leurs coûts de production qui eux-mêmes dépendent de l'énergie utilisée pour cette production (Vidal et al., 2017 ; Gutowski et al., 2013). Cette énergie ainsi que le coût et le prix à long terme des

métaux varient comme une loi puissance de la dilution (inverse de la concentration) dans les minerais exploités (Phillips et Edwards, 1976 ; Johnson et al., 2007 ; Gutowski et al., 2013). L'or, le palladium ou le platine, dilués à moins de 2 g par tonne de roche dans les gisements exploités, sont beaucoup plus énergivores à extraire que le fer, l'aluminium ou le manganèse qui sont concentrés de 30 à 50 %. Une loi puissance de la dilution signifie qu'à *technologie constante*, la baisse observée de teneur au cours du temps des gisements est associée à une croissance exponentielle de l'énergie de production (Mudd, 2010 ; Norgate et Jahanshahi, 2010). Cette observation est utilisée comme un argument additionnel par les adeptes d'une pénurie proche en métaux, dont l'extraction atteindra rapidement un coût prohibitif, car la quantité d'énergie nécessaire deviendra trop importante. Là encore, les données historiques de long terme ne soutiennent pas ce point. Elles montrent même une tendance inverse : les prix corrigés de l'inflation des matières premières ont baissé depuis 1900 (Mariscal et Powell, 2014). Jusqu'à présent, l'augmentation de l'énergie de production due à la chute de la teneur des minerais a été largement compensée par l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la productivité, qui elles-mêmes sont le fruit de l'amélioration technologique. Pour l'acier, le cuivre et l'aluminium, cette amélioration a été de 1 à 2 % par an entre les années 1900 et 2000 (Yellishetty et al., 2010 ; Gutowski et al., 2013). Dans le cas du cuivre, elle a compensé l'augmentation énergétique due à la baisse de la teneur des gisements d'environ 1.5 % par an sur la même période de temps (Mudd, 2010 ; Norgate et Jahanshahi, 2010). Ces chiffres indiquent une nouvelle fois que l'amélioration technologique ne peut pas être négligée dans la modélisation du futur des ressources. Elle explique pourquoi les quantités produites de métaux et leurs réserves ont toutes deux suivi une croissance exponentielle depuis 1900 jusqu'à aujourd'hui. Cet effet de l'amélioration technologique sur les coûts de production et le prix sont observés pour toutes les ressources, fossiles ou renouvelables. Il permet de remplacer les ressources de haute qualité épuisées par des ressources de moins bonne qualité, mais plus abondantes. Cette tendance est-elle pérenne ? La réponse est clairement non. En effet, le gain en énergie pour une amélioration technologique à taux constant devient de plus en plus faible avec le temps, alors que la quantité d'énergie supplémentaire nécessaire pour extraire les métaux de gisements de moins en moins concentrés augmente. Il existe ainsi un point critique au-delà duquel le gain ne compense plus la perte, la production demandant de plus en plus d'énergie (Fig. 2).

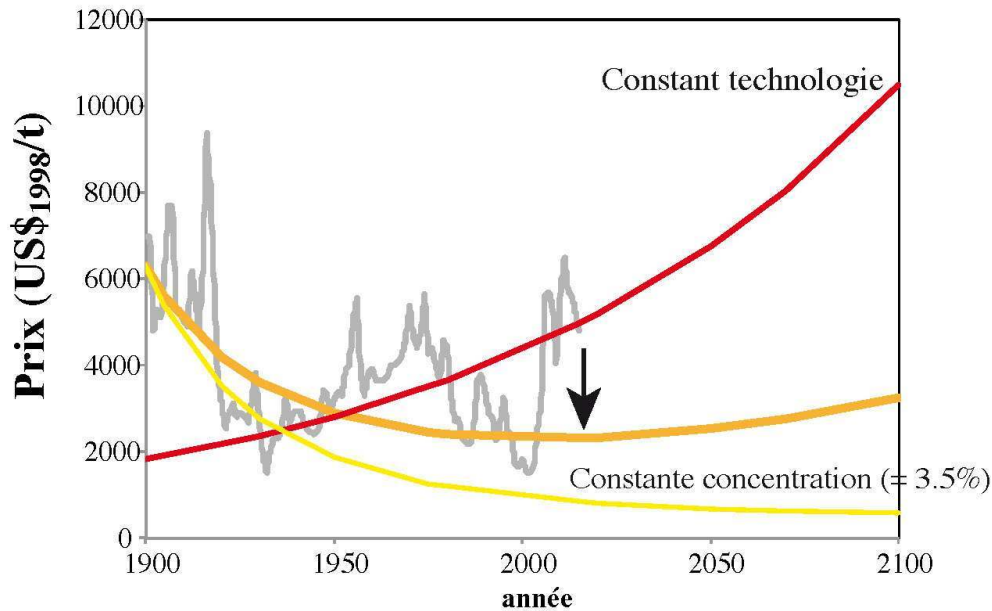


Fig. 2 : Gris : prix réel du cuivre en dollars constants ; rouge : prix calculé pour une technologie constante et une concentration en cuivre des gisements exploités diminuant à -1.125% an ; jaune : prix calculé pour l'amélioration technologique observée (1% an) à concentration constante ; orange : prix calculé pour les concentrations observées et une amélioration technologique de 1% an. La flèche verticale indique le moment où l'amélioration technologique ne compense plus la baisse de concentration des gisements exploités. Après cette date, le prix long terme augmente.

- 10 Passé ce point, une envolée des coûts de production, donc du prix, devient inévitable. Cela devrait entraîner une baisse de la demande, donc de la production. Cette baisse de production ne sera pas due à l'épuisement d'un stock fini de ressources (RUR utilisé par le Club de Rome ou les approches de Hubbert), mais au coût d'exploitation de ressources de moins en moins bonne qualité, pour un taux d'amélioration technologique comparable à celui observé depuis une cinquantaine d'années. On peut ajouter qu'il n'est pas du tout évident que le futur taux d'amélioration technologique soit comparable à celui passé : le taux diminuera nécessairement à l'approche de la limite thermodynamique de production (environ 10 MJ/kg pour l'acier et 10 kWh/kg pour l'Al). Cette limite correspond à la quantité minimale d'énergie pour briser l'oxyde de fer ou d'aluminium des roches naturelles en métal plus oxygène. La production d'acier consommait environ 50 MJ/kg dans les années 50 et elle a été divisée par deux entre les années 50 et 2000 (Yellishetty et al., 2010). Elle ne pourra très probablement pas être à diviser par deux d'ici 2050, car l'investissement nécessaire pour gagner quelques MJ quand on se rapproche de la limite thermodynamique devient prohibitif.
- 11 Cette analyse rapide nous amène à la conclusion que les grandes tendances passées, à savoir une augmentation des réserves avec le temps par amélioration technologique, ne sauraient se poursuivre indéfiniment si nous dépendons d'un stock d'énergie fini : les hydrocarbures. Si nous pouvions utiliser des sources d'énergies renouvelables à un prix raisonnable à l'avenir, la question se poserait différemment. Les énergies renouvelables sont virtuellement illimitées (au moins le rayonnement solaire) et moins polluantes. Dans ces conditions, le poids croissant de l'intensité énergétique dans le coût de production ne serait plus un problème. Cela est d'ailleurs illustré par le cas de l'aluminium, dont le raffinage se fait par réaction électrolytique. Pour diminuer les coûts de production, la transformation de minerai (bauxite) en aluminium métal se fait en utilisant l'énergie

hydroélectrique, comme traditionnellement dans les vallées alpines en France. Dans les années 2000, l'Islande est devenue un gros producteur d'aluminium à partir de bauxite importée, grâce au raffinage alimenté par énergies géothermique et hydraulique bon marché. En 2016, l'Islande a produit environ 850 000 tonnes d'aluminium, la plaçant en neuvième producteur mondial, alors qu'elle ne possède pas de minerai et que la quasi-totalité de sa production est destinée à l'étranger. Si l'utilisation de sources d'énergie renouvelables devenait assez importante pour couvrir les besoins du secteur de production des matières premières, il deviendrait envisageable d'exploiter des ressources très pauvres qui ne peuvent être exploitées actuellement. Mais il n'est pas certain que cela soit un réel progrès, car des ressources abondantes ne poussent pas à l'économie d'utilisation ni au recyclage (voir section suivante), et les problèmes environnementaux sont loin de se limiter aux seules émissions de CO₂...

Le potentiel du recyclage

- 12 La stabilisation ou le déclin de la production primaire ne signifie pas pour autant que le monde sera soudainement à court de métaux. Contrairement aux combustibles fossiles, les métaux primaires ne sont pas perdus lorsqu'ils sont utilisés et les produits métalliques fabriqués aujourd'hui constituent les réserves du recyclage de demain. L'augmentation de la part du recyclage ne suffit pas pour répondre à la demande en période de croissance, car nous ne pouvons recycler qu'une partie des biens de consommation et des équipements créés il y a plusieurs décennies, alors que la production de matières premières était inférieure aux besoins actuels. Cependant, lorsque la plupart des pays auront atteint un PIB/habitant correspondant au niveau de saturation, le recyclage des

stocks de métaux présents dans la société pourrait en théorie devenir la principale source de matières premières (Fig. 3).

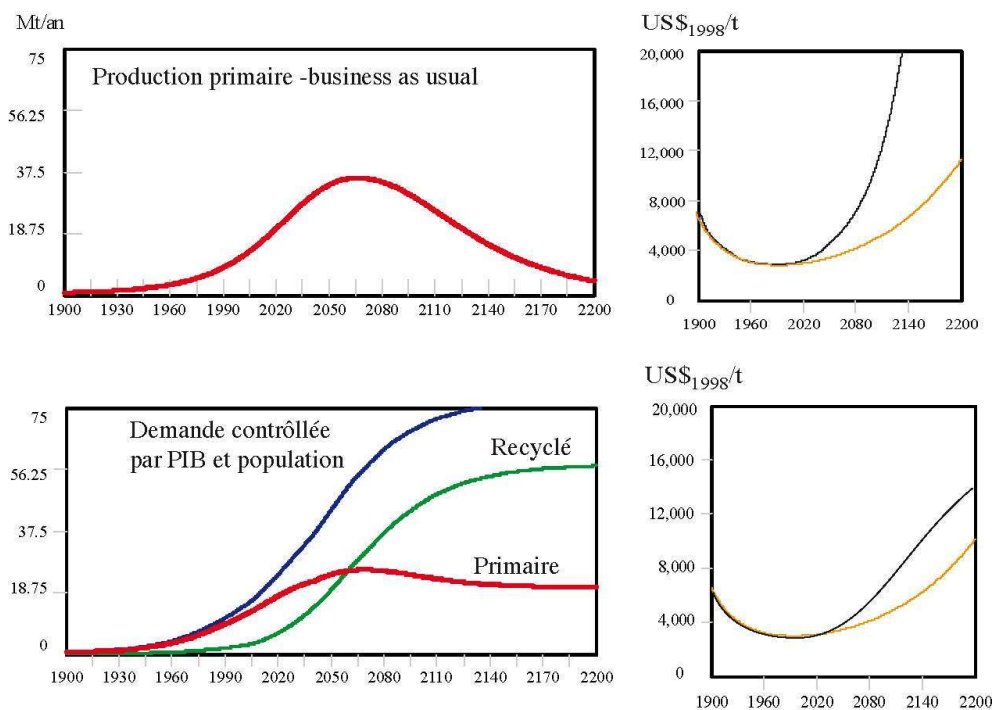


Fig. 3 : Évolution modélisée de la production primaire de cuivre (rouge) depuis 1900 jusqu'à 2100 à l'aide du modèle proie prédateur décrit dans le *supplementary information S1* de Ali et al. (2016) et Vidal (2017). La figure supérieure montre à gauche l'effondrement de la production primaire dès 2060 dans un scénario « *business-as-usual* », faisant l'hypothèse d'une croissance exponentielle de la consommation aussi longtemps que possible. Dans cette hypothèse, on observe une évolution forte du prix (entre les courbes noires et orange de la figure de droite, selon les hypothèses faites sur le prix de l'énergie). Les figures du bas montrent les évolutions modélisées du cuivre primaire et recyclé (vert) pour une demande imposée (courbe bleue) faisant l'hypothèse d'une stabilisation de la population à 11 milliards d'habitants en 2100 et du PIB moyen par habitant à $7500\text{\$}_{1998}$. Le prix maximum évolue de manière plus raisonnable.

- 13 En pratique, le potentiel de recyclage est limité par des facteurs économiques, tels que la différence entre le prix des métaux primaires et le coût de leur recyclage. Seuls les métaux présents à des concentrations suffisamment élevées dans les produits en fin de vie sont recyclés, car le coût de recyclage et les énergies de production des métaux les plus dilués restent non compétitifs par rapport à leur production primaire (Johnson et al., 2007 ; Vidal et al., 2017). Cela explique pourquoi la plupart des métaux rares utilisés dans les hautes technologies ne sont pas recyclés aujourd'hui. Il existe également des exemples de métaux de base dont le recyclage est limité par des coûts prohibitifs. Falconer (2009) a estimé par exemple que 60 à 80 % du cuivre des câbles sous-marins reliant les éoliennes offshore au continent en Grande-Bretagne ne seront pas recyclés au coût actuel du cuivre. En ce sens, une augmentation future des prix due à un éventuel épuisement des réserves primaires favorisera le recyclage, ce qui est la bonne nouvelle concernant la raréfaction des ressources minérales. Pour autant, le recyclage reste actuellement basé sur une disponibilité de flux (production annuelle de déchets) plutôt que de stock. C'est là une des différences majeures par rapport à la production primaire qui utilise des réserves (un stock). S'il existe une possibilité que le flux de déchets s'épuise, la filière de recyclage devient rapidement non viable. Un bon exemple est donné par le recyclage des terres rares à partir de lampes fluo-compactes (Solvay) qui a été arrêté suite au passage des

lampes fluo-compactes aux LED. Il existe donc un risque supplémentaire à l'investissement dans des unités de production de métal recyclé par rapport au primaire.

Discussion : le court *versus* long terme

- 14 La question du futur des ressources minérales ne peut pas reposer uniquement sur la connaissance de la disponibilité géologique actuelle pour un taux de croissance constant de la demande et de la technologie. Cette question doit être traitée à l'aide de modèles dynamiques qui intègrent toute la complexité de la chaîne de valeur, de la production primaire au recyclage, en couplant les exigences énergétiques, les dimensions géologiques, environnementales, technologiques, sociales et géopolitiques. De tels modèles sont intrinsèquement complexes (Sverdrup et Ragnasdottir, 2014), mais il est illusoire d'essayer de traiter de questions complexes avec des modèles empiriques et déterministes (du type Hubbert, 1956). Vidal et Arndt ont proposé d'utiliser une dynamique proie-prédateur (voir l'information supplémentaire S1 dans Ali et al., 2017). Ils ont montré que pour le cuivre, un pic de production primaire apparaîtra en 2050 si l'on continue à suivre les tendances historiques de production primaire (+3 % an). Il est suivi d'un rapide effondrement de la production qui devient nulle en 2200. Cette évolution est due à la dégradation de la quantité et qualité des réserves dont le coût d'extraction devient prohibitif. Elle est cohérente avec d'autres approches basées sur la disponibilité géologique et la capacité future des mines (Northey et al., 2014). Un autre scénario, non plus basé sur la production de cuivre à croissance continue mais sur la demande, en faisant l'hypothèse d'une stabilisation de la population à 11 milliards d'habitants en 2100 et du PIB moyen par habitant à 10 000 \$ est plus optimiste : le pic de cuivre primaire n'existe plus et le cuivre recyclé devient la source majeure au cours de la deuxième moitié du siècle. La baisse de la production primaire n'est plus due à une pénurie de ressource, mais à une stabilisation de la demande (Fig. 3) qui ne croît plus après 2100. Cette situation permet de maintenir la production primaire sans pénurie jusqu'en 2200. Le même modèle, appliqué à d'autres métaux, suggère que l'offre de la plupart des métaux de base et des métaux précieux (sauf l'or) devrait satisfaire la demande jusqu'à la fin du siècle. La situation est beaucoup moins claire pour les métaux rares, car les données historiques sur les réserves et la production manquent, sont imprécises ou couvrent une période trop courte pour être utilisées comme des contraintes fiables pour les modèles. C'est une des raisons pour laquelle les métaux rares utilisés dans les technologies de pointe sont considérés comme étant les plus critiques¹. Cette haute « criticité » est la vision des pays développés, dont l'activité industrielle est largement orientée vers les nouvelles technologies. L'utilisation de terres rares dans les aimants permanents, par exemple, n'est pas une nécessité pour obtenir la fonction d'aimantation, mais elle permet de réduire la taille des moteurs électriques et de les incorporer dans les voitures et les ordinateurs, ou de fabriquer des générateurs performants et demandant moins d'entretien pour les éoliennes. Pour autant, on peut remonter la vitre d'une automobile ou incliner ses sièges sans moteur et sans aimant permanent. On sait également produire des éoliennes moins performantes sans générateur à aimant permanent. En ce sens, le niveau de dépendance industrielle aux métaux de haute technologie est un choix, pas une fatalité. Un choix qui malheureusement ne prend pas en compte les dimensions éthiques, sociales et environnementales de l'extraction des ressources à l'autre bout de la planète, bien souvent dans des pays en développement dont l'infrastructure défaillante ne permet

pas d'assurer l'application de normes acceptables. La situation devient différente quand les risques liés à l'approvisionnement et/ou les prix des matières premières augmentent rapidement. Le prix du cobalt, utilisé comme cathode dans les batteries à lithium-ion, est passé de 55 000 à 83 000 \$/t entre mars 2017 et février 2018. Cette situation, résultant d'une augmentation très rapide de la consommation, a poussé tous les grands industriels concernés à trouver les solutions permettant de réduire ou de proscrire l'utilisation du cobalt dans les batteries lithium², classé comme élément critique par la commission européenne. Dans le même temps, des solutions efficaces de recyclage sont développées³. Ces évolutions technologiques sont certainement plus le fruit de contraintes économiques que de considérations éthiques et environnementales. De la même façon, le choix des matières premières utilisées dans les hautes technologies serait probablement différent si les consommateurs devaient subir l'impact de leur extraction sur leur territoire. C'est d'ailleurs pour cette raison que la principale mine de terres rares des années 80, située en Californie, a été abandonnée au profit d'importations depuis la Chine. L'Europe consomme 20 % des métaux produits dans le monde alors qu'elle en produit environ 3 %. Cette situation est pour le moins préoccupante et il faut s'attendre à ce que les pays producteurs fassent à terme payer le prix fort de cette dépendance. L'importation de nos ressources depuis des pays lointains qui était la règle hier sera de moins en moins intéressante avec le développement économique des pays producteurs pauvres. Là encore, la croissance continue nous place dans une situation instable.

- 15 Quoi qu'il en soit, envisager le futur jusqu'à la fin du siècle ne suffit pas. La discussion du devenir des ressources naturelles et de celle de l'humanité qui dépend de l'accessibilité à ces ressources doit être envisagée à plus grande échelle de temps. Il ne fait aucun doute que la croissance perpétuelle dans le monde encore clos qu'est la Terre est impossible. Elle n'est pas non plus nécessaire. Si la production de cuivre primaire continuait à croître au rythme observé depuis une centaine d'années (doublement de la production tous les vingt-cinq à trente ans), la Terre serait recouverte d'une plaque de cuivre de 1 cm d'épaisseur en 330 ans et de 1 m d'épaisseur en 490 ans ! Ces échelles de temps sont à comparer avec le temps depuis lequel le cuivre est exploité : plusieurs millénaires. Les mêmes observations sont faites pour toutes les ressources, fossiles et renouvelables. Bien sûr, la croissance future restera tirée par les pays en voie de développement, et cela est acceptable s'il s'agit de sortir des milliards de gens de la plus extrême pauvreté. La situation est différente dans les pays développés où l'urgence n'est plus la croissance, mais l'invention des conditions d'une économie viable sans croissance. Quelles sont les conditions d'un approvisionnement durable en ressources fossiles et renouvelables, et comment définir de manière rigoureuse ce que l'on entend par le terme « durable » ? Il faut pour cela donner un horizon de temps. S'agit-il d'un siècle ? Un millénaire ? Comment intégrer dans cette vision la transition vers des énergies bas carbone, dont les contraintes sont généralement analysées en seuls termes d'optimum techno-économique, en laissant de côté les contraintes d'approvisionnement en ressources depuis des pays lointains auxquels nous laissons le soin de gérer les impacts environnementaux et sanitaires ? Si l'humanité n'est pas capable de réguler sa consommation de ressources en adoptant des pratiques plus économes et en acceptant l'idée que la croissance éternelle à taux constant est une utopie, la limite de notre monde fini s'imposera d'elle-même. Elle s'imposera par atteinte d'un niveau de saturation, par manque d'énergie ou de ressources, par dégradation de notre environnement, mais elle s'imposera. À ce moment-là, les pays riches passeront de l'illusion de croissance infinie à la réalité de la stagnation

ou de la décroissance imposée, et ce passage sera sans aucun doute très douloureux s'il n'a pas été anticipé. À cette vision pragmatique s'oppose celle, futuriste, d'une hypothèque de notre avenir sur la colonisation de nouveaux mondes, comme cela fut le cas dans le passé, au cours du développement des pays riches. À terme, ces nouveaux mondes ne peuvent être qu'extraterrestres, et c'est peut-être là où les logiques d'un monde en développement technologique constant et celle d'un monde basé sur la nécessaire préservation de nos ressources peuvent s'opposer. En effet, la consommation « durable » des ressources passe par la maximisation de l'économie circulaire et de la durée de vie des produits. Une consommation raisonnée, régulée et probablement rationnée. Un tel rationnement est-il compatible avec le progrès technologique ? Le progrès technologique permet d'augmenter les rendements et d'économiser des ressources pour le même usage, mais cet effet positif est compensé par l'apparition de nouveaux usages et de gadgets, ainsi que la modification des modes de consommation. On peut citer comme exemple les écrans plats qui ont avantageusement remplacé les écrans cathodiques en termes d'intensités matière et énergie. Pourtant, les écrans plats ont envahi de nouveaux espaces où il n'existait pas d'écran cathodique auparavant (dans les voitures, sur les téléphones, à la place des panneaux publicitaires, etc.). Cette modification des usages entraîne finalement une surconsommation énergétique et de matières premières. Le même constat peut être fait pour les moyens de communication, pour les transports, ou pour les TIC. La consommation en métaux du secteur des TIC a triplé entre 1980 et 2010 (Bihouix et Gillebon, 2010). Les infrastructures numériques consomment d'énormes quantités d'énergie, qui d'après le *New York Times* correspondaient en 2012 à l'équivalent de la production de trente centrales nucléaires. Il faut environ 30 l d'eau pour produire une puce électronique de 2 g (Williams, 2002) et 64 millions de litres par an pour un centre de données de 450 m² d'une puissance de 1 000 kW (National Renewable Energy Lab, 2003). Les avancées technologiques ne permettent d'économie que si elles se restreignent à la seule substitution de l'existant, mais ce n'est jamais le cas. Comme nous l'avons déjà dit, le progrès technologique permet également de maintenir la croissance en rendant possible la consommation de ressources de mauvaise qualité au même coût, en donnant la fausse impression d'une croissance infinie possible dans un monde clos. Pour ces raisons, le progrès technologique peut être considéré comme un fléau qui abolirait les lois naturelles nécessaires au maintien d'un équilibre entre consommation et disponibilité. Dans « La magie mondialisée du Technocène », Alf Hornborg montre que la croissance économique et du progrès technologique tels que nous les connaissons aujourd'hui évacuent la question du lien entre économie et moralité, lien qui a du reste été sciemment occulté par l'école néoclassique. Il soutient que « les flux asymétriques de ressources dans le système mondial moderne sont effectivement répréhensibles sur le plan moral parce qu'ils impliquent que la croissance économique et le progrès technologique se font pour l'essentiel aux dépens de leurs partenaires commerciaux dans d'autres parties du monde, mais aussi parce que les niveaux de prospérité ne peuvent pas être atteints partout dans le monde. » (p. 104). La vision opposée est celle du progrès technologique permettant l'amélioration des conditions et de la durée de vie des humains, même si celle-ci se fait au détriment d'autres espèces animales et végétales. On peut aisément argumenter que dans les pays développés, les conditions de vie sont meilleures aujourd'hui qu'il y a quelques décennies, et bien meilleures qu'il y a quelques siècles. En ce sens, le progrès technologique qui soutient la croissance économique peut être considéré comme une bénédiction. Cette vision du progrès pourrait permettre de nous affranchir des limites

finies de la Terre dans un futur plus ou moins lointain et exploiter les ressources extraterrestres⁴ (Crawford et al., 2016 ; McLeod et Krekeler, 2017, Su, 2017 ; Łuszczek, 2018). La possibilité d’approvisionner la Terre à partir de ressources extraterrestres semble encore lointaine, pour des raisons évidentes de coût monétaire et énergétique. Mais si l’Homme y parvenait un jour, et s’il parvenait également à exporter sa pollution, les enjeux de la croissance apparaîtraient sous un jour différent. Cette vision futuriste pose néanmoins la question de la vitesse à laquelle nous détériorons notre environnement et utilisons des ressources non renouvelables par rapport à celle du progrès technologique nécessaire pour atteindre le niveau permettant de quitter la Terre...

- 16 Miser sur la croissance continue et la consommation sans restriction de ressources peut donc apparaître comme une vision utopiste et passéiste, ou éventuellement comme la clef d’un futur qui passerait par l’émancipation extraterrestre. Les enjeux environnementaux d’accès aux ressources dont l’eau, la nourriture, l’énergie et les ressources minérales sont néanmoins bien actuels. Y répondre demande des actions concrètes et globales *maintenant*. En l’absence de collaboration mondiale et dans une période de compétition entre les États, cela passe par une prise de conscience individuelle, avant de devenir collective, de ce que signifient les mots « croissance à taux constant » qui impliquent en fait une accélération de l’activité et de la consommation. Reste à comprendre pourquoi cette prise de conscience n’a pas encore eu lieu et surtout pourquoi elle n’a pas engendré de révolution politique, dans la mesure où le modèle de la croissance est remis en question depuis les années 1960, avec la proposition alternative de la recherche d’un état stationnaire, et la réflexion sur la désirabilité même d’une croissance continue. L’idée d’un état stationnaire, notamment étudiée par J. S. Mill en 1848, est elle-même ancienne, et l’illégitimité d’une croissance infinie largement argumentée, par Gorz par exemple. Aujourd’hui, la croissance des pays riches est nécessaire pour faire tourner une machine extrêmement complexe dont le moteur est hérité d’une époque révolue où tout était à construire ou reconstruire (après-guerre), alors même que ces besoins de reconstructions ne sont plus d’actualité et qu’une autre voie doit être trouvée, la croissance perpétuelle dans un monde clos étant interdite par la plus élémentaire physique. La temporalité des évolutions des paradigmes économiques, sociaux et politiques et de l’articulation entre les recherches et résultats scientifiques et l’action politique constituent un des enjeux majeurs de la prochaine décennie.

BIBLIOGRAPHIE

ALI S and 16 coauthors, 2017. “Mineral supply for sustainable development requires resource governance”, *Nature* 543, p. 367-372

ARNDT, N.T., FONTBOTÉ, L, JEFFREY, W., EDENQUIST, H., KESLER, S.E., THOMPSON, J.F.H., WODD, D.G., 2017. “Future global mineral resources”, *Geochemical perspectives*, 6, 171 pp.

BARDI U. 2007. “Energy Prices and Resource Depletion : Lessons from the Case of Whaling in the Nineteenth Century” *Energy Sources, Part B : Economics, Planning, and Policy*, volume II, Issue 3, p. 297-304

- BARDI, U. and LAVACCHI A., 2009. "A Simple interpretation of Hubbert's model of resource depletion" *Energies*, 2 (3), 646-661 ; doi : 10.3390/en20300646
- BARDI, U., LAVACCHI A., 2009. "A Simple interpretation of Hubbert's model of resource depletion" *Energies* 2 (3), p. 646-661 ; doi : 10.3390/en20300646
- BARDI U., and PAGANI M., 2008. "Peak Minerals", *The Oil Drum*, <http://www.theoil Drum.com/node/3086>,
- BLEISCHWITZ R, NECHIFOR V., 2016. "Saturation and Growth Over Time : When Demand for Minerals Peaks". *Prisme* 34. DOI : 10.13140/RG.2.2.24146.15049. [https://www.centre-cournot.org/img/pdf/prisme_fr/Prisme%20N°34%20Novembre%202016%20\(english\).pdf](https://www.centre-cournot.org/img/pdf/prisme_fr/Prisme%20N°34%20Novembre%202016%20(english).pdf)
- BIHOUIX P., DE GUILLEBON B., 2010. *Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*, EDP Sciences.
- CRAWFORD, I.A., ELVIS, M. and CARPENTER, J. 2016. "The use of Extraterrestrial Resources to Facilitate Space Science and Exploration". *Astronomy and Geophysics*. DOI : 10.1093/astrogeo/atw150
- DENG Y, CORNELISSEN S, KLAUS S., 2011. *The Energy Report : 100 % Renewable Energy by 2050* (WWF with ECOFYS and OMA, 2011)
- ELSHKAKI, A., GRAEDEL, T. E., CIACCI, L., and RECK, B.K. 2018. "Resource Demand Scenarios for the Major Metals". *Environmental Science & Technology*, 52 (5), p. 2491-2497.
- ELSHKAKI, A., GRAEDEL, T. E., CIACCI, L., and RECK, B. K., 2016. "Copper demand, supply, and associated energy use to 2050", *Global environmental change*, 39, p. 305-315.
- FALCONER I., 2009. *Metals Required for the UK's Low Carbon Energy System : The case of copper usage in wind farms*. Available online : https://www.exeter.ac.uk/media/universityofexeter/schoolofgeography/pdfs/epsdissertations/Ian_Falconer.pdf
- GARCIA-OLIVARES A, BALLABRERA-POY J, GARCIA-LADONA E, TURIEL A., 2012. "A global renewable mix with proven technologies and common materials", *Energy Policy* 41, p. 561-574
- GRAEDEL T. E., 2011. "On the Future Availability of the Energy Metals". *Annual Review of Materials Science* 41, p. 323-335
- GRAEDEL T. E., CAO J., 2010. "Metal spectra as indicators of development", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, p. 20905-20910
- GUTOWSKI T. G., SAHNI S., ALLWOOD J. M., ASHBY M. F., WORRELL E., 2013. "The energy required to produce materials : constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand". *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 371, <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0003>
- HERTWICH E. G., GIBON T., BOUMAN E. A., ARVESEN A., SUH S., HEATH G. A., BERGESEN J. D., RAMIREZ A., VEGA M. I., SHI L., 2015. "Integrated life-cycle assessment of electricity-supply scenarios confirms global environmental benefit of low-carbon technologies". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, <https://doi.org/10.1073/pnas.1312753111>
- HUBBERT M. K., 1956. "Nuclear Energy and Fossil Fuels". *Drilling and production practice* 23, p. 7-25.
- IC MARKET DRIVERS REPORT 2015. <http://www.icinsights.com/data/articles/documents/732.pdf>
- JOHNSON, J., HARPER, E. M., LIFSET R., GRAEDEL T. E., 2007. "Dining at the periodic table : metal concentrations as they relate to recycling". *Environmental Science & Technology* 41, p. 1759-1765.
- KERR R. A., 2014. "The coming copper peak", *Science* 343, p. 722-724

- KLEIJN R., VAN DER VOET E., KRAMER G. J., VAN OERS L., VAN DER GIESEN C., 2011. "Metal requirements of low-carbon power generation", *Energy* 36, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.003>
- LAHERRERE J., (posted by de Sousa, L.), 2010. "Copper peak". *The oil drum Europe*, p. 1-27. <http://europe.theoil drum.com/node/6307>
- ŁUSZCZEK, K., 2018. "Potential importance of metallic resources of ordinary chondrite parent bodies", *Mining Science*, vol. 25, p. 71-83.
- MCLEOD C.L. KREKELER, M., 2017. "Sources of extraterrestrial rare earth elements : To the moon and beyond", *Resources*, 6 (3), 40.
- MARISCAL, R and A POWELL, 2014. "Commodity Price Booms and Breaks : Detection, Magnitude and Implications for Developing Countries", *Inter-American Development Bank*, Working Paper no. 444 (January).
- MEADOWS D. H., MEADOWS D. L., RANDERS J., BEHRENS III WW, 1972. *The Limits to Growth : a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*, Universe Books
- MUDD G., 2010. "The environmental sustainability of mining in Australia : key mega-trends and looming constraints". *Resources Policy* 35, p. 98-115.
- NORGATE T., JAHANSHAH S., 2010. "Low grade ores. Smelt, leach or concentrate ?", *Minerals Engineering* 23, p. 65-73.
- NORTHEY S., MOHR S., MUDD G. M., WENG Z., GIURCO D., 2014. "Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining". *Resources, Conservation and Recycling* 83, p. 190-211.
- STATISTA, The statistical portal : <https://www.statista.com/statistics/274774/forecast-of-mobile-phone-users-worldwide/>
- STEFFEN W., BROADGATE W., DEUTSCH L., GAFFNEY O., LUDWIG C., 2014. "The Trajectory of the Anthropocene : the Great Acceleration". *The Anthropocene Review* 2, p. 81-98
- SU, J., 2017. "Legality Of Unilateral Exploitation Of Space Resources Under International Law", *International and Comparative Law Quarterly*, 66 (4), p. 991-1008.
- Sverdrup H. U., Ragnasdottir K. A., 2014. "Natural resources in a planetary perspective", *Geochemical perspectives* 3, p. 129-341.
- VIDAL O., 2018. *Matières premières et énergie, les enjeux de demain*, ISTE Editions Ltd, 245 pp.
- VIDAL O., GOFFÉ B., ARNDT N. 2013. Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience* 6, p. 894-896.
- VIDAL, O., ROSTOM, F., FRANCOIS, C. and GIRAUD, G., 2017. "Global trends in metal consumption and supply : the raw material-energy nexus", *Elements* 13 (5), p. 319-324.
- VIDAL, O., LE BOULZEC, H., FRANCOIS, C., 2018. "Modelling the material and energy cost of the transition to low-carbon energy", *EPJ Web of Conferences*, <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818900018>
- WILLIAMS, 2002. "The 1.7 Kilogram Microchip : Energy and Material Use in the Production of Semiconductor Devices", *Environmental Science & Technology*, <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es025643o>
- WIEDMANN T. O., SCHANDL H., LENZEN M., MORAN D., SUH S., WEST J., KANEMOTO K., 2015. "The material footprint of nations", *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, p. 6271-6276

NOTES

1. La criticité est proportionnelle au risque d'approvisionnement multiplié par l'importance de la substance pour un secteur industriel donné (http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_fr)
 2. <https://cleantechnica.com/2018/07/03/tesla-panasonic-investments-in-cobalt-free-batteries-not-the-only-game-in-town/>
 3. <https://www.umicore.com/en/media/press/new-power-from-old-cells-audi-and-umicore-develop-closed-loop-battery-recycling>
 4. <https://www.space.com/41707-space-mining-usgs-resource-survey.html>
<https://www.forbes.com/sites/trevornace/2018/09/04/the-usgs-begins-mapping-space-to-mine-extraterrestrial-resources/>
-

AUTEUR

OLIVIER VIDAL

Institut des Sciences de la Terre-ISTerre, University Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble, France.
olivier.vidal@univ-grenoble-alpes.fr