



■ Gisement d'Echassières (Allier), pour l'instant une carrière de kaolin exploitée par Imerys.

La souveraineté énergétique est-elle menacée par notre dépendance aux ressources minérales ?

Florian Fizaine,

Maître de conférences, Université Savoie
Mont-Blanc
Laboratoire IREGE

Comment une transition énergétique trop axée sur la décarbonation de l'énergie pourrait soulever d'autres problèmes liés aux ressources minérales...et pourquoi la transition énergétique doit être pensée au pluriel.

Introduction

Publiés tous deux en mars 2023, le récent rapport de la commission européenne (*Critical Raw Material act - CRMA*) [1] ainsi que le rapport de la commission d'enquête française portant sur la souveraineté énergétique [2] rappellent l'importance du lien entre énergie et matières premières.

Identifiée pour la première fois lors d'une comparaison entre énergies décarbonées et énergies fossiles par Kleijn et al. [3] pour les métaux, puis par Vidal et al. [4] pour les ressources minérales, la question des ressources pour l'énergie a connu dans la dernière décennie une popularité fulgurante auprès de la communauté des chercheurs. Ainsi, une récente méta-ana-

lyse [5] décomptait pas moins de 132 articles quantifiant les intensités matières des technologies énergétiques publiées après 2010 pour 94 % d'entre eux.

Toutefois, ce sujet d'étude n'est pas resté uniquement un objet de curiosité des chercheurs. D'autres ont très vite perçu les menaces que laissait planer l'intensifi-



●●● cation du lien entre énergie et ressources minérales. Depuis la crise des terres rares survenue en 2010, on ne compte plus les rapports de criticité cherchant à déterminer la sensibilité des nouvelles technologies de l'énergie aux approvisionnements en ressources minérales. En effet, la plupart des grandes organisations internationales comme la Banque Mondiale [6], le JRC européen [7] ou l'Agence Internationale de l'énergie [8] ont ainsi publié leur rapport sur la question.

Le lien énergie-ressources : entre complexification, intensification et concentration

Globalement, trois grands types de résultats ont été obtenus et semblent faire désormais consensus :

En premier lieu, en termes de base matérielle, les systèmes énergétiques renouvelables décarbonés n'ont strictement rien à voir avec les systèmes de moulins à vents et eau en usage à la fin du moyen-âge. Alors que les systèmes préindustriels s'appuyaient sur des ressources minérales communes (Pb, Zn, Cu, C, Sn, Fe), les nouveaux systèmes d'énergie renouvelable requièrent des dizaines et des dizaines d'éléments du tableau de Mendeleïev. Comme l'industrie électronique, l'éolien et les panneaux photovoltaïques modernes sont donc aussi des produits de la mondialisation des chaînes de valeurs, faisant appel à une très large palette de métaux extraits à travers le monde ; ceux-ci sont bien souvent concentrés et raffinés à un autre endroit, puis intégrés à un système énergétique dans quelque autre lieu. Si ce processus a pu permettre d'exploiter au mieux les rendements d'échelles et les spécialisations internationales des nations, il induit aussi une plus grande vulnérabilité aux ruptures d'approvisionnement logistiques des chaînes de valeurs.

En second lieu, les systèmes de production d'énergies renouvelables mais aussi les usages finaux énergétiques bas

“ Comme l'industrie électronique, l'éolien et les panneaux photovoltaïques modernes sont donc aussi des produits de la mondialisation des chaînes de valeurs, faisant appel à une très large palette de métaux extraits à travers le monde ; ceux-ci sont bien souvent concentrés et raffinés à un autre endroit, puis intégrés à un système énergétique dans quelque autre lieu. ”

carbone (véhicules électriques, lampes fluo-compactes et led) sont bien davantage intensifs en métaux mineurs/rare, métaux et ressources minérales (béton, verre) que les systèmes énergétiques fossiles majoritairement en place jusqu'ici. Cela est vrai si on raisonne en quantités de métaux par MW installé (figure 1) mais est encore renforcé si on observe les intensités par MWh du fait du faible facteur de charge et de la durée de vie réduite des systèmes d'énergie renouvelable. Cette intensité plus forte en ressources minérales des solutions décarbonées implique qu'un basculement graduel du mix énergétique vers ce type de solution implique aussi une hausse de la consommation de ressources par le secteur énergétique. Ce résultat peut également s'accroître si, dans le même temps, le monde requiert davantage d'énergie.

En troisième lieu, la répartition de l'extraction et du raffinage des métaux est bien souvent très inégalement répartie dans le monde, c'est-à-dire concentrée dans quelques pays. Dans le passé, les hydrocarbures ont causé d'intenses frictions géopolitiques, notamment du fait de la mainmise de quelques pays sur une fraction importante des gisements aux coûts les plus faibles. Ils continuent d'ailleurs encore à le faire. La réalité des marchés de métaux de base (cuivre, nickel, zinc...) est pourtant au moins équivalente à celle des hydrocarbures tandis que la plupart des métaux mineurs voient leur production restreinte à une poignée de pays. Pour rendre compte de cette réalité, nous pouvons utiliser l'indice de Herfindahl-Hirschmann (HHI) qui est une mesure de la concentration du marché se calculant comme la somme des parts de marché de chaque acteur au carré. Cet indice ten-

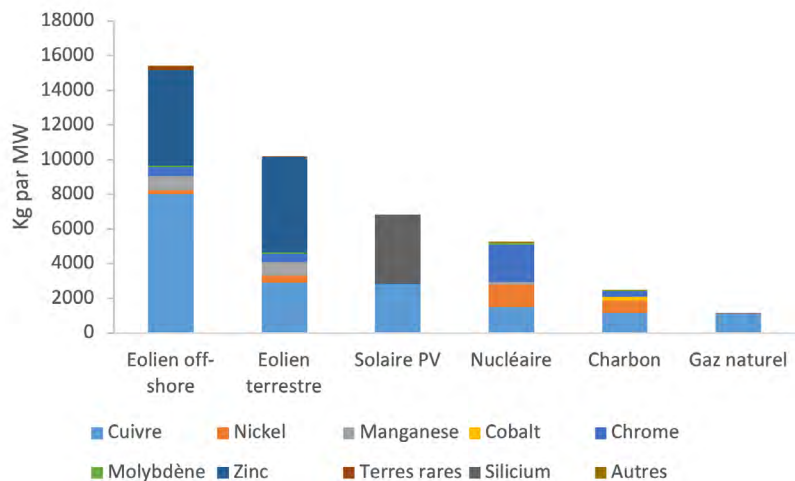


Figure 1 : Intensité matière de différents systèmes de production d'électricité. Données de l'IEA (2022).

dant vers zéro en situation de concurrence parfaite et atteignant 10 000 lorsqu'un seul acteur contrôle la totalité du marché. A titre d'exemple, Fizaine [9] rappelle l'extrême diversité de la concentration des marchés de métaux, passant d'une concurrence importante régnant dans l'extraction de l'or (HHI = 440) à celle intermédiaire du cuivre (1300), en passant par les situations plus préoccupantes du lithium et du cobalt (environ 3000) et se terminant par le cas extrême des terres rares (HHI supérieur à 9000¹). En gardant cette limite en tête, dans un inventaire des rentes et des réserves en métaux et en ressources fossiles détenues par les nations, Fizaine [9] montre que les rentes et les réserves en métaux sont davantage concentrées que les ressources fossiles (1310 contre 590 pour les rentes et 740 contre 660 pour les réserves). Ce constat a depuis été renouvelé par l'AIE [8] et cela à différentes étapes de la chaîne de valeur. Par conséquent, le basculement d'un monde basé sur les ressources fossiles à

celui des métaux pour les infrastructures d'énergie renouvelable ne réduira potentiellement pas les tensions géopolitiques entre pays détenteurs des ressources clés et les pays dépendants. Bien évidemment, les gagnants et les perdants de ce basculement ne sont pas nécessairement les mêmes. Il existe malgré tout de très larges perdants comme plusieurs pays de l'OPEP et de très larges gagnants comme la Chine, l'Australie, l'Afrique du Sud et le Chili (voir figure 2).

S'il existe des similitudes entre la dépendance aux hydrocarbures et celles aux métaux pour les infrastructures d'énergie renouvelable, cette nouvelle dépendance revêt toutefois des différences notables. Comme le note très justement l'AIE [8] dans son dernier rapport, la dépendance aux hydrocarbures est continue et repose sur un flux qui, lorsqu'il est interrompu, met le système énergétique et l'économie en difficulté. *A contrario*, la dépendance aux métaux et l'interruption du flux associé ne met en péril que la constitution des nouvelles infrastructures et les besoins de renouvellement, le système énergétique renouvelable existant n'étant pas affecté. Dans la même veine, les hydrocarbures

disparaissent après usage alors qu'il est possible de recycler les métaux issus du système d'énergie renouvelable voir même ceux issus du système en place d'énergie fossile² réduisant au moins partiellement notre dépendance aux flux primaires de métaux et donc aux pays détenteurs de ces derniers. Pourtant là encore, l'efficacité du recyclage et sa capacité à atténuer notre dépendance aux importations seront très variables selon le métal étudié. C'est ce que nous allons voir dans la section suivante.

Pourquoi la question des métaux mineurs pose-t-elle problème ?

Comme nous l'avons vu précédemment, les métaux ne forment pas un « tout » homogène et leurs caractéristiques diffèrent notablement selon qu'on parle de métaux majeurs (Fe, Cu, Ni, Zn, Al), de métaux précieux (Au, Ag, Pd, Pt) ou de métaux mineurs (In, Li, Te, Ga, terres rares,...). Or, c'est justement cette dernière classe qui est davantage concentrée aux mains de quelques pays. Les métaux de cette classe sont abondamment utilisés par les nouvelles technologies de l'énergie, ainsi que celles de l'information et de la communication. Cette dépendance est d'autant plus problématique qu'à l'inverse des métaux précieux et majeurs, les métaux mineurs ont des caractéristiques potentiellement très problématiques si on fait soudainement très largement appel à eux comme dans le cas d'une intensive décarbonation de l'économie.

Pour commencer, la plupart de ces métaux ne sont pas ou peu recyclés³, [10]. Cette absence de recyclage ne reflète pas un manque de volonté mais simplement des mauvaises conditions économiques (faibles volumes, faibles concentrations dans les produits) associées à une incerti-

1 La situation s'est améliorée depuis l'entrée en production des mines australiennes et le renouveau de Mountain Pass aux USA. Le HHI évolue désormais autour des 5000 pour les terres rares.

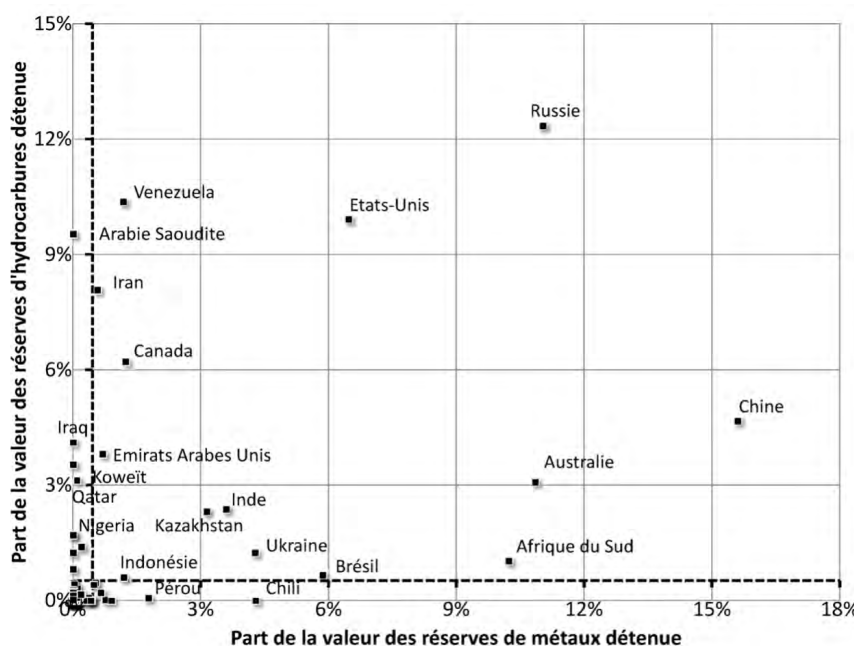


Figure 2 : Part des réserves mondiales de métaux et d'hydrocarbures détenue par chaque pays. Données de Fizaine (2021). Note : les lignes en pointillées représentent les médianes mondiales.

2 Voir la thèse de Hugo le Boulzec pour en savoir plus sur cette option.

3 Nous parlons ici du taux de recyclage en fin de vie qui est souvent bien inférieur à 10%, voire en majeure partie inférieur à 1%.

“ Le basculement d’un monde basé sur les ressources fossiles à celui des métaux pour les infrastructures d’énergie renouvelable ne réduira potentiellement pas les tensions géopolitiques entre pays détenteurs des ressources clés et les pays dépendants. ”

●●● tude forte sur les prix de ces métaux (volatilité élevée) et des cycles de vie technologiques souvent très courts. Ces paramètres empêchent la plupart du temps la mise en place de filières de recyclage dédiées (voir Fizaine [11]). L'échec du recyclage des terres rares à la Rochelle par Rhodia Solvay en 2016 à partir de poudres luminescentes des lampes fluo-compactes représente une parfaite illustration du phénomène. Cet échec relevant à la fois de paramètres économiques (chute du prix des terres rares) et technologiques (les lampes fluo-compactes ont été substituées rapidement par les LED avec 15 fois moins de terres rares). Quand bien même les taux de recyclage en fin de vie seraient parfaits (proche de 100 %), les taux de croissance fulgurants des marchés de métaux mineurs empêchent le recyclage de couvrir une part importante de la demande. Par exemple, la demande de lithium a été multipliée par près de trois en 7 ans. Cela signifie que la collecte et le recyclage de la totalité du lithium produit il y a 7 ans ne couvriraient au mieux qu'un tiers de la demande actuelle !

Ensuite, une autre caractéristique très contraignante pourrait venir de la sous-production des métaux mineurs. En effet, les métaux mineurs n'ont, pour la plupart, pas de mines dédiées. Il n'y a pas de mines d'indium, pas plus qu'il n'y a de mines de tellure ou de galium. Il y a des mines produisant du zinc, du cuivre ou de l'aluminium (bauxite) et à partir desquelles les producteurs miniers peuvent décider d'aller chercher les dizaines, centaines ou milliers de ppm⁴ de métaux mineurs dispersés

dans le flux du métal principal assurant la rentabilité de la mine. Cette configuration a pour conséquence immédiate d'amoindrir voire d'anéantir la réactivité de l'offre minière au prix des métaux mineurs même en cas de flambée des cours. En effet, on voit mal des mineurs de zinc se mettre à produire davantage de zinc pour pallier une pénurie sur le marché de l'indium qui représente bien souvent moins de 1 % de leurs recettes.

Enfin, ces métaux mineurs souffrent d'une opacité très importante de leurs marchés, ne disposant pas, sauf exception, de place financière de cotation⁵. L'information sur les prix est donc difficile à obtenir sur les marchés de métaux mineurs tandis que la fiabilité de cette information est toute relative. Or en l'absence de financiarisation, la possibilité de couverture contre la volatilité des prix pour les consommateurs de métaux mineurs reste par conséquent problématique.

Pourtant si les métaux mineurs soulèvent d'importantes problématiques, ils ne doivent pas faire oublier que les énergies décarbonées n'ont pas de dépendance exclusive à un métal mineur en particulier mais une dépendance plus générale à la classe des métaux mineurs voir à la classe des métaux. On peut ainsi éviter le recours au cobalt dans les batteries au lithium en le remplaçant par du nickel, de même qu'il est possible d'avoir recours au rotor bobiné de cuivre plutôt qu'à des aimants permanents dans les moteurs électriques. Se concentrer exclusivement sur le problème des métaux

mineurs en laissant de côté les autres métaux pour l'énergie, c'est confondre l'écume des vagues et les lames de fonds.

Pourquoi la question des métaux pour l'énergie ne se limite pas aux métaux mineurs

En termes de volume et de dépendance, les métaux de base (cuivre, nickel, aluminium...) sont prépondérants. A titre d'exemple, une éolienne off-shore, si elle utilise des aimants permanents, contient quelque deux cents kilos de terres rares par MW, mais près de 6 tonnes de zinc et 8 tonnes de cuivre, autant de verre et de polymère, et jusqu'à 130 à 300 tonnes d'acier [5] ! Or, à l'exception du fer et de l'aluminium, les gisements de ces métaux ont vu leur concentration géologique diminuer continuellement depuis le début du XX^{ème} siècle. Comme il existe une relation entre la concentration d'un métal et son contenu énergétique [12], à progrès technique constant, une baisse de la concentration d'un minerai requiert donc davantage d'énergie pour extraire la même quantité de cuivre, de nickel, etc. Evidemment, au fil du temps, nous sommes plus efficaces (économiquement et énergétiquement) pour extraire une même quantité de métal à concentration constante. Néanmoins, le progrès technique et ce que nous pouvons en obtenir reste limité par les lois de la thermodynamique. Si le progrès technique nous a permis d'abaisser les coûts et de maintenir voire légèrement réduire les prix réels⁶ des métaux durant le siècle dernier, la logique tend à s'inverser aujourd'hui avec un progrès technique qui ne parvient plus à compenser totalement les chutes des teneurs. Les travaux d'Olivier Vidal⁷ [13] montrent d'ailleurs que la consommation énergétique unitaire (donc le prix des métaux) devrait remonter d'ici le milieu de ce siècle sous l'effet du ralentissement des gains d'efficacité énergétique et de la diminution des teneurs. Nous courrons donc le

4 Parties par million.

5 Le molybdène et le cobalt ont été introduits en 2011 au London Metal Exchange (LME) tandis que le lithium les a rejoints en 2021.

6 C'est-à-dire corrigé de l'inflation.

7 Le lecteur est invité à se reporter à l'article d'Olivier Vidal et Hugo Le Boulzeuc dans REE 2022-5, 114-120

risque d'avoir des métaux qui consomment plus d'énergie et l'extraction de l'énergie qui elle-même nécessite plus de métaux. Cette circularité cumulative pourrait conduire à une baisse importante du taux de rendement énergétique des énergies renouvelables si nous ne parvenons pas à pallier l'épuisement des métaux [12]. Un levier d'action pour atténuer cet aspect pourrait venir de l'efficacité matérielle appliquée au secteur de l'énergie, c'est-à-dire de la diminution des quantités de métaux requises par MW pour une technologie énergétique donnée. Par exemple, d'après les données du Fraunhofer, l'intensité en silicium du photovoltaïque est passée environ de 16g/W_{peak} en 2004 à seulement de 2 g/W_{peak} en 2021. Cette forme d'efficacité reste toutefois bornée par une limite sur le très long terme car il nous faudra toujours un support matériel pour extraire l'énergie.

Au-delà de ces considérations de long terme liées à l'épuisement des métaux, le décollage des solutions de décarbonation de l'énergie implique une importante mise sous pression de la production minière. Comme le recyclage ne pourra dans le moyen terme apporter qu'une réponse très limitée au problème, l'offre minière devra combler la différence. La question n'est donc pas tellement de savoir si nous disposons des réserves pour faire face aux besoins de la transition énergétique mais plutôt si nous sommes capables d'ouvrir autant de mines en si peu de temps. Dans l'adéquation entre l'énergie et les ressources pour l'énergie, la dynamique compte donc tout autant que les stocks à mobiliser. Deux paramètres cruciaux interagissent ici : la réactivité de l'offre de solutions d'énergie décarbonée et celle de l'offre minière pour assurer son déploiement. Si la première est supérieure à la seconde, nous allons très certainement connaître des goulets d'étranglement. Le lithium fournit là encore une parfaite illustration de cette problématique. En 2021, d'après l'AIE, 4,7 millions de véhicules électriques ont été vendus à travers le monde (8,6 % des ventes totales de voitures). Cela

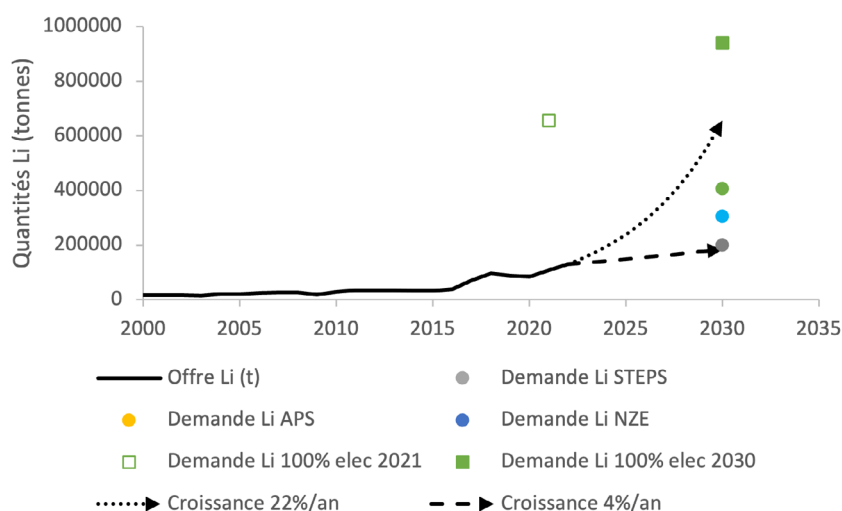


Figure 3 : Evolution de l'offre de lithium historique et quantités induites par les scénarios plus ou moins volontaristes de l'IEA (STEPS, APS, NZE) ainsi que le 100 % des ventes en électrique. A noter la croissance de l'offre de 22 %/an sur 2015-2022 et 4 %/an sur 2000-2015.

représente environ 55 000 tonnes de lithium incorporé dans les batteries sur une demande évaluée à 95 000 tonnes (équivalent Li) par l'USGS⁸. Or, électrifier immédiatement 100 % des ventes de véhicules nécessiterait une multiplication par 5 de la production totale de lithium. La figure 3 montre bien l'impossibilité d'électrifier la totalité des ventes de véhicules à moyen terme. Allonger le délai de pénétration du véhicule électrique tout en contenant la progression du nombre de ventes de véhicules reste donc crucial pour laisser à l'offre minière de lithium le temps de s'adapter.

Souveraineté énergétique mais dépendance matérielle française

En ce qui concerne la dépendance aux métaux pour l'énergie, la France ne fait pas vraiment mieux que d'autres nations européennes. Deux raisons à cela :

- Elle réduit ses émissions de CO₂ grâce aux développements d'énergies renouvelables dont les systèmes sont produits à l'étranger.

- le nucléaire, même s'il est moins intensif en métaux par kWh, recourt à une très large palette de métaux mineurs produits eux aussi à l'étranger.

Côté transport, le basculement complet vers l'électrique des 38,7 millions de voitures françaises nécessiterait 330 000 tonnes de lithium⁹ soit l'équivalent de deux fois et demie la production mondiale de lithium ou de 33 ans de production de la future mine française d'Echassières, projetée par Imerys pour 2028 ! Sans compter les difficultés pour établir ce type d'activité en France comme en témoigne la débâcle passée d'un projet de mine de tungstène en Ariège. Le recyclage pourrait peut-être contribuer à réduire cette dépendance mais là encore, la dynamique est bien trop rapide pour être significativement couverte par le lithium usagé des produits électriques et électroniques. La réalité c'est que la France n'est pas (plus) un pays minier et n'a pas les capacités immédiates d'assurer les principaux besoins matériels de sa souveraineté énergétique.



⁸ Institut de Géologie Américain.

⁹ Les ventes des 203 000 véhicules électriques de 2022 ont consommé déjà 2000 tonnes de lithium.

“ Si nous nous contentons de « pansements » technologiques en substituant une technologie à une autre, nous allons en grande partie déplacer le problème ailleurs. Cela ne change pas la logique « extractiviste » à l’œuvre en toile de fond. ”

●●● Que faire ? Bifurcations énergétiques plutôt que transition énergétique ?

Face à ces difficultés, les multiples rapports publiés sur la question émettent des préconisations vieillissantes, maintes fois évoquées. Les deux derniers rapports cités en introduction ne font pas exception à la règle.

La plupart de ces préconisations sont issues d’approches « en silo » qui perçoivent le problème « par le petit bout de la lorgnette », se contentant de pallier les symptômes de l’anthropocène. Ainsi, si nous reprenons les principales préconisations du CRMA [1] pour sécuriser la transition énergétique : diversification des sources d’approvisionnement et diplomatie « minière », relance minière en Europe et recyclage, nous nous apercevons que ces propositions ne sont pas nouvelles. Il y a dix ans, le Centre d’analyse stratégique [14] offrait déjà de déployer le même type de leviers d’action.

Pourquoi ce type de mesures n’ont-elles pas porté leurs fruits et n’ont-elles pas de raisons d’être particulièrement efficaces ? Probablement parce qu’elles sont issues du progressisme technologique dont les leviers essentiels (exclusifs ?) sont des politiques d’offre. Or ces politiques font preuve de conservatisme socio-économique, c’est-à-dire qu’elles font abstraction des modifications de comportements et ne jouent pas sur la demande. Le mot même de transition énergétique contient un biais sémantique puisqu’il laisse croire qu’il s’agit juste de substituer le type d’énergie et d’aller vers des sources bas carbone. Un

simple problème d’offre et de technique donc. Pourtant ce type de transition énergétique demeure sans précédent dans l’histoire, aux dires mêmes de spécialistes des révolutions énergétiques passées comme Roger Fouquet [15] ou Jean-Baptiste Fressoz [16]. En effet, les précédentes révolutions énergétiques ne sont pas des substitutions absolues d’énergie mais des empilements énergétiques (substitution relative) où les anciennes sources d’énergies sont utilisées en symbiose avec les nouvelles. Si nous nous contentons de « pansements » technologiques en substituant une technologie à une autre, nous allons en grande partie déplacer le problème ailleurs. Cela ne change pas la logique « extractiviste » à l’œuvre en toile de fond.

Une vision plus large et plus systémique s’attaquerait également aux causes des problèmes environnementaux et non pas uniquement à ses symptômes. L’équation proposée par le Japonais Yoichi Kaya a cette vertu pédagogique de montrer que les émissions de CO₂ sont le produit de quatre paramètres : la population, le PIB par habitant, l’intensité énergétique du PIB et l’intensité carbone de l’énergie. Chacun de ces paramètres peut fournir des leviers d’action contre le réchauffement climatique. Les politiques de transition énergétique se sont jusqu’ici concentrées sur la décarbonation et dans une moindre mesure sur l’efficacité énergétique. Nous entendons même désormais parler de géo-ingénierie et de compensation carbone qui constitueraient une cinquième catégorie de levier agissant sur les symptômes encore plus en aval. Pourtant, l’énergie qu’on ne consomme pas, par efficacité

L’auteur

Florian Fizain a effectué une thèse à l’Université de Bourgogne visant à étudier comment les contraintes économiques, financières et énergétiques caractérisant les métaux rares pourraient affecter le développement des énergies bas carbone. Il poursuit ses recherches en tant Maître de conférences à l’Université de Savoie Mont-Blanc en cherchant à déterminer les conditions de réalisation de la croissance verte, du découplage PIB-matière-énergie-environnement ou de l’économie circulaire. Convaincu de la force de l’interdisciplinarité, il a été coordinateur de deux volumes sur l’économie des ressources minérales intégrant une quinzaine de chercheurs de plusieurs disciplines et participe actuellement à deux projets ANR mêlant sciences humaines et sciences naturelles (TRANSFAIR (ANR- 21-CE01-0022-01) SCARCYCLET (ANR-21-CE03-012)).

énergétique ou par sobriété choisie, n’exerce pas ou peu d’effet de report sur la disponibilité des ressources minérales et ne pose donc pas de problème de souveraineté énergétique. L’efficacité énergétique est un premier pas vers la réduction des « problèmes » même si elle fait aussi - si elle est utilisée seule - face à l’effet rebond qui est là aussi un impensé de la technique et de prise en compte des changements de comportements. La sobriété reste toujours le parent pauvre des politiques publiques ¹⁰, sans cesse renvoyée à des initiatives individuelles ou caricaturée en modèle Amish. Il ne s’agit pourtant pas d’opposer la sobriété à la technique. Il est donc plus que temps de penser bifurcations énergétiques et non pas simplement transition énergétique au singulier. La solution sera panachée, plurielle ou ne sera pas. ■

¹⁰ Il existe à ma connaissance très peu d’analyses économiques qui cherchent à évaluer les leviers d’action possibles et leurs effets pour mettre en œuvre cette sobriété choisie.

Références

- [1] European Commission. Critical Raw Materials Act. Press Release - Critical Raw Materials: Ensuring Secure and Sustainable Supply Chains for EU's Green and Digital Future. European Commission; 2023. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661
- [2] Schellenberger R., Armand A. Rapport n°1028 au nom de la Commission d'enquête visant à établir les raisons de la perte de souveraineté et d'indépendance énergétique de la France. Assemblée nationale, 2023.
- [3] Kleijn R, van der Voet E, Kramer GJ, van Oers L, van der Giesen C. Metal requirements of low-carbon power generation. *Energy*. 2011;36(9):5640-5648. doi:10.1016/j.energy.2011.07.003
- [4] Vidal O, Goffé B, Arndt N. Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience*. 2013;6(11):894-896. doi:10.1038/ngeo1993
- [5] Liang Y, Kleijn R, Tukker A, van der Voet E. Material requirements for low-carbon energy technologies: A quantitative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;161:112334. doi:10.1016/j.rser.2022.112334
- [6] Arrobas D, La Porta H, Kirsten L, McCormick MS, Ningthoujam J, Drexhage JR. The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. World Bank Group; 2017.
- [7] European Commission, Joint Research Centre, Blagoeva D, Marmier A, Alves Dias P, Pavel C. Assessment of Potential Bottlenecks along the Materials Supply Chain for the Future Deployment of Low-Carbon Energy and Transport Technologies in the EU : Wind Power, Photovoltaic and Electric Vehicles Technologies, Time Frame 2015 - 2030. Publications Office; 2016. doi:10.2790/08169
- [8] IEA. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions., IEA; 2021. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>, License: CC BY 4.0
- [9] Fizaine F. Les métaux rares : opportunité ou menace ? Enjeux et Perspectives Associés à La Transition Énergétique. TECHNIP; 2020.
- [10] UNEP. Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth. A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel. Fischer-Kowalski, M., Swilling, M., von Weizsäcker, E.U., Ren, Y., Moriguchi, Y., Crane, W., Krausmann, F., Eisenmenger, N., Giljum, S., Henricke, P., Romero Lankao, P., Siriban Manalang, A., Sewerin, S; 2011:174.
- [11] Fizaine F. Recycler 100 % des métaux, un objectif atteignable ? The conversation. <https://theconversation.com/recycler-100-des-metaux-un-objectif-atteignable-192573>. Published 2022.
- [12] Fizaine F, Court V. Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI. *Ecological Economics*. 2015;110:106-118. doi:10.1016/j.ecolecon.2014.12.001
- [13] Vidal O. Modélisation de l'évolution à long terme de l'énergie de production primaire et du prix des métaux. In: *L'économie Des Ressources Minérales et Le Défi de La Soutenabilité 1*. Vol 1. ISTE. ENERGIE. ; :119-143.
- [14] Barreau B, Hossie G, Lutfalla S. Note d'analyse : Approvisionnement en métaux critiques : un enjeu pour la compétitivité des industries française et européenne ? Commissariat général à la stratégie et à la prospective; 2013.
- [15] Fouquet R, Pearson PJG. Past and prospective energy transitions: Insights from history. *Energy Policy*. 2012;50:1-7. doi:10.1016/j.enpol.2012.08.014
- [16] Fressoz JB. Une histoire matérielle de la lumière. In: *Face à la puissance*. Sciences humaines. La Découverte; 2020:84-99. doi:10.3917/dec.jarri.2020.01.0084

Résumé

Dans cet article, nous proposons de passer en revue les principales contraintes associées au lien entre énergie et ressources minérales. En effet, un nombre croissant d'études scientifiques montre le lien étroit existant entre les systèmes de production d'énergie et leur contenu en ressources minérales. La transition énergétique si elle est axée en premier lieu sur la décarbonation de l'énergie implique le risque d'une complexification et intensification de ce lien tout en exposant les pays européens à une nouvelle forme de dépendance basée sur les ressources minérales. Les ressources minérales indispensables aux nouvelles technologies de l'énergie (bas carbone) ont des caractéristiques particulières qui peuvent se révéler problématiques si l'on exerce une trop forte demande, trop rapidement sur leur exploitation. Les principales préconisations offertes jusqu'à présent sont principalement axées sur des politiques d'offre visant à trouver ces ressources par différents moyens pour subvenir à la demande. Les politiques de transition énergétique et de souveraineté énergétique se doivent de penser plus en amont et plus large en agissant également sur la demande en énergie et donc sur les quantités de ressources minérales induites. ■

Abstract

In this article, we propose to address the main constraints associated with the energy-mineral nexus. Indeed, a growing number of scientific studies show the narrow link between energy production systems and their mineral resource content. The energy transition, if it is primarily focused on the decarbonization of energy, implies the risk of an increase in the complexity and intensity of this link, while exposing European countries to a new form of dependence based on mineral resources. The mineral resources that are essential to new (low-carbon) energy technologies have particular characteristics that can prove problematic if their exploitation is demanded too much, too quickly. The main recommendations offered so far are mainly focused on supply-side policies aiming at finding these resources by different means to meet the demand. Energy transition and energy sovereignty policies should adopt a broad view by also acting on energy demand and therefore on the quantities of mineral resources induced. ■