

Crise de l'approvisionnement en métaux et matériaux critiques : les chimistes peuvent-ils apporter des réponses ?

Depuis des temps immémoriaux, les ressources minérales ont toujours été convoitées : le sel, le silex, les pierres que l'on pouvait tailler ou polir, puis le cuivre à l'état natif, dès le IX^e millénaire av.J.-C., puis l'étain, avec la naissance de la métallurgie et de l'âge du bronze, puis le fer, dont on a su réduire les oxydes à haute température, mais aussi l'or, l'argent et les pierres précieuses. Tous ces matériaux faisaient déjà l'objet de trafics, d'échanges, de commerce sur de longues distances. Nécessaires à la survie puis au développement des communautés humaines, ces ressources se sont très vite révélées objets de convoitise, de conflits, de conquête. Au cours des âges, tout ceci s'est accentué, avec la découverte de grands gisements faciles à exploiter que se sont appropriés les grandes nations colonisatrices. Au XIX^e puis au XX^e siècles, le développement économique et industriel sans précédent, l'expansion démographique liée aux progrès de la santé, mais aussi les grands conflits mondiaux ont généré une consommation de ressources minérales équivalente à celle cumulée enregistrée de l'aube de l'humanité jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Le XXI^e siècle enregistre une croissance très soutenue de la demande, tant en quantité qu'en diversité.

Les transitions énergétiques et numériques vont grandement accentuer notre dépendance aux substances minérales

La transition énergétique vers des moyens de production décarbonés révèle plus que jamais la dépendance de nos technologies à une variété croissante de métaux, dont un certain nombre sont classifiés comme stratégiques ou critiques. Ainsi, l'approvisionnement en cuivre, en lithium, en cobalt, nickel ou terres rares – dont la consommation

augmente très significativement (*figure 1*) – fait l'objet de l'attention des médias, du grand public, et même enfin des pouvoirs publics !

Les industriels en aval des chaînes de valeur, qui avaient jusqu'à présent plutôt misé sur les marchés dans une économie mondialisée, se rendent compte de leur vulnérabilité, en particulier en Europe. Les chaînes de valeur ont été désertées depuis vingt ou trente ans, au profit en particulier de la Chine, qui contrôle plus de 80 % de l'approvisionnement en métaux, du traitement, du raffinage, de la transformation jusqu'à l'élaboration des produits finis (*figure 2*).

Même si notre planète recèle encore des ressources minérales en abondance, il devient de plus en plus difficile de se les approprier : les gisements les plus faciles à exploiter, superficiels et à forte teneur sont épuisés ; l'extraction des ressources minérales demande donc des efforts plus importants et produit des impacts environnementaux et sociaux de plus en plus difficiles à maîtriser, dans un contexte politique et géostratégique désormais très instable (*figure 3*).

Vers une reprise de l'exploitation minière en Europe et en France ?

Deux autres facteurs font évoluer considérablement l'attention à ces questions portée par les États, mais aussi les acteurs économiques et plus globalement nos sociétés. Tout d'abord les tensions géopolitiques ne cessent de s'aggraver et constituent une menace pour la sécurité d'approvisionnement, faisant réémerger des préoccupations de souveraineté. Ensuite, les enjeux environnementaux sont de plus en plus présents dans les décisions publiques, mais le grand public commence maintenant à prendre conscience que la transition

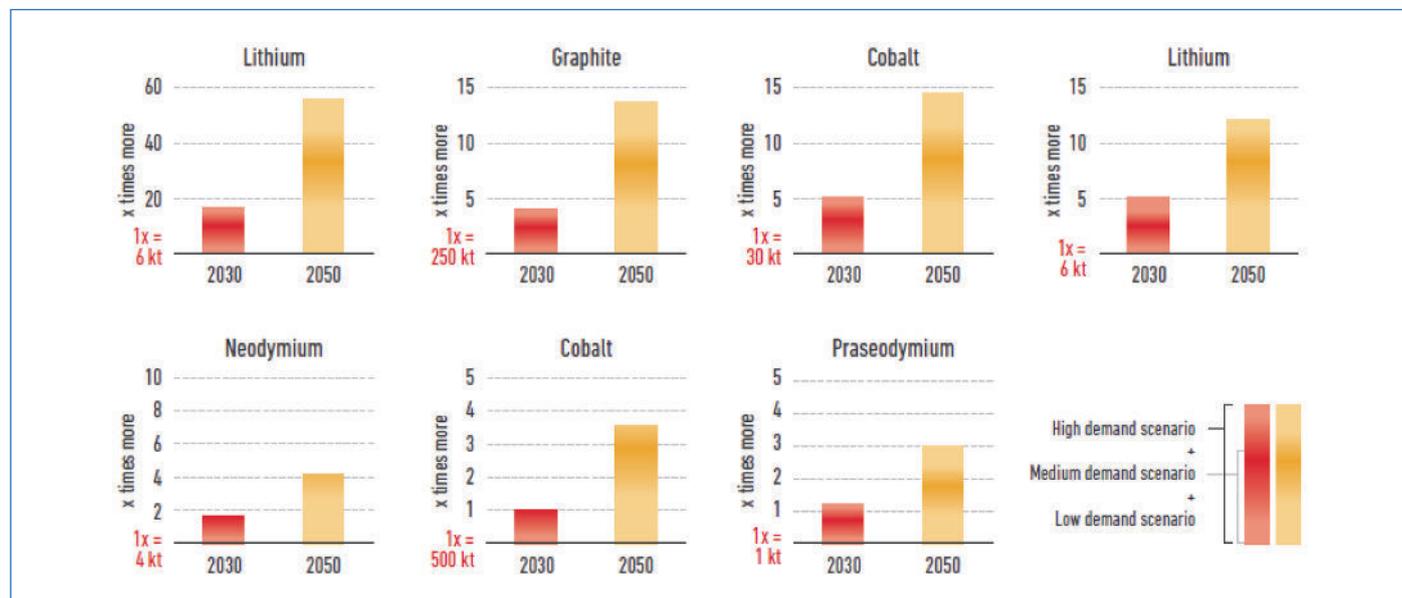


Figure 1 - Utilisation de matières premières critiques pour différentes technologies dans l'Union européenne en 2030 et 2050. Source : Commission européenne, 2020.

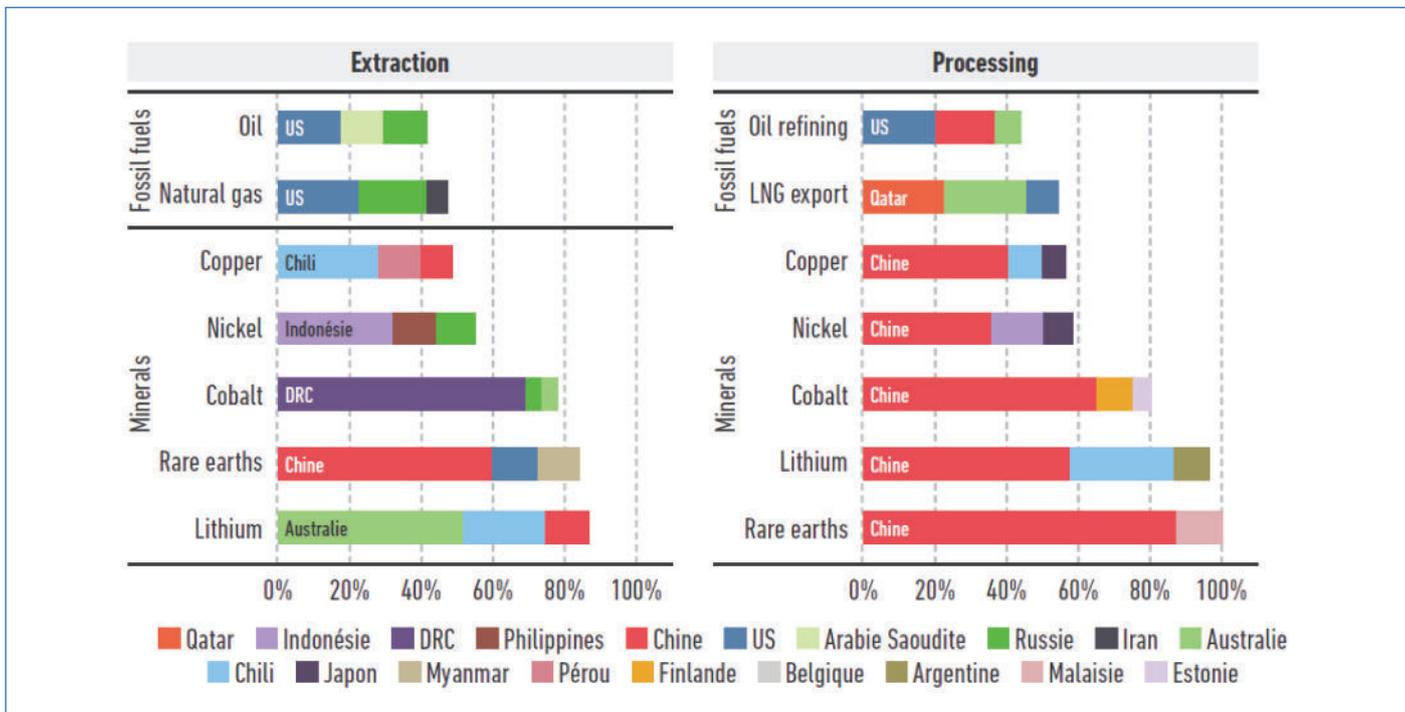


Figure 2 - Part des principaux pays dans l'extraction et la transformation des matières premières énergétiques (combustibles fossiles) et minérales. La prédominance de la Chine dans les opérations de transformation est très significative. Source : Agence internationale de l'énergie, 2021.

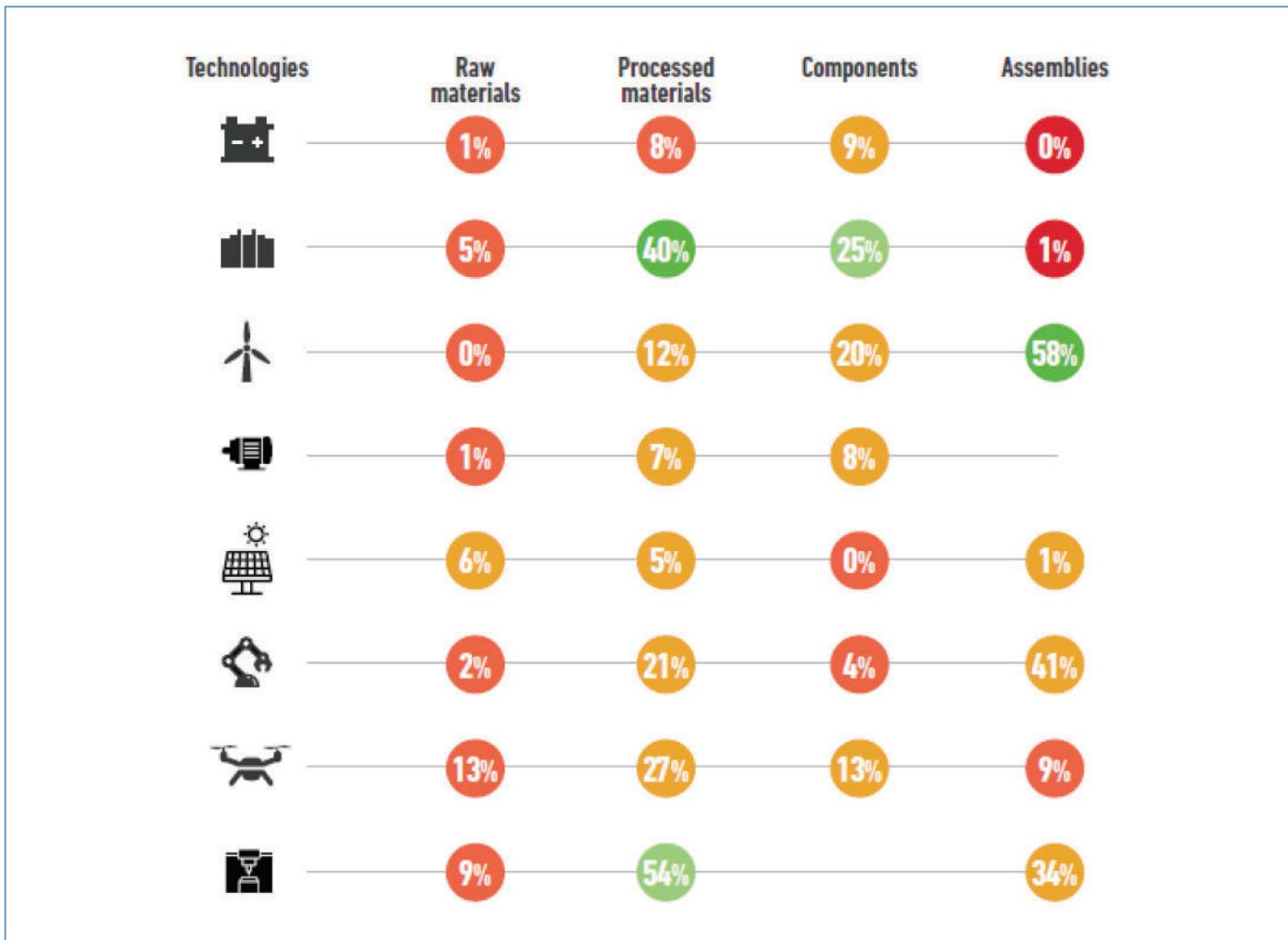


Figure 3 - Risques d'approvisionnement identifiés pour l'UE et parts de production de l'UE. Le pourcentage indique la part de l'UE dans la production mondiale. Les produits et technologies présentés ci-dessus (de haut en bas) sont les batteries lithium-ion, les piles à combustible, l'énergie éolienne, les moteurs électriques, la technologie photovoltaïque, la robotique, les drones et l'impression 3D. Les risques d'approvisionnement sont classés de rouge (très élevé) à vert (faible). Source : Commission européenne, 2020.

POTENTIEL MINIER DE LA MÉTROPOLE

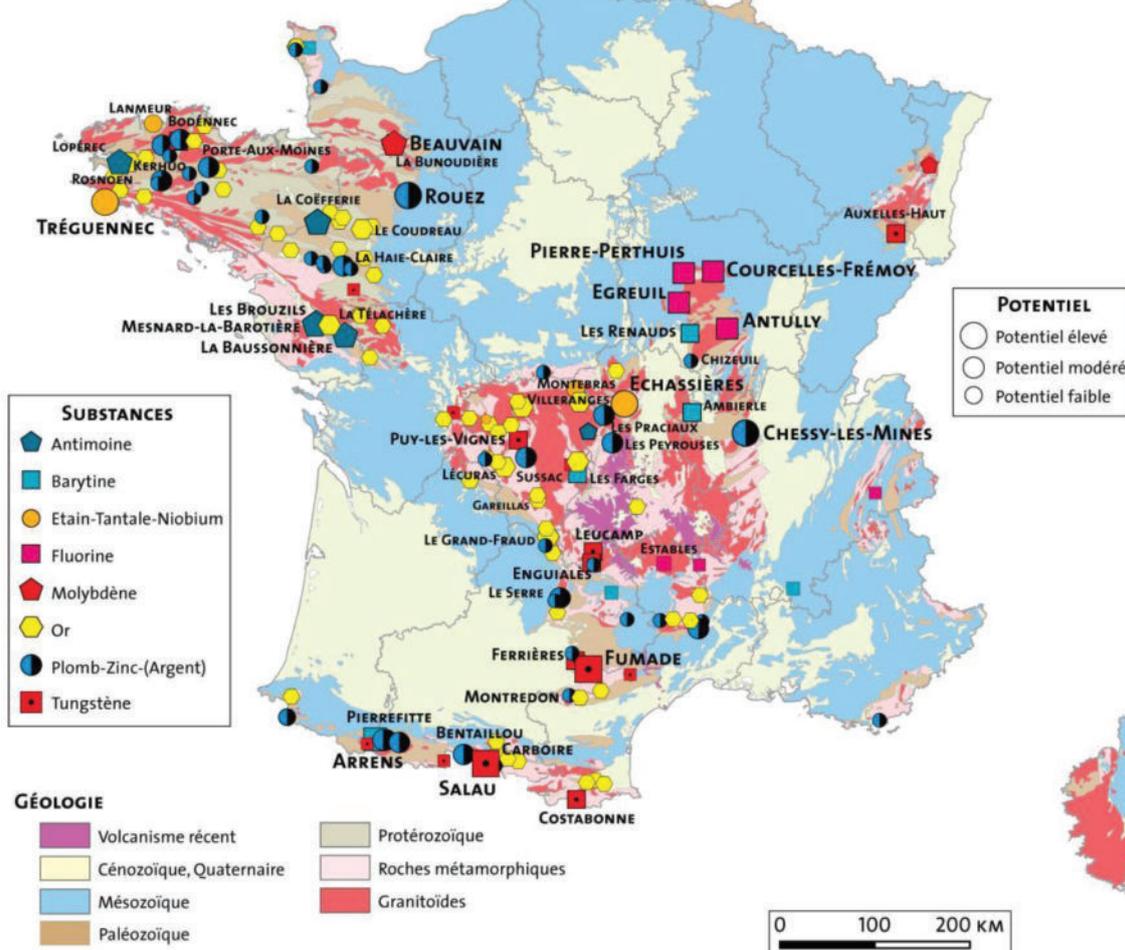


Figure 4 - Le potentiel du sous-sol français (d'après [1]).

vers des sources énergétiques décarbonées aura un coût environnemental lié aux besoins très fortement croissants de lithium, cobalt et nickel par exemple pour les batteries, et qu'il n'est pas raisonnable de faire supporter ces coûts environnementaux aux seuls pays souvent lointains qui assurent l'approvisionnement en métaux primaires. Les utilisateurs finaux n'ont souvent pas conscience du juste prix à payer (intégrant un retour équitable vers les populations locales, la gestion de l'après mine, la protection et restauration de l'environnement, etc.). On commence donc à imaginer qu'il serait éthiquement plus responsable pour les pays les plus gros consommateurs de montrer l'exemple, en exploitant d'abord les ressources présentes sur leur territoire, mais de manière responsable et soutenable. Ceci est bien évidemment valable pour l'Europe, dont la population est devenue très rétive à toute incursion dans le sous-sol pour rechercher ou exploiter des ressources qui, manifestement, pourraient répondre actuellement à bien des besoins. En effet, le sous-sol européen recèle de ressources minérales variées et souvent encore mal estimées, notamment à plus grande profondeur, faute d'investissement dans l'exploration minière depuis au moins une génération. Ceci est également vrai pour la France, dont le potentiel minier est significatif, et très certainement sous-estimé. On peut ainsi évoquer la présence en métropole de gisements pour certains

de rang mondial – tungstène, antimoine, or –, mais aussi de ressources susceptibles de devenir des réserves d'intérêt économique – lithium, plomb, zinc, germanium, gallium, niobium, tantale, étain, molybdène et cuivre [1] (figure 4).

Il ne faudra pas oublier les ressources minières secondaires dont l'exploitation peut se révéler à la fois économiquement rentable, et bénéfique pour réduire des impacts environnementaux, par exemple pour des résidus miniers sulfurés.

En résumé, face à cette tension croissante sur l'approvisionnement en ressources minérales, un certain nombre d'approches sont possibles, et souvent complémentaires. Par contre, c'est maintenant que doivent se décider et mettre en œuvre ces approches.

Quelles sont les pistes pour sécuriser nos approvisionnements ?

Il s'agit tout d'abord de relancer une politique minière responsable en renouant des partenariats avec des pays bien dotés et aspirant à ce que leurs ressources minières soient exploitées en préservant l'environnement, mais aussi en contribuant à un développement économique, social et technologique local. Ainsi, diverses initiatives visent à susciter le développement de chaînes de valeurs plus complètes dans les pays

miniers (raffinage, transformation et élaboration de produits finis) [2]. Des investissements lourds doivent évidemment être consentis par les clients en aval des chaînes de valeur, ce qui nécessite la mise au point d'instruments financiers mutualisés.

De nombreux pays européens, dont la France en particulier, se sont détournés de l'exploitation de leurs ressources minières primaires, pour des raisons économiques, et d'impacts environnementaux non maîtrisés pour les exploitations anciennes. Il va être difficile de convaincre nos sociétés de redémarrer l'exploitation minière, alors que l'Europe recèle encore de nombreux gisements connus, et à découvrir, notamment à des profondeurs supérieures à 500 m, non explorées.

Les mines ont généré des quantités importantes de résidus, qui ont deux propriétés importantes : ils contiennent encore des quantités parfois importantes de substances d'intérêt, mais ils peuvent générer des impacts environnementaux, notamment les résidus miniers riches en sulfures, dont l'oxydation à l'air libre génère une acidification des effluents, favorisant également la dissémination des métaux dont certains sont toxiques. Ces sites, surveillés en France par le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) pour le compte de l'État, pourraient bénéficier de programmes de traitement définitifs, permettant de récupérer les métaux valorisables et d'éliminer les sulfures, générateur du phénomène de drainage minier acide. Le BRGM a ainsi développé en Ouganda une usine qui a permis de traiter des millions de tonnes de résidus sulfurés d'une mine de cuivre, tout en récupérant 10 000 tonnes de cobalt par un procédé de biolixiviation [3].

Le recyclage des métaux, une nécessité absolue, mais loin de couvrir les besoins sans cesse croissants

L'UNEP (Programme des Nations unies pour l'environnement) a estimé en 2011 le taux de recyclage de nombreux métaux [4] (figure 5). Ces estimations faites il y a plus de dix ans ont très peu évolué selon l'IEA (Agence internationale de l'énergie) [5]. S'il est significatif pour les métaux usuels et les métaux précieux (mais loin d'atteindre 100 %), il reste encore beaucoup de progrès pour les métaux mineurs et les métaux émergents, dont moins de 1 % est recyclé. Il ne faut pas non plus perdre de vue que pour un métal dont la demande ne cesse de croître année après année, le recyclage ne peut pas couvrir les besoins. Une fois la demande stabilisée, il faut ensuite que les objets à recycler arrivent en fin de vie.

Pour accélérer le développement du recyclage, il faut organiser plus systématiquement la collecte, freiner, voire prohiber l'exportation de produits à recycler, et inclure dans la réglementation des obligations d'utiliser une certaine proportion de matériaux recyclés (c'est envisagé par l'Europe pour les batteries destinées aux véhicules électriques). On peut aussi insister sur la nécessité d'une écoconception systématique optimisant le recyclage et la récupération en fin de vie, ce qui est loin d'être généralisé.

Les chimistes doivent être au rendez-vous pour le recyclage de demain

La R&D sur les procédés de recyclage pour récupérer des métaux dispersés, parfois en faibles teneurs dans des matrices complexes, doit s'accélérer mais aussi bénéficier des acquis

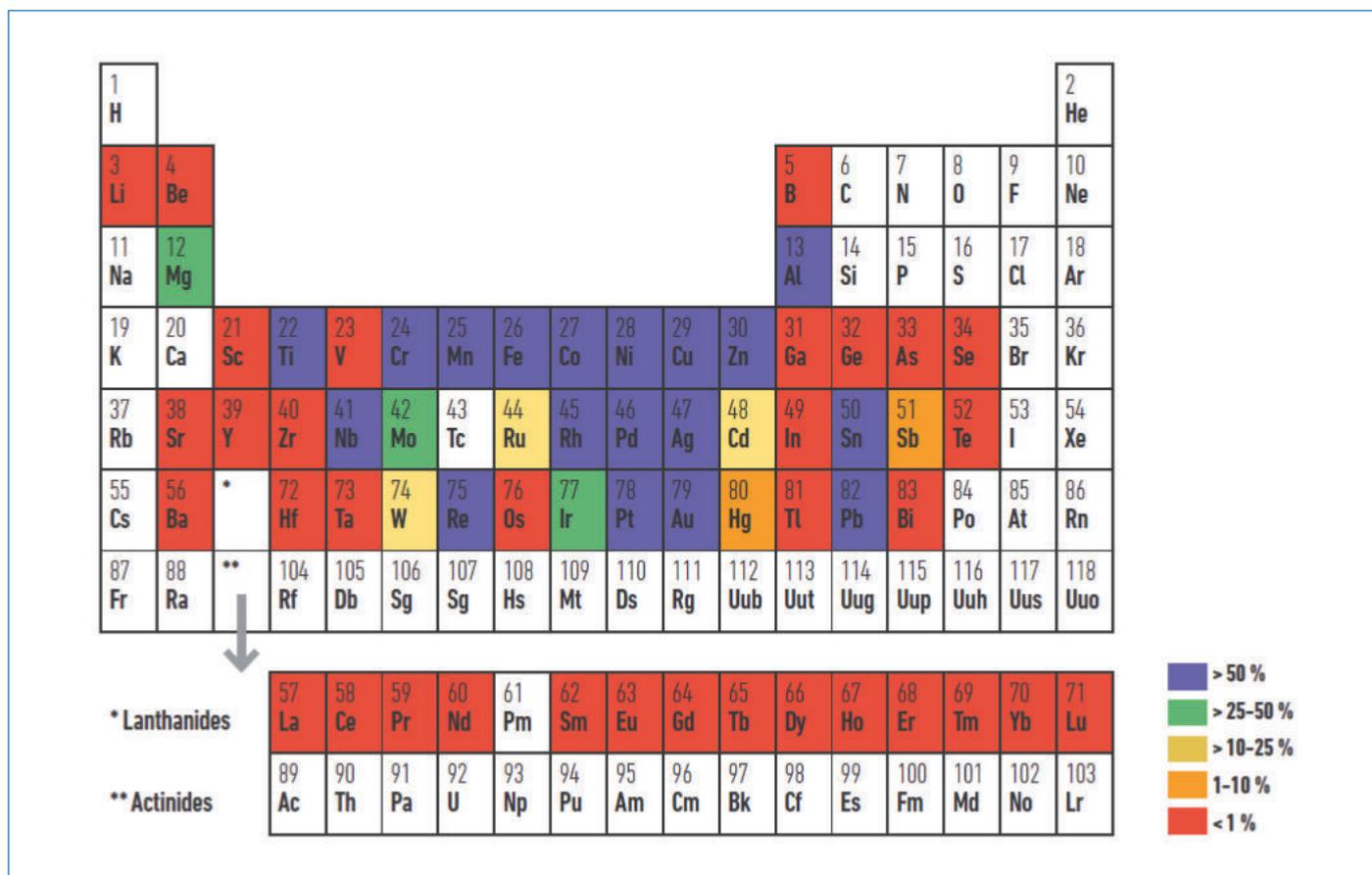


Figure 5 - Taux de recyclage des métaux estimés par l'UNEP en 2011 : à part quelques métaux de transition et les métaux précieux, les pourcentages de recyclage sont encore très faibles (d'après [4]).

For every 100,000 iPhone devices, Daisy has the potential to recover:

• Aluminum	1900 kg
• Gold	0.97 kg
• Silver	7.5 kg
• Rare earth elements	11 kg
• Tungsten	93 kg
• Copper	710 kg
• Palladium	0.10 kg
• Tin	42 kg
• Cobalt	770 kg
• Tantalum	1.8 kg

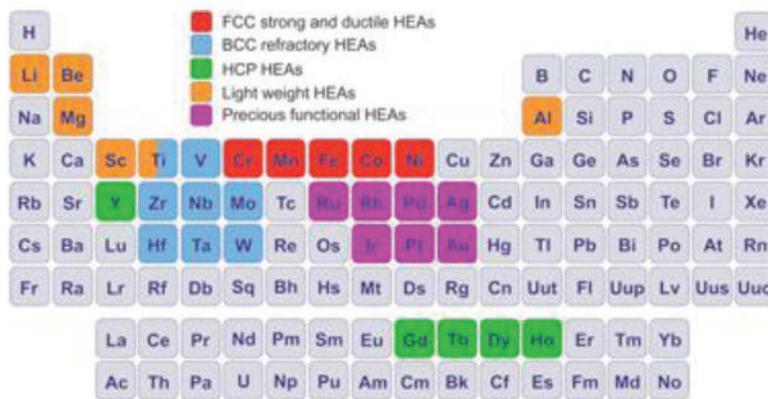


Figure 6 - Métaux récupérés en recyclant des téléphones portables (à gauche), et métaux utilisés dans divers types de HEA (« high entropy alloys »), alliages métalliques à haute entropie. Le recyclage pourrait déboucher sur de nouvelles utilisations des métaux extraits... (d'après [6-7]).

et savoir-faire développés en hydrométallurgie, en particulier hérités du traitement et recyclage des combustibles nucléaires. La France a un savoir-faire et une expérience industrielle qu'il importe de valoriser rapidement.

On peut aussi réfléchir à de nouvelles approches pour conférer aux produits issus du recyclage plus de valeur ajoutée. En effet, les métaux issus du recyclage risquent fort de ne pas être compétitifs face aux mêmes métaux issus de sources primaires via des procédés industriels éprouvés, produits dans des pays à faible coût de main d'œuvre. On peut ainsi imaginer de mélanger des flux de déchets pour alimenter des « raffineries » pour métaux, en aboutissant à des produits à très haute valeur ajoutée. Ainsi, les HEA (« high entropy alloys ») permettent d'obtenir des propriétés mécaniques extraordinaires à haute température. Si l'on rapproche les flux de métaux qui seraient issus de smartphones (figure 6, à gauche) des métaux constituant les HEA (figure 6, à droite) [6-7], on peut noter une correspondance assez troublante...

L'autre manière de générer des produits à plus haute valeur ajoutée est de systématiser le recyclage en « boucles courtes », permettant de récupérer directement un maximum des alliages ou formes fonctionnelles dans lesquelles sont incorporés les métaux d'intérêt. L'exemple de la récupération des métaux constituant les aimants permanents est intéressant à cet égard : projet VALOMAG, financé par l'EIT Raw Materials [8]. Enfin, une autre approche de boucles courtes serait de coupler recyclage et fabrication, en optimisant les procédés de recyclage pour obtenir une compatibilité maximale avec les procédés d'élaboration, en particulier de nano-fabrication ou de fabrication additive.

Les chimistes et spécialistes de génie des procédés vont avoir du pain sur la planche pour imaginer les solutions de demain. Mais d'autres défis attendent nos scientifiques. Certains métaux critiques ne sont pas recyclés parce que leur usage est essentiellement dispersif, c'est-à-dire qu'ils sont en quelque sorte consommés et dispersés dans les résidus (le tungstène pour les outils de coupe, les lanthanides dans les produits de contraste en imagerie médicale), les effluents pouvant d'ailleurs impacter l'environnement. Les analyses de cycle de vie des métaux, renseignant de manière systématique les flux et stocks au cours des différentes phases d'utilisation de métaux critiques ont beaucoup progressé et permettent de

mieux diagnostiquer les points de progrès pour aboutir à des produits et procédés plus économes en métaux critiques.

Imaginer des produits ou procédés moins gourmands en métaux critiques

Il existe évidemment une alternative plus radicale, qui est la substitution pour des matériaux ou procédés mettant en œuvre des métaux à haute criticité. On pense évidemment aux batteries Li-ion, dont les métaux critiques principaux sont le lithium, le cobalt et le nickel. Les batteries Na-ion sont en plein développement dans un contexte de compétition mondiale acharnée. Si la substitution du lithium par le sodium peut régler le problème de la disponibilité du lithium, il n'en reste pas moins que les anodes restent encore à améliorer, et que l'utilisation d'autres composés métalliques est proposée pour composer les anodes (titanates), ou pour en améliorer les propriétés interfaciales (limitation de la formation de dendrites), comme des alliages NiSb... Les cathodes, de leur côté, voient se développer des formulations à base d'oxydes mixtes incorporant les métaux les plus abondants possibles, comme le fer ou le manganèse, voire des polyanions, mais les performances électrochimiques ne sont pas toujours au rendez-vous.

En parallèle, la mise au point de supercondensateurs nanostructurés à base de nanotubes de graphène permet d'améliorer les performances des systèmes de stockage d'énergie. Mais la tentation d'utiliser tout le tableau périodique reste permanente. Ainsi, les MXenes, carbures ou nitrures de métaux de transition structurés en 2D, permettant une grande souplesse d'intercalation, font l'objet de recherches très actives. Il y aura donc toujours un compromis à trouver entre la performance, le prix et la disponibilité des composants.

D'autres exemples peuvent être trouvés dans le domaine de l'aéronautique : ainsi les composites à matrice céramique sont en voie de remplacer des alliages métalliques à haute performance dans les moteurs d'avion de nouvelle génération, en permettant de surcroît des économies de carburant en raison de gains de poids. De même, la R&D pour limiter, voire abandonner, l'emploi de terres rares dans les aimants permanents est très active, ainsi que le développement de moteurs pour véhicules électriques dépourvus d'aimants permanents.

La traçabilité : concevoir des méthodes d'identification des sources et voies de traitement

Enfin, que ce soit à partir de sources primaires ou secondaires, il importe de favoriser l'utilisation de métaux issus de sources contrôlées et responsables, en développant des méthodes de traçages chimiques et isotopiques. Desaulty *et al.* illustrent les développements méthodologiques conduits avec succès pour tracer l'origine du lithium utilisé dans les batteries [9].

De la nécessité d'agir sans tarder

En guise de conclusion, la prise de conscience de la crise d'approvisionnement en métaux critiques est maintenant partagée, en particulier par les industriels et les pouvoirs publics, et on voit apparaître des signes de mobilisation. Il est impératif d'agir sans tarder, car les cycles de développement des projets industriels sont encore longs par rapport à l'imminence des échéances qui nous attendent pour la transition énergétique ou la transition numérique. Les chimistes des matériaux, les électrochimistes, les spécialistes de catalyse, de chimie analytique, de chimie des procédés, sont très attendus pour un renouvellement de l'hydrométallurgie pour le recyclage en France et en Europe, pour imaginer les solutions sobres en métaux critiques pour les batteries, les grands procédés catalytiques de la chimie et les pots catalytiques, les moteurs d'avion, le numérique, et pour tracer les sources et contribuer à la réduction des impacts environnementaux.

Références

- [1] www.mineralinfo.fr/fr/ressources-minerales-france-gestion/potentiel-du-sous-sol-francais
- [2] AfricaMaVal, 2022, <https://africamaval.eu>
- [3] P. d'Hugues, C.G Bryan, A.-G. Guezennec, D. Morin, Biohydrometallurgy – an industrial reality for the treatment of low grade resources: the example of the treatment of cobalt-rich sulphidic tailings and residues at Kasese site in Uganda, In *Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills*, 2019, 79-85, European Commission, Joint Research

- Centre, *Recovery of critical and other raw materials from mining waste and landfills: state of play on existing practices*, G. Blengini, F. Mathieux, L. Mancini, M. Nyberg, H. Viegas (eds), Publications Office, 2019, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/600775>
- [4] www.unep.org/resources/report/recycling-rates-metals-status-report
 - [5] www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions
 - [6] www.apple.com/environment/pdf/Apple_Environmental_Responsibility_Report_2018.pdf
 - [7] Z. Li, A. Ludwig, A. Savan, H. Springer, D. Raabe, Combinatorial metallurgical synthesis and processing of high-entropy alloys, *J. Mater. Res.*, 2018, 33, p. 3156-69.
 - [8] www.valomag.tudelft.nl
 - [9] A.-M. Desaulty *et al.*, Tracing the origin of lithium in Li-ion batteries using lithium, *Nature Commun.*, 2022, 13, 4172, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31850-y>

Bibliographie pour en savoir plus

- Académie des sciences et Académie des technologies : Stratégie d'utilisation des ressources du sous-sol pour la transition énergétique française. Les métaux rares. Rapport commun des deux académies coordonné par G. de Marsily et B. Tardieu, mai 2018, www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/rc_transition_energie_0718.pdf
- BRGM, Métaux critiques, concilier éthique et souveraineté, *Géosciences*, 2022, 26, www.brgm.fr/fr/actualite/revue/geosciences-ndeg26-metaux-critiques-concilier-ethique-souverainete
- P. Christmann, G. Lefèvre, Trends in global mineral and metal criticality: the need for technological foresight, *Mineral Economics*, 2022, DOI 10.1007/s13563-022-00323-5
- P. Toulhoat, Interview sur le Portail de l'Intelligence économique, 2019, <https://portail-ie.fr/analysis/2178/conversation-lintelligence-minerale-du-brgm-interview-de-pierre-toulhoat-partie-1>, <https://portail-ie.fr/analysis/2188/conversation-lintelligence-minerale-du-brgm-interview-de-pierre-toulhoat-partie-2>
- P. Toulhoat, J.-P. Chevalier, C. Poinssot, P. Christmann, C. Gendron, B. Jacquemin, P. Varin, Sécurisation des matières premières, Les séances thématiques de l'Académie des technologies, 2022, www.academie-technologies.fr/publications/securisation-des-matieres-premieres

Pierre TOULHOAT,

Membre de l'Académie des technologies, président du pôle « Environnement et impact du changement climatique ».

* pierre.toulhoat@bbox.fr



5 décembre 2022
Maison de la Chimie, Paris

Deuxièmes Rencontres académie-industrie
du Comité National de la Chimie

Le recyclage chimique en science des matériaux :
vers une économie circulaire

Inscription gratuite et obligatoire