

Le poids des ressources minérales dans les systèmes énergétiques

Gérard Bonhomme⁽¹⁾ (gerard.bonhomme@univ-lorraine.fr), **Jacques Treiner**⁽²⁾ (jtreiner@orange.fr) et **Olivier Vidal**⁽³⁾ (olivier.vidal@univ-grenoble-alpes.fr)

(1) Institut Jean Lamour, Campus Artem, Université de Lorraine, 2 allée André Guinier, 54000 Nancy

(2) Chercheur associé au Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain, Université Paris-Cité
Président du Comité d'Experts du Shift Project

(3) Institut des Sciences de la Terre (UMR 5275 CNRS et Université Grenoble-Alpes), CS 40700, 38058 Grenoble Cedex 9

L'humanité utilise les ressources minérales à un niveau sans précédent et la demande va continuer de croître au cours des prochaines décennies, alimentée par les transitions énergétique et numérique et le développement économique des pays très peuplés. Mais la nature et les quantités de ressources minérales nécessaires sont fortement dépendantes des types d'utilisation envisagés, lesquels varient selon l'organisation et le niveau de développement des sociétés.

La demande en matières premières doit donc être estimée selon une approche dynamique et régionalisée, prenant en compte les différents scénarios de développement, notamment pour ce qui concerne le déploiement de ressources énergétiques renouvelables ou décarbonées.

Le présent article reprend en les résumant les principales analyses d'articles précédemment publiés d'Olivier Vidal et al. [1-4].

La consommation de matières premières et de ressources minérales (gravier et sable, ciment, minerais, minéraux industriels) employées pour construire les infrastructures urbaines, énergétiques, de transport et les biens de consommation des sociétés modernes a augmenté au cours du siècle dernier à un rythme moyen de 2 à 5 % par an. L'humanité utilise désormais les ressources minérales à un niveau sans précédent, avec 70 milliards de tonnes de matériaux extraits du sol chaque année. Les prédictions répétées d'épuisement à court terme des ressources fossiles n'ont jusqu'à présent pas été confirmées par

l'apparition de réelles pénuries. L'augmentation apparente des réserves, malgré la forte croissance de la consommation, s'explique par le progrès technologique qui permet d'exploiter de nouvelles ressources fossiles de moindre qualité au même coût. Comme la quantité de gisements à faible teneur est beaucoup plus importante que celle des gisements concentrés, les réserves ont augmenté avec les améliorations technologiques.

Cette tendance donne l'impression trompeuse qu'une croissance perpétuelle est possible dans un monde fini, la Terre.

Comment évaluer la demande et la disponibilité futures des ressources minérales ?

La disponibilité future des ressources minérales découle de la capacité de production, qui dépend elle-même des technologies de production, du type et de la qualité des gisements de minerai contrôlant les coûts de production, et de la proportion de produits recyclés en fin de vie. Elle dépend également de la demande, qui est elle-même liée à la population et au niveau de vie, aux cycles économiques et géopolitiques, et au développement technologique associé



© TomTooM03 (Wikimedia Commons).

Vue aérienne de la carrière de Beauvoir à Échassières (Allier), où la société Imerys projette de développer l'exploitation d'hydroxyde de lithium, en vue d'équiper des batteries de voitures électriques.

“ L’augmentation apparente des réserves, malgré la forte croissance de la consommation, s’explique par le progrès technologique qui permet d’exploiter de nouvelles ressources fossiles de moindre qualité au même cout. ”

aux transitions énergétique et numérique. Tous ces paramètres définissent les conditions d'une production économiquement viable. Ils varient dans le temps, sont couplés et ne doivent pas être analysés séparément.

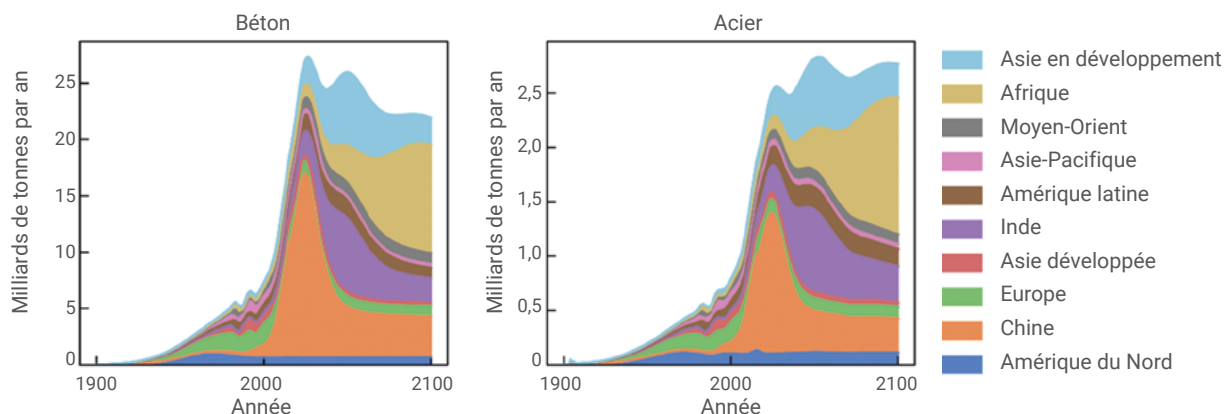
Au cours des dernières décennies, la demande de matériaux non énergétiques a été intensivement étudiée par le biais d'analyses de flux de matériaux. Ces modèles (cf. Vidal [1]) sont des outils précieux et puissants pour discuter de la question des ressources mondiales en relation avec les changements socio-économiques. Cependant, ils reposent parfois sur des hypothèses empiriques contestables, comme la dépendance linéaire de la demande totale de métaux par rapport à l'évolution du Produit intérieur brut (PIB). Cette hypothèse, fondée sur un ajustement empirique aux données historiques mondiales couvrant une période trop courte, est

en contradiction avec l'évolution récente observée dans les pays développés. En outre, elle suppose que la demande future de métal par unité de PIB sera la même que par le passé, alors que de nouvelles technologies qui n'existaient pas il y a deux décennies se développent rapidement dans les secteurs de l'énergie, des transports, de l'informatique et des communications.

L'estimation de la demande mondiale doit ainsi impérativement prendre en compte l'existence de trois phases successives dans le développement des sociétés, qui induisent des besoins différents en matériaux : (i) création des infrastructures, urbanisation et construction de bâtiments ; (ii) développement des nouvelles technologies ; (iii) transition vers une économie bas carbone.

Cette estimation nécessite une approche ascendante par technologie,

>>>



1. Évolution cumulée des consommations annuelles de béton et d'acier par zone géographique, fondée sur des lois logistiques de croissance du PIB et de la population. (Source : figure 2 de Vidal et al. [1]).

>>>

car les besoins des sociétés en matériaux et en énergie, leurs intensités d'utilisation et leurs rendements évoluent à des rythmes différents selon les époques et les lieux. Les prévisions des modèles s'appuient sur des scénarios dont les hypothèses peuvent conduire à de grandes variations en termes de quantité et de type de matériaux consommés. C'est particulièrement le cas pour la consommation des matériaux du système énergétique lui-même. En retour, l'extraction et la mise en forme des ressources minérales utilisées impactent la demande finale en énergie.

Nous aborderons dans un premier temps l'approche méthodologique de l'évolution générale de la demande en matériaux, avant de nous concentrer plus spécifiquement sur la demande associée à différents scénarios énergétiques.

Modélisation de l'évolution de la demande en ressources minérales

Dans un monde fini, il est bien sûr impossible de puiser à l'infini dans un stock de ressources limitées. Une modélisation globale de l'extraction de ressources minérales à l'aide de l'équation logistique^(a), déjà présentée dans l'analyse des ressources en combustibles fossiles (voir l'article de J. Treiner dans ce numéro, p. 9), conduit à une évolution des quantités annuelles extraites comportant au début une croissance rapide, un pic de production, suivi d'une décroissance correspondant à

l'épuisement de la ressource. Ce modèle doit évidemment être adapté pour prendre en compte les variations géographiques, et le fait que les besoins en matériaux, à la fois en quantité et en nature, évoluent au cours du développement des sociétés humaines. Empiriquement, on observe en effet une première phase de construction d'infrastructures exigeantes en matériaux bruts, pour l'industrie lourde, le logement et les transports, les communications et l'énergie. Cette phase est contrôlée par la croissance du PIB par habitant, avec un effet de saturation systématiquement observé quand celui-ci atteint environ 20 000 US\$/habitant. Dans une phase ultérieure, la demande en matériaux est contrôlée par l'évolution démographique et celle des technologies.

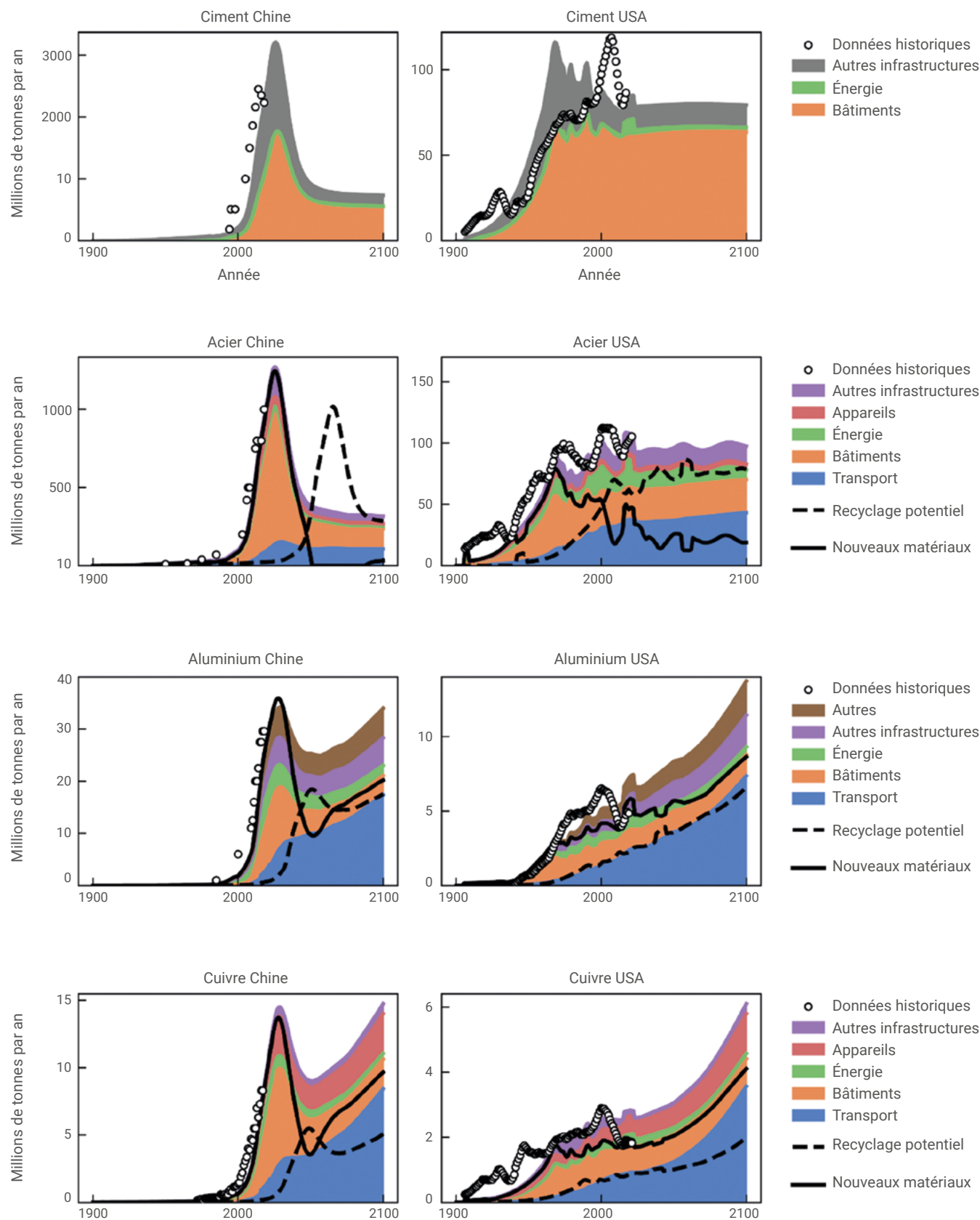
L'évolution du nombre d'unités technologiques par habitant, en fonction du PIB par habitant, suit ainsi une sigmoïde de fonction logistique dont les paramètres sont ajustés aux observations pour différents pays, ce qui permet de prédire l'évolution ultérieure. On peut ainsi réaliser une modélisation de l'évolution mondiale de la consommation annuelle de matériaux pour toutes les infrastructures (fig. 1) en additionnant d'abord pour chaque région les besoins pour chaque technologie, puis ensuite en sommant les évolutions régionales. Les consommations annuelles sont obtenues en prenant en compte les flux annuels primaires, recyclés et perdus (fig. 2). Cette approche totalement ascendante, partant des évolutions locales du PIB

et de la démographie, permet de relier la consommation mondiale de matériaux aux développements économiques, démographiques, et technologiques locaux. Il reproduit (fig. 2) les évolutions observées depuis la Seconde Guerre mondiale.

Après cette première phase de construction de leurs infrastructures de base, ou même déjà avant son achèvement, l'économie des pays évolue vers des technologies avancées. Celles-ci utilisent de nombreuses propriétés liées à la structure électronique, des propriétés catalytiques, quantiques ou semi-conductrices propres à presque tous les éléments du tableau périodique. Des changements rapides dans l'utilisation des métaux sont ainsi apparus au cours des dernières décennies dans le secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC). Alors que la consommation de métaux de base a augmenté de 2 à 5 % par an depuis 1990, la croissance annuelle de la production de certains métaux rares utilisés dans les hautes technologies est actuellement d'environ 10 % par an. Il est difficile d'évaluer la demande future de ces métaux de haute technologie, car elle dépend plus de l'innovation technologique que du PIB par habitant.

Les nouvelles technologies concernent également le secteur de l'énergie, qui évolue pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre et se conformer aux accords de Paris. Malheureusement, les infrastructures solaires et éoliennes nécessitent plus de matières premières, par capacité

>>>



2. Demande en matériaux bruts par secteur économique (en Mt/an), calculée à partir de l'évolution des infrastructures pour la Chine (panneaux de gauche) et pour les USA (panneaux de droite). Les lignes noires continues et en tirets montrent respectivement le flux primaire et le flux théoriquement recyclé. Les cercles montrent les données historiques (USGS). Pour le ciment aux USA, on note un décalage entre observations et modélisation qui provient de l'évolution du secteur du bâtiment. (Source : figure 3 de Vidal et al. [1]).

>>>

installée et énergie fournie, que les installations à base de combustibles fossiles. Les figures 1 et 2 ont été calculées en supposant que la pénétration des technologies énergétiques à faible émission de carbone restera modérée. Pour une même évolution du PIB et de la population, et donc des infrastructures de construction, de transport et d'énergie, la demande de métaux sera différente pour une plus grande pénétration des énergies renouvelables.

La figure 3 illustre les différences dans les consommations mondiales de cuivre, lithium, cobalt et nickel pour les deux scénarios énergétiques contrastés RTS ("Reference Technology Scenario") et B2DS ("Beyond 2°C Scenario") de l'IEA (2017)^(b).

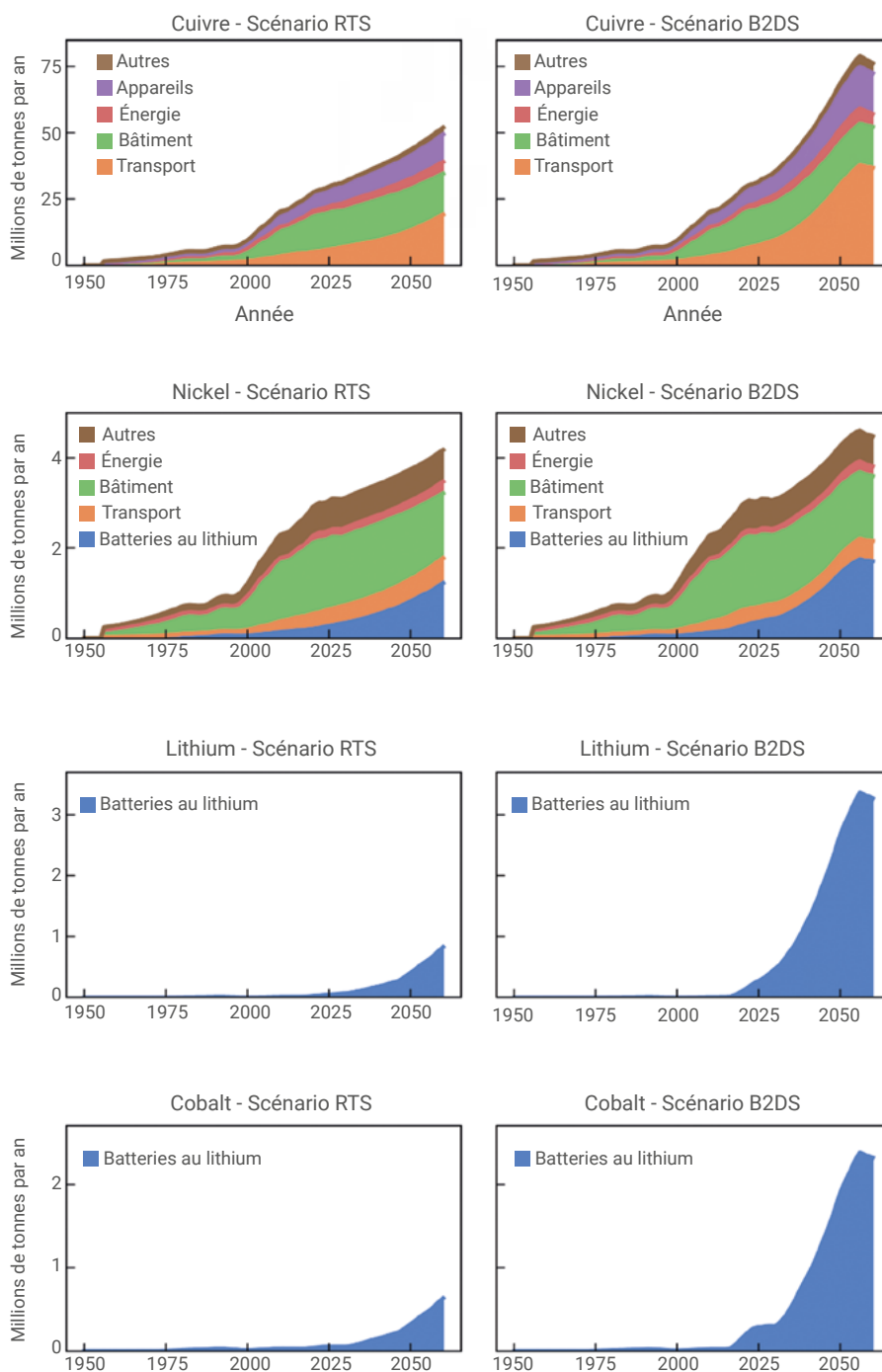
Le poids des ressources selon les scénarios énergétiques

Cet impact du secteur de l'énergie sur l'évolution de la demande mondiale en matériaux, selon les scénarios énergétiques et le taux de pénétration de renouvelables électrogènes, est crucial. L'évolution de la demande en matériaux bruts et ressources minérales requis par les systèmes énergétiques dépend de l'objectif de consommation finale, ainsi que des parts relatives des différents systèmes de conversion d'énergie envisagés.

La production d'électricité : quelle quantité de matériaux par mégawatt de capacité installée ?

La première spécificité des énergies de flux telles que le solaire et l'éolien est leur faible densité, dont la conséquence est la nécessité de grandes infrastructures déployées sur de larges étendues, ainsi que la mobilisation de grandes quantités de matériaux. La demande concerne non seulement les matériaux de base pour les infrastructures (béton, acier, aluminium et cuivre), mais également les métaux spécifiques utilisés dans la fabrication des panneaux photovoltaïques (PV) et des aimants des génératrices des éoliennes.

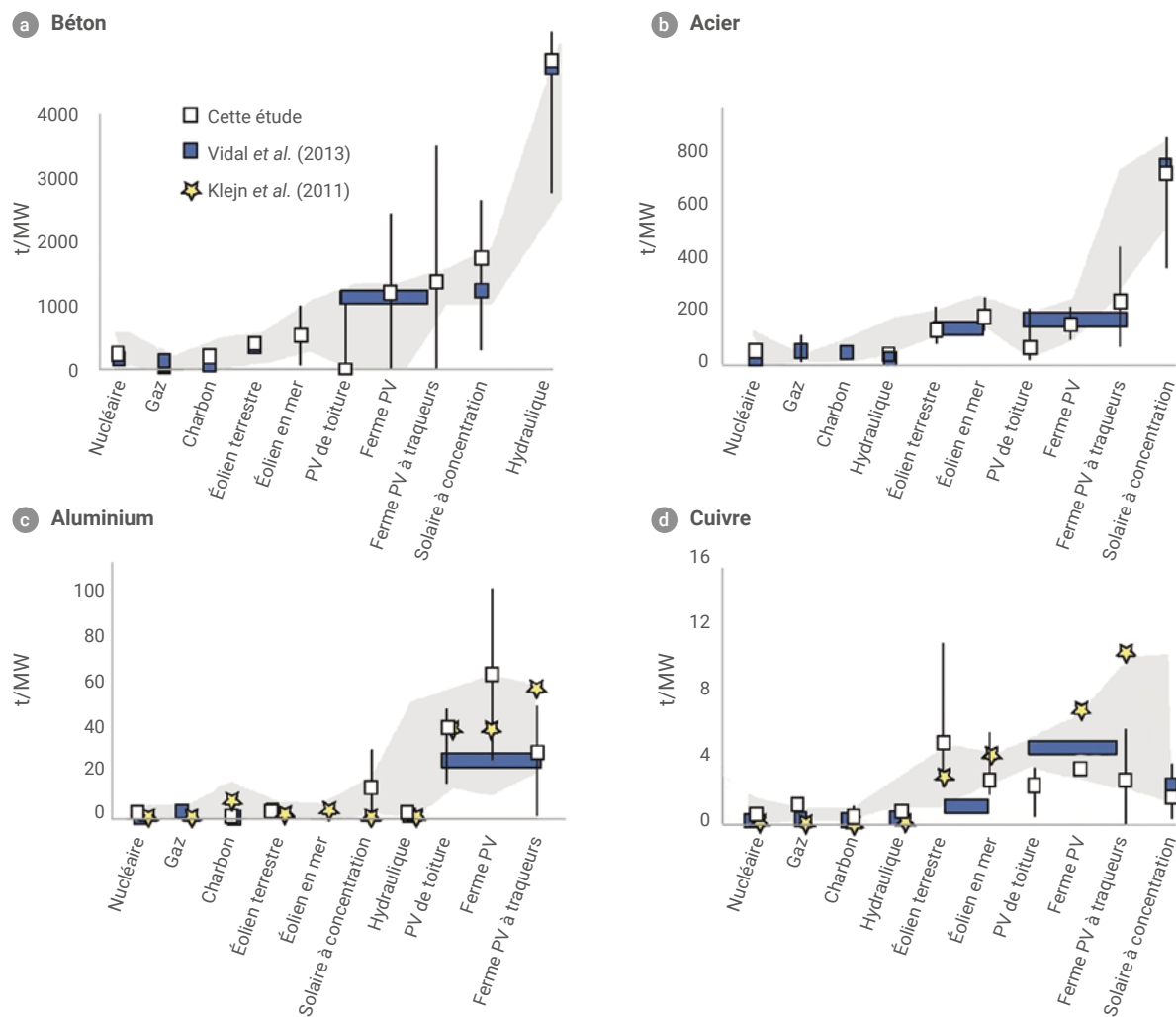
Les installations fonctionnant avec des énergies de stock (combustibles fossiles ou nucléaire) offrent une densité énergétique plus élevée. La mobilisation de matériaux de base,



3. Demande mondiale annuelle en cuivre, nickel, lithium et cobalt, calculée pour une évolution des infrastructures selon les scénarios de référence (RTS, panneau de gauche) et « en-deçà de 2°C » (B2DS, panneau de droite) de l'Agence internationale de l'énergie. (Source : figure 4 de Vidal et al. [1]). (L'oxyde de cobalt est largement utilisé dans les cathodes des batteries à base de lithium.)

ramenée en masse par unité de puissance installée, est plus faible que celle des infrastructures utilisant des énergies renouvelables. C'est ce que montre la figure 4, où sont comparées les masses requises par MW de capacité de différentes installations, allant de centrales thermiques classiques à des éoliennes et centrales photovoltaïques.

Ainsi, à puissance installée égale, les éoliennes et les panneaux photovoltaïques demandent, selon les technologies, de cinq à quinze fois plus de béton, acier, cuivre ou aluminium que les centrales thermiques classiques à flamme ou le nucléaire. Les écarts sont encore plus grands si l'on rapporte la masse de matériaux utilisés, non à la puissance installée,



4. Masse de matériau brut par mégawatt (t/MW) requise pour toute une gamme d'installations électrogènes (nucléaire, gaz, charbon, éolien terrestre, éolien en mer, solaire à concentration = CSP, hydraulique, solaire photovoltaïque (PV) de toiture, ferme PV, ferme PV à traqueurs solaire). (a) béton, (b) acier, (c) aluminium, (d) cuivre. Les barres d'erreur montrent une nette dispersion des données entre trois études, mais en moyenne les besoins en matériaux de base par MW augmentent nettement en passant des technologies basées sur les combustibles fossiles à celles utilisant les renouvelables. (Source : figure 2 de Vidal *et al.* [3]).

mais à l'énergie produite, en raison des facteurs de charge^(c) des installations. À ces besoins s'ajoutent ceux des infrastructures et des installations de stockage permettant l'intégration des sources électrogènes non pilotables dans le réseau électrique.

L'approvisionnement pourra-t-il satisfaire la demande ?

Selon les scénarios, la consommation mondiale d'énergie électrique pourrait s'élever en 2050 jusqu'à 35 000 TWh, avec une contribution du solaire PV et de l'éolien jusqu'à 25 000 TWh. Le scénario NZE-2050 de l'IEA prévoit une capacité installée mondiale de 14 500 GWc pour le

solaire photovoltaïque, c'est-à-dire de quoi produire annuellement environ 23 500 TWh d'énergie électrique : cela correspond à une multiplication par un facteur 20 de la capacité installée actuelle.

À partir des données de la figure 4, on peut faire une estimation rapide des besoins que cela induirait en ressources minérales à mobiliser : 36 milliards de tonnes de béton ; 2,9 milliards de tonnes d'acier, soit presque deux fois la consommation annuelle actuelle ; 0,29 milliards de tonnes d'aluminium, soit six fois la consommation mondiale actuelle ; 58 millions de tonnes de cuivre, soit 3,5 fois la consommation mondiale cumulée actuelle^(d).

Pour une discussion plus détaillée des besoins en ressources minérales induits par les différents types d'installations de production d'électricité, on pourra se reporter à Vidal *et al.* [2, 3].

Conclusion

Aujourd'hui, environ 12 % de la consommation d'énergie totale au niveau mondial (et 35 % de la consommation industrielle) est utilisée pour produire les matières premières. Pour la partie production primaire (hors recyclage), cette consommation d'énergie se décompose en trois contributions : (i) l'extraction et le broyage du minerai, (ii) la séparation et la concentration des phases

>>>



- 1• O. Vidal et al., "Modelling the Demand and Access of Mineral Resources in a Changing World", *Sustainability* **14** (11) (2022). <https://doi.org/10.3390/su14010011>
- 2• O. Vidal et al., "Modelling the material and energy costs of the transition to low-carbon energy", *EPJ Web of Conferences* **189** (2018) 00018. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818900018>
- 3• O. Vidal et al. "Global Trends in Metal Consumption and Supply: The Raw Material-Energy Nexus", *Elements*, **13** (2017) 319-324. DOI: 10.2138/gselements.13.5.319
- 4• O. Vidal et al. "Metals for a low-carbon society", *Nature Geoscience*, **6** (2013) 894-896. (www.nature.com/naturegeoscience).

(a) L'équation logistique $dQ/dt = aQ(1-Q/Q_{max})$ a été introduite par Verhulst en dynamique des populations. Elle modélise l'évolution temporelle du prélèvement cumulé $Q(t)$ d'une ressource dont le stock est limité à Q_{max} . Pour $a > 0$ et $Q(0) = Q_0 < Q_{max}$, la solution est $Q(t) = Q_{max} / [1 + Q_{max} / Q_0 \exp(-at)]$. C'est une courbe en S (sigmoïde), qui correspond à une croissance initiale exponentielle suivie d'une inflexion puis d'une saturation progressive vers Q_{max} . La consommation annuelle $P_A(t) = \Delta Q / \Delta t$, assimilée à la dérivée de cette courbe en S, passe donc par un maximum pour le point d'inflexion de la sigmoïde. Il correspond au célèbre « pic de Hubbert ».

(b) Ces deux scénarios RTS et B2DS forment avec le troisième scénario médian 2DS l'ensemble des trois scénarios proposés par l'IEA en 2017 pour répondre aux engagements des accords de Paris. (https://cutt.ly/iea_energy_perspectives). Le scénario RTS est le moins ambitieux, mais il tient cependant compte de tous les engagements des accords de Paris. B2DS est le plus ambitieux, en poussant au maximum tous les leviers de défossilisation possibles.

(c) On appelle facteur de charge d'une installation le rapport de l'énergie électrique produite au cours d'une année à l'énergie maximale qu'elle aurait produite sur la même durée en fonctionnant constamment à sa puissance nominale (pour le photovoltaïque on parle plutôt de puissance crête, W_c). Il est autour de 0,15 pour le solaire PV et de 0,24 pour l'éolien terrestre (mais jusqu'à 0,4 pour l'éolien en mer).

(d) Les nombres donnés ici ne doivent pas induire de confusion entre les stocks des matériaux immobilisés dans des infrastructures et leurs flux annuels. Il s'agit de fournir simplement des éléments de comparaison pour les ordres de grandeur.

(e) Voir dans ce numéro (p. 24) l'article de G. Bonhomme et J. Treiner consacré à l'EROI.

>>>

porteuses du métal et (iii) la métallurgie. L'amélioration de l'efficacité énergétique des différents procédés a jusqu'à présent permis de compenser les surcoûts entraînés par la nécessité d'exploiter des minerais à plus faible teneur, quand les gisements les plus riches sont épuisés. Cette évolution n'est pas pérenne, car il existe une limite thermodynamique qui ne peut pas être dépassée. Cette limite correspond à l'énergie minimale nécessaire pour casser un oxyde, sulfate, sulfure ou silicate contenant le métal en ses constituants élémentaires. Elle est donnée par l'énergie libre de formation du minéral à partir de ses constituants. Dans le cas du fer, cette limite est d'environ 10 MJ/kg. Il fallait 50 MJ pour produire un kilogramme d'acier en 1950, il en faut 25 aujourd'hui, et nous nous rapprochons de la limite thermodynamique. La même observation est faite pour tous les métaux, et la compensation de baisse de qualité des gisements par amélioration des technologies de production ne pourra pas se poursuivre très longtemps. Quand l'amélioration technologique ne compensera plus la baisse de qualité des gisements exploités, les coûts de production et les prix des métaux augmenteront inexorablement, à un rythme proportionnel à la consommation.

La transition vers des sources énergétiques décarbonées, comme le solaire photovoltaïque et l'éolien, va induire des besoins supplémentaires considérables en matériaux, y compris des métaux spécifiques. Pendant la période de transition énergétique, cela induira une surconsommation d'énergie pour produire les matières utilisées pour le secteur énergétique lui-même.

Pour tenir l'objectif de neutralité carbone en 2050, les scénarios de transition envisagent tous une diminution drastique de la consommation finale d'énergie. Ainsi, le scénario B2DS prévoit une réduction de la part de l'industrie dans la consommation finale de 65 % par rapport au scénario RTS. Il semble pourtant difficile d'espérer construire une nouvelle infrastructure de production, stockage et consommation d'énergie, tout en réduisant drastiquement la consommation d'énergie finale.

La transition énergétique est un enjeu mondial et tous les pays, pauvres et riches, sont concernés. Les pays riches utilisent majoritairement des ressources importées depuis des pays en développement économique (l'Europe utilise 20 % des métaux produits mondialement alors qu'elle n'en produit que 3 %). La transition énergétique des pays riches dépend donc de l'extraction de matières dans des pays plus pauvres, qui supportent ainsi tous les impacts environnementaux associés. Quand ces pays pauvres auront le niveau économique suffisant pour envisager la construction de leur infrastructure énergétique décarbonée, auront-ils accès à la ressource de qualité nécessaire, ou sera-t-elle entièrement immobilisée dans l'infrastructure bâtie plus tôt dans les pays riches ? Les pays les plus pauvres (la moitié de la population mondiale) auront besoin de disposer de ressources minérales pour construire leur propre infrastructure d'énergie, dans des zones où l'utilisation du rayonnement solaire et du vent sont souvent optimales (abondantes et d'EROI^(e) plus élevé). Pour éviter que ces pays soient *in fine* privés de leurs capacités de développement en raison d'un accès difficile aux ressources minérales, les pays riches doivent accepter d'extraire ces ressources minérales sur leur propre territoire.

En Europe, l'extraction des ressources disponibles se heurte de plus en plus à une opposition citoyenne farouche pour des raisons environnementales. Pourtant il s'agit d'une question éthique : refuser l'extraction domestique possible revient à exporter les impacts de notre consommation vers des pays où les technologies employées ne sont pas les meilleures. Ne pas faire l'autruche en acceptant de gérer ces impacts environnementaux de notre consommation permettrait de développer les meilleures technologies pour les minimiser. Une vision globale de la transition énergétique est donc nécessaire, qui va bien au-delà des questions technologiques. Cette vision doit intégrer non seulement la demande future en énergie par pays, mais également les besoins en ressources et leur provenance. ■