

Ressources minérales et systèmes énergétiques

**Olivier Vidal,
Hugo Le Boulzec**

Institut des Sciences de la Terre, CNRS,
Université de Grenoble-Alpes

La récente envolée du prix des matières premières et de l'énergie nous rappelle notre dépendance aux ressources fossiles. Cette évolution est-elle systémique ou uniquement conjoncturelle ?

Introduction

Les matières premières sont utilisées pour construire toute l'infrastructure technologique des sociétés développées, pour produire ses bâtiments, ses moyens de transport et de communication, son infrastructure industrielle et énergétique, sa nourriture et ses médicaments. Les matières premières sont donc, comme l'énergie, des ingrédients indispensables au fonctionnement de nos sociétés modernes. Les tensions d'approvisionnement dans une période de reprise économique post-COVID-19 et d'invasion russe de l'Ukraine nous rappellent cette évidence. Ces tensions se traduisent par des flambées du prix de l'énergie, mais également des métaux. Il s'agit d'une situation conjoncturelle, mais les tensions existaient avant l'épisode COVID-19, marquées par de fortes fluctuations des prix, non seulement pour des métaux spécifiquement utilisés dans les technologies avancées, mais aussi pour des métaux de base comme le cuivre, qui est essentiel dans le cadre de la transition énergétique.

Le déséquilibre conjoncturel entre la demande et l'offre et la rapide augmentation des prix est une piqure de rappel concernant notre forte dépendance aux importations de matières, l'Europe consommant 20 % des métaux produits mondialement alors qu'elle en produit moins de 3 % dans ses frontières. La France, quant à elle, ne produit aucun

métal primaire, ce qui nous placerait dans une situation de forte vulnérabilité si les difficultés d'approvisionnement devenaient systémiques. Cette éventualité n'est pas à proscrire, car les hausses de prix des métaux sont observées dès le début du siècle, au moment de l'émergence économique de la Chine qui est devenue le premier consommateur de ressources minérales. D'autres pays peuplés comme l'Inde, l'Asie du Sud-Est, une partie de l'Afrique pourraient emboîter le pas de la Chine et maintenir la croissance de la demande.

C'est dans ce contexte que se pose la question de la disponibilité des matières premières pour la transition énergétique, cette dernière impliquant une modification complète de notre infrastructure de production, stockage, transport, distribution et utilisation de l'énergie. Cette mutation qui demande beaucoup de métaux de toutes sortes, doit être analysée au niveau national mais aussi au niveau mondial, car tous les pays doivent effectuer la même mutation en même temps.

Ensuite vient la question des capacités d'approvisionnement. La disponibilité des ressources fossiles dépend 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. Au cours du dernier siècle, la consommation de ressources minérales (gravier et sable,

ciment, minerais, minéraux industriels) a augmenté à un rythme moyen de 2 à 5 % par an. Les prédictions répétées d'épuisement à court terme n'ont jusqu'à présent pas été vérifiées par des pénuries réelles. Au contraire, le stock de réserves a augmenté grâce au progrès technologique, qui permet d'exploiter de nouvelles ressources de moins bonne qualité mais plus abondantes au même coût. Cette tendance donne l'impression trompeuse qu'une croissance perpétuelle est possible dans un monde fini, la Terre. Trompeuse car comme pour toutes les activités anthropiques, l'amélioration technologique se heurte inévitablement à des limites thermodynamiques qui, une fois atteintes, ne permettent plus de gain d'efficacité. Cette situation n'a jamais été vécue dans le passé, mais elle pourrait apparaître dans un futur proche.

Evolution de la demande en ressources minérales

Evolution tendancielle

La demande d'une région en ressources minérales varie en fonction de son développement économique et démographique. Durant l'émergence économique, elle est contrainte par la création des infrastructures de l'énergie, industrielles, de transport, communication et urbaines. Cette phase correspond à une croissance rapide du PIB par habitant, et la demande en ressources minérales se

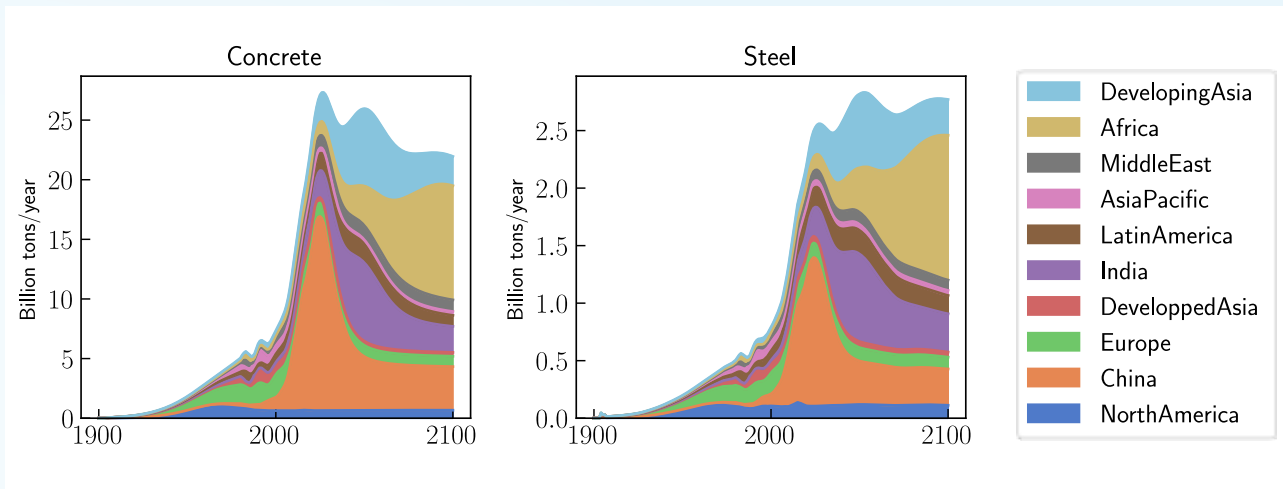


Figure 1 : Evolution cumulée des consommations de béton et d'acier fondée sur des croissances logistiques de toutes les infrastructures régionales calculées pour des croissances également logistiques du PIB et de la population (Vidal et al. [1]).

stabilise quand le PIB/hab atteint environ 20 000 USD/hab. Au-delà de cette valeur, la majorité des infrastructures sont déjà construites et la production de matières premières permet son renouvellement et son adaptation aux évolutions démographiques et technologiques.

L'évolution du nombre d'unités technologiques par habitant (nombre de voitures, de m² construits, de machines à laver, etc...), en fonction du PIB par habitant, suit ainsi une sigmoïde de loi logistique qui permet de reproduire l'évolution passée de l'infrastructure. En faisant l'hypothèse que les pays actuellement peu développés et en développement suivront une trajectoire similaire à celle suivie par les pays actuellement développés, cette fonction logistique permet de prédire l'évolution future de l'infrastructure pour une évolution de PIB/hab imposée.

Chaque technologie correspond à une intensité matière (e.g. quantité de différentes matières par voiture, m² construit, machine à laver, etc.). Il devient alors possible de calculer le stock de matière dans l'infrastructure. Pour des durées de vie, taux de collecte et de recyclage imposés, on peut ensuite calculer les consommations annuelles en différentes matières, les flux de matière primaire (provenant

de la mine) et recyclée, et les pertes (utilisations dispersives et enfouissement) qui doivent être équilibrées par des apports primaires supplémentaires. Les estimations sont faites par matière dans toutes les technologies pour différentes régions mondiales identifiées sur la base d'un niveau comparable d'évolution de PIB/habitant. L'évolution mondiale est obtenue en additionnant les besoins de chaque région (figure 1). Cette approche totalement ascendante, qui part des évolutions locales du PIB et de la démographie, permet de relier la consommation mondiale de matériaux aux développements économiques, démographiques, et technologiques locaux. Elle reproduit les évolutions observées depuis la seconde guerre mondiale.

Au-delà des besoins pour la construction de l'infrastructure, la hausse du niveau de vie semble aussi induire une altération de l'efficacité énergétique, les régions à revenu élevé utilisant plus d'énergie par unité de consommation finale que les régions à faible revenu (Andrieu *et al.* [2]). Cette observation contredit la croyance commune selon laquelle un PIB plus élevé est corrélé à une meilleure efficacité. L'efficacité énergétique s'améliore *au cours du temps*, mais pas de manière plus rapide dans les pays développés que dans les pays plus pauvres.

Le poids de la transition énergétique

La transition énergétique engendre de nouveaux besoins par rapport à l'évolution tendancielle décrite précédemment, car les infrastructures solaires et éoliennes ont une intensité matière (en tonne/kW) plus importantes que celles utilisant des combustibles fossiles et nucléaires ([3][4] [5]). Les énergies de flux solaires et éoliennes ont en effet une faible densité, et de grandes infrastructures doivent être déployées pour capturer l'énergie et la transformer en électricité, ce qui nécessite de grandes quantités de matériaux. A puissance installée égale, les éoliennes et les PV demandent par exemple 5 à 15 fois plus de béton, acier, cuivre ou aluminium que les centrales thermiques classiques à flamme ou le nucléaire. Les écarts sont plus grands si l'on rapporte la masse de matériaux utilisés à l'énergie produite, en raison des facteurs de charge des installations.

A ces besoins s'ajoutent ceux des infrastructures et des installations de stockage permettant l'intégration des sources électrogènes non pilotables dans le réseau électrique, ainsi que ceux des technologies utilisant l'électricité. Les véhicules électriques par exemple utilisent 3 à 4 fois plus de cuivre que les véhicules thermiques, une batterie Li-ion contenant du lithium, du cobalt, du

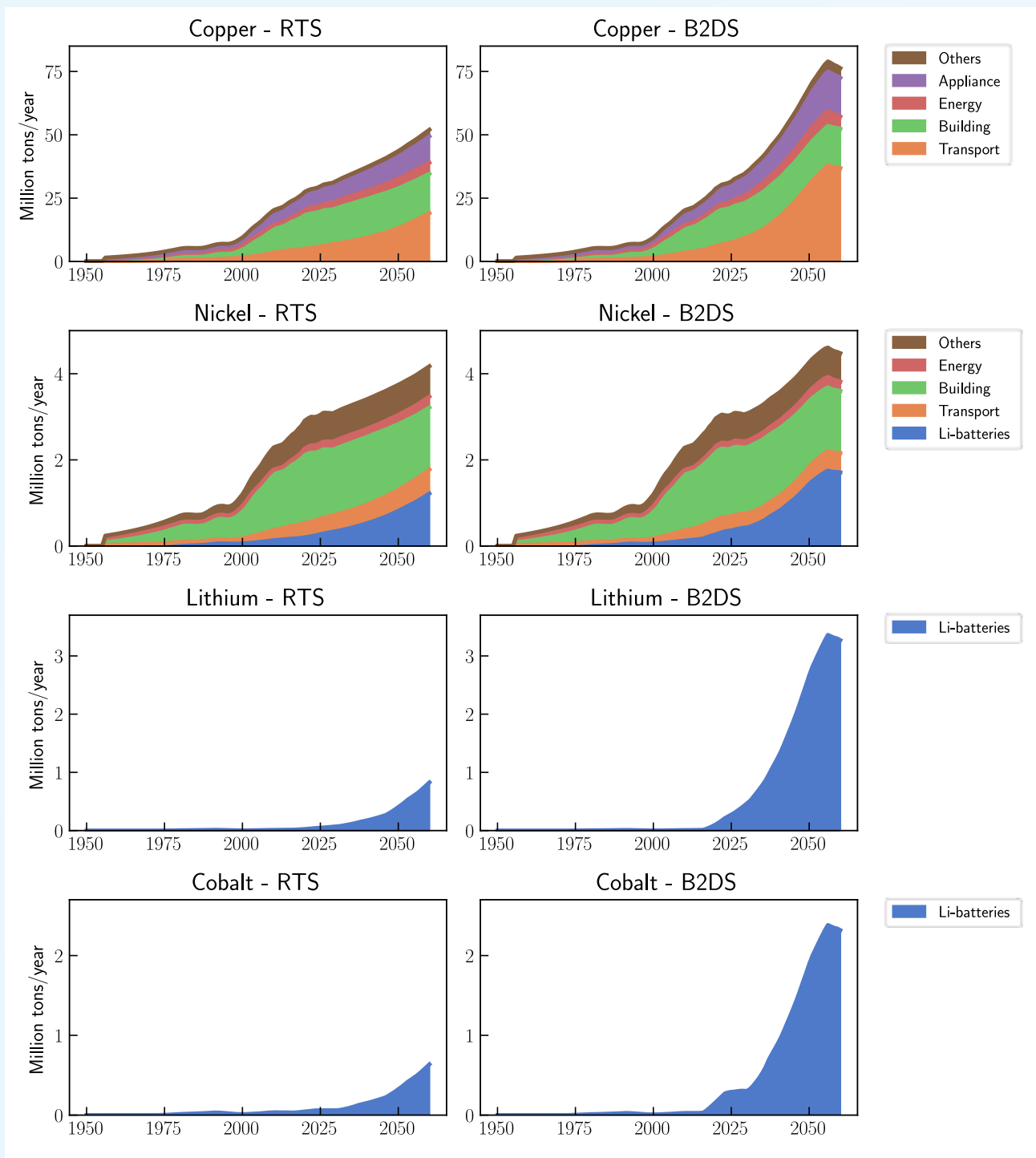


Figure 2 : Demande annuelle en cuivre, nickel, lithium, et cobalt, calculée pour une évolution des infrastructures selon les scénarios : a) de référence (RTS) (panneau de gauche), et au-delà de 2°C (B2DS) (panneau de droite) de l'Agence Internationale de l'énergie¹ (Vidal *et al.* [1]).

●●● nickel et du manganèse dans le cas de la technologie Li-NMC, et éventuellement un aimant permanent contenant des terres rares. Les besoins agrégés de métaux dépendent de la quantité d'énergie produite, du type de technologies bas-carbone employées sur toute la chaîne de l'énergie et de la vitesse de transition envisagée.

Ceci est illustré sur la figure 2, qui montre les différences de consommation mondiale de cuivre, lithium, cobalt et nickel pour deux scénarios énergétiques contrastés : **RTS** (scénario des technologies de référence) et **B2DS** (scénario supposant un réchauffement global moyen inférieur à deux degrés) de l'AIE

(2017). Pour ces deux scénarios, les besoins additionnels sont principalement contrôlés par l'électrification du parc de véhicules légers. Le même constat est fait

¹ IEA. *Energy Technology Perspectives 2017*; Technical report; IEA: Paris, France, 2017.

au niveau français, où l'électrification du transport double les besoins en cuivre, et multiplie par 10 la demande en lithium et cobalt à horizon 2050.

Les contraintes d'approvisionnement primaire

En combinant les évolutions tendancielle et celles des transitions numériques et énergétiques, la demande en métaux à horizon 2050 sera multipliée par un facteur 2 à 3 pour l'acier et le béton, 4 pour le cuivre, et 10 à 40 pour nombre de métaux technologiques utilisés dans les secteurs de l'énergie et du numérique. Il s'agit d'un défi de taille, dans un monde où l'approvisionnement est déjà tendu et les impacts environnementaux de la production sont déjà sérieux. Aujourd'hui, environ 12 % de la consommation d'énergie totale au niveau mondial et près de 40 % de la consommation industrielle sont utilisés pour produire les matières premières. Au cours du siècle dernier, l'amélioration de l'efficacité énergétique des différents procédés de production de matière a 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, la limite est d'environ 10 MJ/kg. Il fallait 50 MJ pour produire un kilogramme de d'acier en 1950, il en faut 25 aujourd'hui et nous nous approchons de la limite thermodynamique. La même observation est faite pour tous les métaux.

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

“ Au cours du siècle dernier, l'amélioration de l'efficacité énergétique des différents procédés de production de matière a 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. ”

à la consommation. Une évolution similaire est anticipée pour les ressources énergétiques fossiles. Le taux de retour énergétique (quantité d'énergie produite par énergie investie) était de 50 pour 1 en 1930 pour le pétrole, il est aujourd'hui inférieur à 10 pour le gaz et le pétrole. Comme pour les métaux, l'amélioration technologique a permis d'accéder à de nouveaux types de gisement (en mer, ultra-profond, pétrole de roche mère, gaz de schiste) en maintenant les coûts de production. Mais comme pour les métaux également, l'idée d'une amélioration technologique éternelle de l'extraction primaire est un mythe, car elle viole les lois de la thermodynamique. Nous serons inexorablement confrontés à un double problème si nous restons dépendants des énergies fossiles : 1) un prix de l'énergie croissant et 2) des coûts de production en hausse, supérieure pour les métaux, car les gisements restants sont plus difficiles à exploiter et l'énergie est plus chère². Cela ne signifie pas que les ressources seront épuisées, mais que leur coût de production primaire deviendra prohibitif.

La date précise du début de cette évolution n'est pas connue avec précision. Il est possible qu'elle soit déjà atteinte pour certains métaux comme le cuivre, l'argent ou le nickel, composants essentiels de la transition énergétique avec les technologies actuelles. Un changement technologique « de

rupture » sera alors envisagé, pour exploiter des ressources qui ne l'étaient pas auparavant, comme les gisements sous-marins pour les métaux, ou éventuellement des ressources devenues accessibles par bouleversement climatique (e.g. gisements arctiques). Aucune de ces solutions n'est souhaitable, pour des raisons environnementales évidentes.

La hausse des prix arrivera et il faut la préparer pour diminuer son impact tout en s'assurant que les besoins pour la transition énergétique seront satisfaits. Ce point est important car nous sommes en face d'une situation paradoxale : la transition énergétique est source de surconsommation de ressources minérales et d'énergie pour les produire, mais c'est aussi la clef de notre futur car elle offre la possibilité de maintenir l'accès à une ressource énergétique pérenne à un prix raisonnable. La clef de la réussite réside dans notre capacité à organiser le partage de ces ressources au niveau mondial le temps de la transition.

Des pistes à explorer

La production domestique comme levier éthique et stratégique

La transition énergétique est un enjeu mondial et tous les pays, quel que soit leur niveau de développement, sont concernés. Les pays développés utilisent majoritairement des ressources importées depuis des pays en développement économique. Dans ces conditions, la transition énergétique des pays riches dépendrait d'une extraction de matière

² A court terme, la crise ukrainienne démontre déjà la sensibilité de l'industrie de manufacture de métaux aux prix du gaz et de l'électricité, avec la fermeture temporaire de hauts fourneaux en Pologne et Slovaquie, ou la réduction de la production en France et en Allemagne.

- dans des pays plus pauvres, qui en supportent 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 - représentant 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 plus élevé). Pour éviter que ces pays soient *in fine* privés des capacités en raison d'un accès difficile aux ressources minérales, les pays riches doivent accepter d'extraire leurs ressources minérales sur leur propre territoire. Cela nécessite d'améliorer les technologies d'exploitation pour garantir la minimisation des impacts et l'adhésion citoyenne, qui est de plus en plus compromise en Europe ³.

Le recyclage comme levier stratégique, énergétique et environnemental

Les principales phases du recyclage d'un métal sont la collecte, le tri et le broyage des produits en fin de vie, suivi de la fonte et du raffinage des métaux. Par rapport à la production primaire, l'énergie consommée est réduite d'environ 80 % pour l'acier, 75 % pour le cuivre, ou 95 % pour l'aluminium. Dans le cas de la transition énergétique, les déchets métalliques des infrastructures installées actuellement ne seront collectés que dans plusieurs dizaines d'années et seul un démantèlement des infrastructures de la chaîne d'approvisionnement en

3 Voir les exemples récents d'opposition sociale à l'ouverture de mines de lithium en Serbie et au Portugal.

“ La transition énergétique est un enjeu mondial et tous les pays, quel que soit leur niveau de développement, sont concernés. Les pays développés utilisent majoritairement des ressources importées depuis des pays en développement économique. ”

énergies fossiles pourraient représenter une source conséquente de matières premières recyclées, principalement pour l'acier (Le Boulzec et al. [6]) et une augmentation générale des taux de collecte des déchets métalliques toutes applications confondues ⁴.

Pour un spectre plus large de matières premières, un recours massif à la production primaire restera l'option dominante. Le recours croissant à des technologies de pointe où les métaux sont dilués et coûteux à récupérer est un frein au recyclage. Il serait prudent de minimiser les applications gadgets des nouvelles technologies, notamment pour les applications connectées inutiles. Une grande proportion de l'industrie du recyclage est actuellement installée en Asie, en Inde et en Afrique, où les pays développés exportent leurs déchets métalliques et importent des produits raffinés. Cela s'explique par un coût de recyclage plus élevé dans les pays disposant de normes environnementales plus contraignantes. Cette disparité des normes diminue également le potentiel de réduction de l'impact environnemental du recyclage ainsi que son caractère stratégique.

Des stratégies nationales comme levier stratégique

La prise de conscience de la dépendance croissante aux matières pre-

4 Le taux de collecte moyen du cuivre atteint 78 % en Europe (EU28) contre seulement 44 % en Amérique du Nord (Loibl and Tercero Espinoza [5]) ;

mières pour les technologies énergétiques et numériques a conduit plusieurs acteurs institutionnels à initier une réflexion à partir du milieu des années 2000. Le concept de criticité d'une matière première ⁵ a été défini par le Conseil National de Recherche (NRC) des Etats-Unis d'Amérique en 2006, selon deux variables : l'intensité d'utilisation et la disponibilité. Cela a mené à l'identification d'une liste de matières premières qualifiées de critiques, qui évolue au cours du temps. Le Département de l'Intérieur américain a ainsi présenté une liste de 50 matières premières non énergétiques en 2022, tandis que la Commission européenne a actualisé sa liste à 30 matières en 2020 ⁶.

Aux états unis, Joe Biden a invoqué le *Defense Production Act* pour développer rapidement la production primaire et secondaire domestique de lithium, nickel, cobalt, graphite et manganèse, matériaux utilisés dans la production de batteries Li-ion de grande capacité ⁷. En France, le rapport Varin sur l'approvisionnement de l'industrie en

5 Le concept de criticité présente de nombreuses définitions différentes dans la littérature académique et institutionnelle, incorporant parfois des variables environnementales, de substituabilité, etc.

6 Ces listes sont en forte augmentation au cours du temps. La Commission européenne avait ainsi identifié 14 matières en 2011, et le Département de l'Intérieur Américain 35 matières en 2018.

7 Le président Biden a initié cette mesure le 31 mars 2022. Voir : <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/03/31/memorandum-on-presidential-determination-pursuant-to-section-303-of-the-defense-production-act-of-1950-as-amended/>

matières premières minérales identifiées, sans surprise, les mêmes substances. Emmanuel Macron a souligné l'enjeu de sécurisation à l'accès aux matières premières lors de la présentation du plan France 2030. A l'échelle européenne, Ursula von der Leyen a elle aussi annoncé le projet d'implémenter un *EU Critical Raw Materials Act*, afin de consolider la chaîne d'approvisionnement en matières premières critiques, primaires et secondaires. Ces stratégies régionales doivent cependant être accompagnées d'un réalisme économique, notamment pour le recyclage, puisque les capacités actuelles européennes ne représentent qu'une partie du volume de déchets générés et que les futurs métaux ne seront recyclés que si le coût du recyclage est comparable à celui dans les pays asiatiques.

Au-delà de ces stratégies de pays riches axées sur les capacités croissantes de production, une réflexion sur la maîtrise de la demande en matières premières est nécessaire. Cet axe de recherche est présent dans la littérature institutionnelle et académique (e.g. Pauliuk *et al.* [6], United Nations Environment Programme [7]), sous la dénomination « d'efficacité matière ». Celle-ci correspond à i) la réduction de l'intensité matière d'une technologie à performance égale, ii) l'extension de la durée de vie ou l'augmentation de l'intensité d'utilisation des technologies, iii) une réflexion sur les habitudes de consommation individuelle, par exemple sur l'utilisation et la taille des véhicules personnels. Ces stratégies qui relèvent du bon sens sont encore trop rarement initiées par les industriels.

Conclusion

La demande en ressources minérales pour produire les matières premières va continuer à croître au cours des prochaines décennies, tirée par le développement économique des pays très peuplés et les transitions énergétique

et numérique. La nature et les quantités de ressources minérales sont dépendantes des différents types d'utilisation, qui varient selon l'organisation et le niveau de développement des sociétés. Afin de confronter les contraintes de demande et d'offre, le développement de modèles dynamiques est nécessaire. Pour la demande, les besoins émergeant de la transition énergétique doivent être estimés par une approche tenant compte de l'évolution des mix énergétiques et des tendances socio-économiques régionales. Pour l'offre, une approche physique reposant sur l'évolution de la qualité des gisements et de l'énergie nécessaire pour les produire, du prix de l'énergie et du progrès technologique, permet d'identifier une future hausse systématique du coût de production et du prix des matières premières. Cette contrainte économique agira en conjonction avec des contraintes stratégiques, énergétiques et environnementales.

Dans un contexte de transition énergétique, les enjeux industriels et sociétaux sont majeurs. Plusieurs stratégies se mettent en place, dont la production domestique dans les pays actuellement importateurs, le recyclage, la sécurisation et la diversification de l'approvisionnement ainsi que l'efficacité matière des technologies. Ces solutions cristallisent les enjeux socio-environnementaux actuels entre les pays présentant des niveaux de développement différents, notamment à travers les oppositions à une reprise de la production domestique dans plusieurs pays développés. 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. Accepter de gérer les impacts environnementaux de notre consommation permettrait de développer les meilleures technologies pour les minimiser. Une vision globale de la transition énergétique est donc néces-

Les auteurs

Olivier Vidal est chercheur



CNRS-INSU à l'Institut des Sciences de la Terre, Grenoble. Après un doctorat en minéralogie

expérimentale, il s'est spécialisé dans la modélisation thermodynamique et cinétique des réactions minérales, avec des applications dans les domaines des sciences de la Terre, du stockage des déchets radioactifs ou du CO₂, et de la production d'hydrogène naturel. Ses recherches portent aujourd'hui sur le lien entre énergie et matériaux bruts dans le contexte de la transition énergétique vers une société à faible émission de carbone.

Il a été coordinateur scientifique du réseau européen ERA-MIN sur le traitement industriel des matières premières non énergétiques (<http://www.era-min-eu.org/>), et il est impliqué dans plusieurs projets multidisciplinaires en collaboration avec des économistes.

Hugo Le Boulzec est chercheur



post-doctorant au laboratoire d'économie appliquée de Grenoble (GAEL). Ses recherches

se concentrent sur l'utilisation de matières premières minérales et métalliques dans le cadre de la transition énergétique, et sur la modélisation des co-bénéfices et risques liés à la qualité de l'air.

saire, 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. ■

... Références

- [1] Olivier Vidal, Hugo Le Boulzec, Baptiste Andrieu, and François Verzier. "Modelling the Demand and Access of Mineral Resources in a Changing World." *Sustainability* 14, no. 1 (December 21, 2021): 11. <https://doi.org/10.3390/su14010011>.
- [2] Baptiste Andrieu, Olivier Vidal, Hugo Le Boulzec, Louis Delannoy, and François Verzier. "Energy Intensity of Final Consumption: the Richer, the Poorer the Efficiency". *Environmental Science & Technology*, (2022),:56 (19), 13909-13919. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c03462>.
- [3] Olivier Vidal, Fatma Rostom, Cyril François, and Gael Giraud. "Global Trends in Metal Consumption and Supply: The Raw Material–Energy Nexus." *Elements* 13, no. 5 (October 1, 2017): 319–24. <https://doi.org/10.2138/gselements.13.5.319>.
- [4] Olivier Vidal, Hugo Le Boulzec, and Cyril François. "Modelling the Material and Energy Costs of the Transition to Low-Carbon Energy." Edited by L. Cifarelli and F. Wagner. *EPJ Web of Conferences* 189 (2018): 00018. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818900018>.
- [5] Olivier Vidal, Bruno Goffé, and Nicholas Arndt. "Metals for a Low-Carbon Society." *Nature Geoscience* 6, no. 11 (November 2013): 894–96. <https://doi.org/10.1038/ngeo1993>.
- [6] Hugo Le Boulzec, Louis Delannoy, Baptiste Andrieu, François Verzier, Olivier Vidal, and Sandrine Mathy. "Dynamic Modeling of Global Fossil Fuel Infrastructure and Materials Needs: Overcoming a Lack of Available Data." *Applied Energy* 326 (November 2022): 119871. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119871>.
- [7] Antonia Loibl, and Luis A. Tercero Espinoza. "Current Challenges in Copper Recycling: Aligning Insights from Material Flow Analysis with Technological Research Developments and Industry Issues in Europe and North America." *Resources, Conservation and Recycling* 169 (June 2021): 105462. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105462>.
- [8] Stefan Pauliuk, and Niko Heeren. "Material Efficiency and Its Contribution to Climate Change Mitigation in Germany: A Deep Decarbonization Scenario Analysis until 2060." *Journal of Industrial Ecology* 25, no. 2 (April 2021): 479–93. <https://doi.org/10.1111/jiec.13091>.
- [9] United Nations Environment Programme. *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. UN, 2020. <https://doi.org/10.18356/689a1a17-en>.

Résumé

L'humanité utilise les ressources minérales à un niveau sans précédent et la demande va continuer à croître au cours des prochaines décennies, alimentée par les transitions énergétique et numérique et le développement économique des pays très peuplés. La nature et les quantités de ressources minérales nécessaires dépendent des différents types d'utilisation, qui 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 les utilisations énergétiques et le déploiement de sources renouvelables ou décarbonées. L'estimation de la capacité d'offre doit tenir compte des coûts énergétiques et de production, lesquels sont contrôlés par la qualité des ressources et le taux d'amélioration technologique - soumis lui-même aux limites thermodynamiques. ■

Abstract

Humanity uses mineral resources at an unprecedented level and demand will continue to grow in the coming decades, fueled by energy and digital transitions and economic development in highly populated countries. The nature and quantities of mineral resources needed depend on the different types of use, which vary according to the organization and level of development of societies. The demand for raw materials must therefore be estimated according to a dynamic and regionalized approach, taking into account the different development scenarios, particularly with regard to energy uses and the deployment of renewable or decarbonized sources. The estimation of supply capacity must take into account energy and production costs, which are controlled by the quality of resources and the rate of technological improvement - itself subject to thermodynamic limits. ■