

# TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET RECYCLAGE DES MÉTAUX : QUELS ENJEUX ?

Sophie Le Roy

## Parties des programmes de physique-chimie associées

- ▶ Programme de physique-chimie de seconde générale et technologique – Constitution de la matière de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique, A) Description et caractérisation de la matière à l'échelle macroscopique
- ▶ Programme de sciences physiques et chimiques en laboratoire de première STL – Chimie et développement durable, Sécurité et environnement
- ▶ Programme de physique-chimie et mathématiques de première STI2D – Matière et matériaux, Propriétés des matériaux et organisation de la matière
- ▶ Programme d'innovation technologique et d'ingénierie et développement durable de première et d'ingénierie, innovation et développement durable de terminale STI2D – 1. Principes de conception des produits et développement durable, 1.5. Approche environnementale
- ▶ Programme d'enseignement scientifique de terminale générale – Thème 2 : Le futur des énergies

**Mots-clés :** transition énergétique, métaux, terres rares, métallurgie, extraction, mine, criticité, recyclage

## INTRODUCTION

2050 : objectif « neutralité carbone » en France<sup>1</sup>. Une transition énergétique et numérique s'impose pour limiter drastiquement les émissions de gaz à effet de serre et le changement climatique. Cette transition, adossée au déploiement des énergies renouvelables et de l'électromobilité, conduit à utiliser davantage de métaux (acier, aluminium, cuivre, mais aussi indium, lithium, cobalt, terres rares...) dont le rôle devient stratégique. Comment, face à une demande croissante, limiter notre dépendance à certains métaux ? Quels sont les enjeux pour l'industrie métallurgique et plus particulièrement celle du recyclage ?

## CONSOMMATION DE MÉTAUX DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

### Des besoins croissants

De nombreux domaines requièrent l'utilisation de métaux : les transports, l'énergie (nucléaire, éolienne, solaire, etc.), la construction (structures métalliques, circuits électriques, etc.) ou les nouvelles technologies (ordinateurs, smartphones, etc.). La production d'électricité à partir des énergies renouvelables reposant par exemple sur les éoliennes ou les panneaux photovoltaïques nécessite une grande diversité de métaux (**tableau 1**).

1. Loi énergie-climat : <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/loi-energie-climat>

TECHNOLOGIE	MÉTAUX/TERRES RARES MIS EN JEU
Éolien	cuivre, dysprosium, néodyme, terbium
Solaire photovoltaïque	cuivre, cadmium, gallium, indium, silicium
Véhicules électriques	cobalt, cuivre, lanthane, lithium, nickel
Numérique	gallium, germanium, or, platine, tantale

Tableau 1. Majorité des métaux utilisés lors de la transition écologique et numérique.

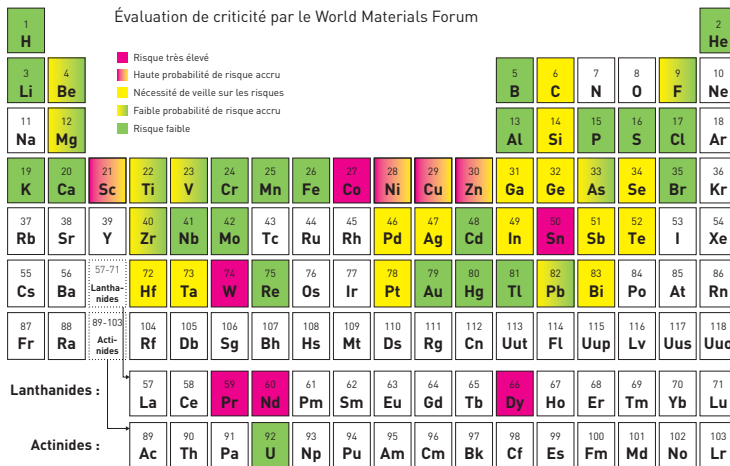


Figure 1. Tableau périodique et criticité – Source : J.-C. Bernier.

Du fait des transitions énergétique et numérique, la demande en métaux est en forte augmentation. L’approvisionnement de nombre d’entre eux devient critique. Le tableau de Mendeleïev (figure 1) présente des cases de certains éléments allant du rouge/violet au jaune en fonction de leur difficulté d’approvisionnement, que l’on appelle la criticité. Il fait apparaître des risques particulièrement élevés pour le cobalt, l’étain, le tungstène et des terres rares.

Intéressons-nous aux véhicules électriques : ils contiennent environ 5 fois plus de métaux critiques qu’un véhicule thermique, parmi lesquels le cuivre, le nickel, le manganèse et le lithium (figure 2, à gauche). Parmi les systèmes de production d’énergie renouvelable, les éoliennes (en particulier les éoliennes offshore<sup>2</sup>) consomment une quantité élevée de minerais différents (figure 2, à droite). Les outils numériques de notre quotidien (ordinateurs, téléphones portables, etc.) ne contiennent, eux, que de faibles quantités de métaux (entre 0,01 et 0,02 %).

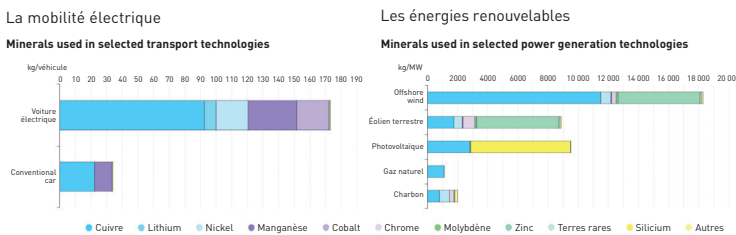


Figure 2. La transition énergétique accélère la demande en matériaux sensibles – Source : J.-C. Bernier. Diagramme de gauche : minerais utilisés dans certaines technologies de transport (voiture électrique/voiture thermique en kg de minerais contenu par véhicule). Diagramme de droite : minerais utilisés dans certaines technologies de production d’électricité (en kg de minerais par unité de puissance en mégawatt).

Mais compte tenu de leur développement, on atteint des centaines de tonnes de métaux mis en jeu (figure 3).

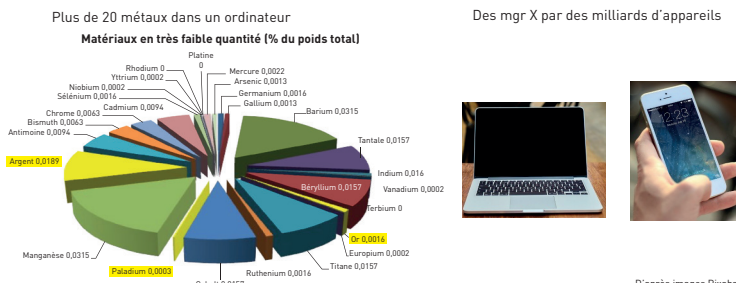


Figure 3. Les métaux de haute technologie pour les TIC (même si les pourcentages sont faibles dans un appareil, multiplié par des milliards d’appareils, la somme des masses devient conséquente) – Source : J.-C. Bernier.

La demande en métaux va augmenter en quantité et en diversité. L’Agence Internationale de l’Énergie (AIE) prévoit ainsi des besoins en 2040 multipliés par 42 pour le lithium et par 7 pour les terres rares (figure 4). Ces dernières sont en effet des éléments clés pour la fabrication d’aimants permanents de grande puissance présents dans les éoliennes offshore ou des moteurs électriques de meilleure performance.

2 Éoliennes offshore : éoliennes en mer.

Au-delà des besoins croissants liés aux transitions en cours, plusieurs raisons peuvent expliquer la criticité de certains éléments chimiques :

- ▶ une diminution de la concentration des minerais ;
- ▶ des coûts d'investissement et de traitement des minerais accrus ;
- ▶ une concentration de la production limitée à quelques zones géographiques ;
- ▶ des problèmes d'ordre géopolitique ;
- ▶ des freins sociologiques à l'implantation de nouvelles mines.

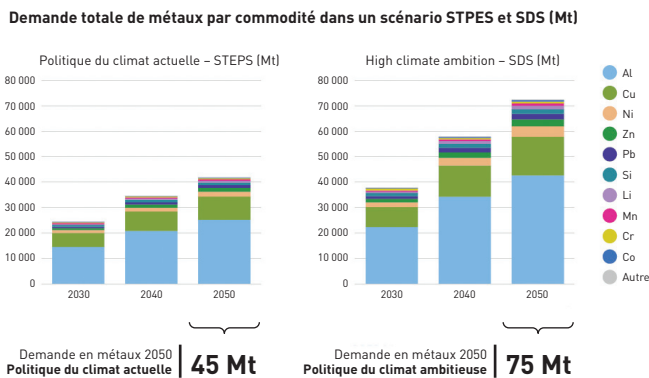


Figure 4. Demande totale par commodités selon 2 scénarios de l'AIE – Source : P. D'Hugues.

Les extractions minières nécessaires pour répondre à cette demande accrue sont en nette hausse : selon l'OCDE<sup>3</sup>, elles ont doublé depuis 1990 et la consommation mondiale pourrait augmenter de 40 % d'ici 2040 et de près de 90 % d'ici 2060 par rapport à 2017.

### Des ressources sous tension

Les prévisions de demande pour 2030 et 2050 (figure 5) montrent une multiplication de la demande de matières premières critiques avec des facteurs de multiplicité de 2 à 15 pour des échelles de 1 kilotonne à 250 kilotonnes.

Ces prévisions amènent à se demander si les réserves permettront de satisfaire la demande et/ou les besoins. En effet, on constate un appauvrissement des minerais : les teneurs en minerais exploitables s'amenuisent. Le cas du nickel en est un exemple : la teneur du minerai est passée d'environ 6-8 % au début du XX<sup>e</sup> siècle à 1,5-2 % actuellement (figure 6).

Cet épuisement des ressources a des conséquences sur l'extraction. Les coûts d'exploitation augmentent car il faut aller chercher plus en profondeur dans les sols et enrichir par hydrométallurgie<sup>4</sup> des quantités croissantes de minerais de moins en moins concentrés. Le risque est d'atteindre la barrière minéralogique, c'est-à-dire la taille limite à partir de laquelle il n'est plus possible d'exploiter une source d'un point de vue technique, énergétique et économique.

Dans un souci grandissant de protection de l'environnement, une part conséquente de l'activité minière, dont celle des terres rares, a été délocalisée vers des pays en voie de développement. Les gisements exploités

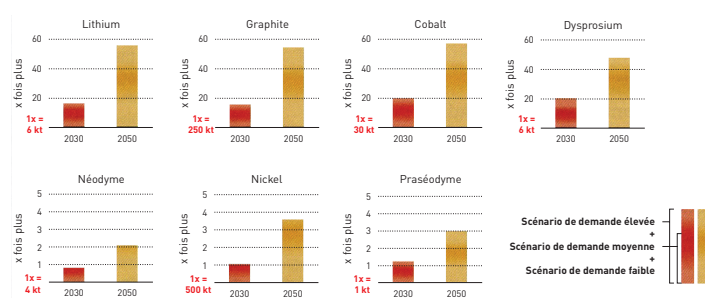


Figure 5 Prévisions des augmentations de la demande de matières premières critiques pour 2030 et 2050 dans divers scénarios de demandes fortes ou moins fortes à l'échelle des 25 futures années – Source : J.-C. Bernier.

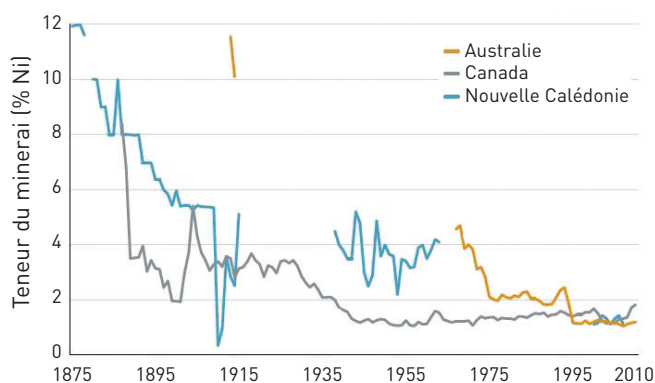


Figure 6. L'appauvrissement des minerais : cas du nickel – Source : J.-C. Bernier.

3 Organisation de Coopération et de Développement Économiques.

4 Hydrométallurgie : technique d'extraction des métaux qui comporte une étape où le métal est solubilisé pour permettre sa purification.

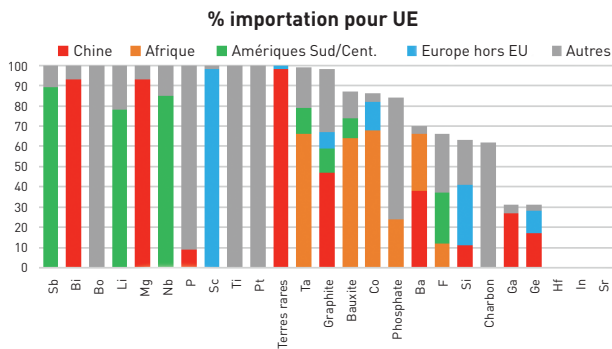
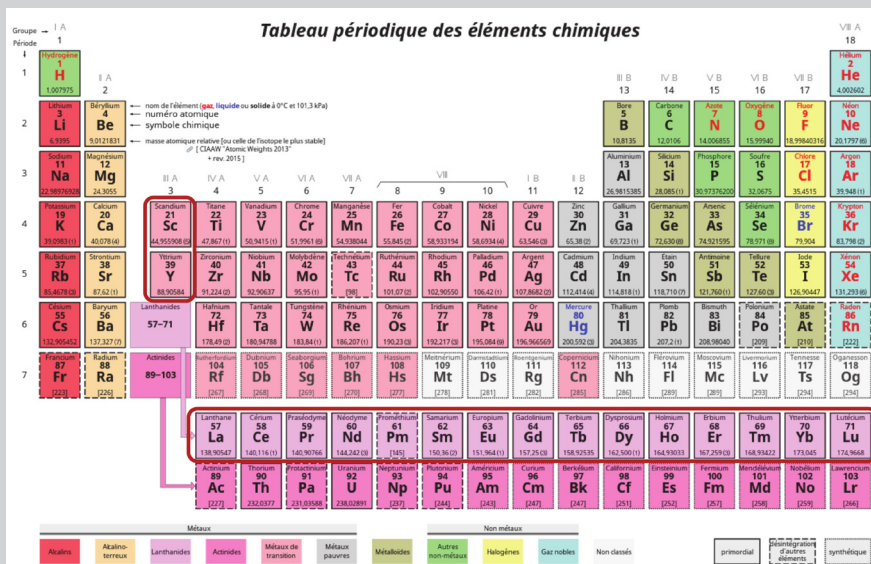


Figure 7. Dépendance européenne aux importations – Source : P. D'Hugues.

se trouvent concentrés dans un nombre restreint de pays, ce qui génère des risques géopolitiques et de sécurité d'approvisionnement. L'Europe dépend ainsi à plus de 50 % des importations sur une vingtaine de substances stratégiques (figure 7). L'hégémonie de la Chine s'étend même à 99 % des importations en terres rares. Elle a par ailleurs choisi de développer une stratégie de maîtrise complète de la chaîne de valeur des terres rares de leur extraction à leur utilisation pour la fabrication d'aimants permanents<sup>5</sup>. La Chine vend donc des produits de plus en plus transformés pour augmenter leur valeur ajoutée, se plaçant ainsi comme leader sur le marché des énergies renouvelables et des véhicules électriques.

Les risques géopolitiques liés à la stabilité politique, la fiabilité ou la qualité de la gouvernance des pays producteurs contraignent fortement les approvisionnements français et européens en métaux de la transition énergétique.

### Focus sur les terres rares



La famille des terres rares comporte 17 éléments du tableau périodique des éléments, dont 15 appartiennent à la famille des lanthanides, auxquels on ajoute l'yttrium et le scandium (voir éléments encadrés en rouge ci-contre).

Ce ne sont pas des terres, la plupart étant des matériaux brillants à l'éclat argenté, souvent malléables, et leur rareté n'est que relative. En effet, on les trouve partout

sur Terre, mais disséminés en très faible quantité, à l'inverse de certains métaux présents en forte concentration dans des gisements massifs. Ils sont souvent présents en faible pourcentage dans des minerais contenant d'autres métaux d'exploitation majeure (Al, Cu, Fe...) et donc difficilement extraits.

On les trouve dans les grandes régions d'extraction minières (Australie, Canada, États-Unis, Afrique du Sud, etc.) mais c'est la Chine qui assure l'essentiel de leur production mondiale.

Elles sont utilisées dans de nombreux domaines pour la fabrication d'objets de haute technologie : batteries de voitures électriques et hybrides, LED, puces de smartphone, écrans d'ordinateurs portables, dispositifs produisant de l'énergie renouvelable comme les panneaux photovoltaïques et les éoliennes, capteurs de sonars ou radars, etc.

Pour réduire la dépendance aux métaux, à leur importation et réduire l'impact environnemental de l'extraction et du raffinage, il est nécessaire de promouvoir des pratiques minières responsables et de développer de nouvelles techniques plus efficaces et moins polluantes.

5 <https://www.mineralinfo.fr/fr/ecomine/marche-des-terres-rares-2022-filieres-dapprovisionnement-aimants-permanents>

## DE LA PRODUCTION PRIMAIRE AU RECYCLAGE : LE RÔLE DES CHIMISTES

### Limiter la dépendance et améliorer les procédés d'extraction

Pour limiter la dépendance aux importations, il faudrait relocaliser l'activité minière sur le sol européen, voire français. Le BRGM<sup>6</sup> est chargé d'actualiser l'inventaire minier du territoire national afin de mettre en évidence des gisements<sup>7</sup>.

La France dispose de ressources géologiques (figure 8) mais elle est confrontée à l'absence d'industrie minière capable de répondre à la demande.

Parmi d'autres, un projet d'extraction du lithium existe dans l'Allier. Il pourrait devenir réalité en 2026-2027.

Toutefois, pour pouvoir ouvrir de nouvelles mines, il faut prendre en compte leur impact environnemental et sociétal, afin que les installations soient acceptées par les riverains, et plus globalement la société. Des points à considérer sont :

- ▶ l'impact climatique lié aux dépenses énergétiques de fonctionnement ;
- ▶ les conséquences sur l'eau, le sol, la biodiversité, les paysages ;
- ▶ la gestion des déchets.

L'énergie nécessaire à l'extraction et au traitement des minerais est certainement le point le plus important à mettre en avant dans l'empreinte environnementale de l'activité minière. La figure 9 montre la quantité d'énergie engagée à chacune des phases de production du cuivre pour une concentration du métal dans le minerai de 0,5 %, principalement pour le traitement et l'extraction du minerai. On peut également constater que les dépenses énergétiques pour les « grands métaux » (zinc, plomb, cuivre (133 MJ/kg)... ) sont moindres devant celles nécessaires pour les métaux rares ou précieux, comme l'or.

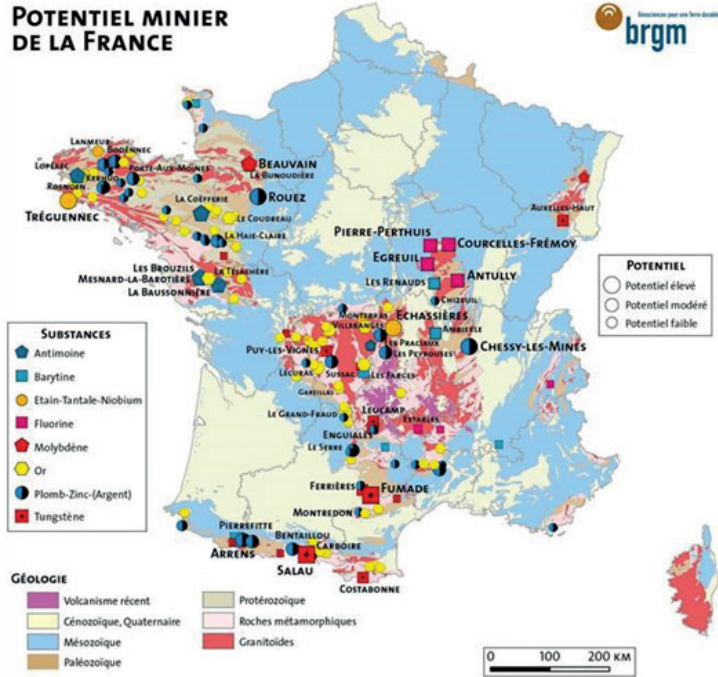
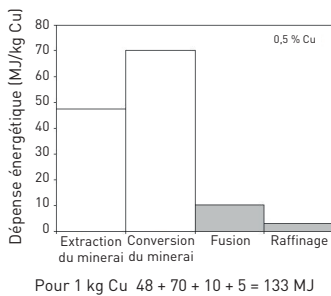


Figure 8. Carte des ressources minières d'intérêt potentiel connues en France métropolitaine – Source : P. D'Hugues.

Répartition des dépenses énergétiques



Quelques exemples

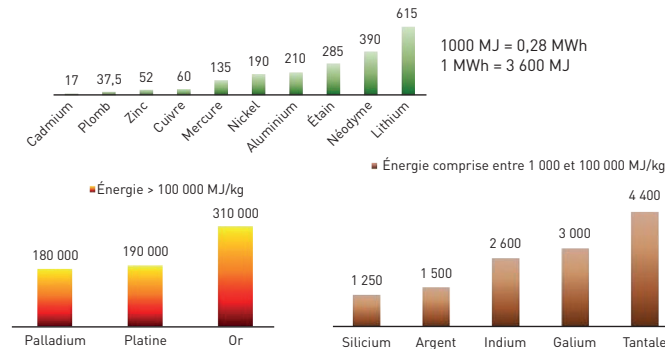


Figure 9. Énergie nécessaire pour obtenir les métaux – Source : J.-C. Bernier.

6 Bureau de Recherches Géologiques et Minières : service géologique national, le BRGM est l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol dans une perspective de développement durable.

7 <https://www.brgm.fr/fr/actualite/actualite/brgm-publie-atlas-substances-minieres-france-metropolitaine>

Des projets de recherche et développement sont en cours au niveau industriel. Ils portent sur la mise au point de process moins énergivores en gaz et/ou électricité, moins consommateurs d'eau et qui permettent de valoriser les déchets miniers.

L'utilisation de bactéries, grâce à la biolixiviation<sup>8</sup>, permet de valoriser les déchets d'extraction minière à trop faible teneur en métaux pour être traités par la voie chimique classique. Elle est par exemple utilisée dans des minerais comportant moins de 0,4 % de cuivre (figure 10). Le BRGM travaille à la mise au point de nouvelles techniques hydrobioméallurgiques pour d'autres déchets miniers.



- Des bactéries extrêmophiles (*Thiobacillus ferrooxidans* ou *thiooxidans*) à des pH 2 et température 30/35 °C se développent
- Les bactéries catalysent l'oxydation par l'oxygène  

$$\text{CuFeS}_2 + 4\text{O}_2 = \text{Cu}^{2+} + \text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-}$$
- Minerais concassés en tas la biolixiviation permet sur un minerai faible teneur 0,4 % de Cu de récupérer 200 t/jour de Cu

Figure 10. Valorisation de déchets miniers par biolixiviation – Source : J.-C. Bernier.

Le lithium est également l'objet du développement de nouveaux procédés qui limitent la consommation d'eau. L'un d'entre eux, mis au point par l'entreprise Eramet et l'IFP Énergies Nouvelles, fait appel à des résines échangeuses d'ions<sup>9</sup> pour traiter les saumures issues des salars d'Amérique du Sud<sup>10</sup>. En France, Eramet exploite et développe ce type de procédé pour extraire du lithium à partir des saumures géothermales d'Alsace. Les premières analyses laissent espérer pouvoir couvrir ainsi près de 10 % des besoins en lithium, en France et en Allemagne.

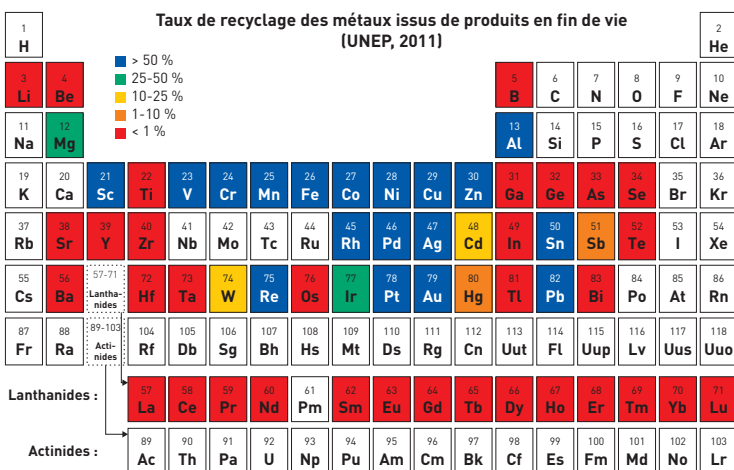


Figure 11. Le recyclage des métaux – Source : J.-C. Bernier.

Des progrès sont nécessaires dans ce domaine. En effet, d'après le *Raw Materials Scoreboard* de la Commission européenne<sup>11</sup>, moins de 50 % des métaux sont actuellement recyclés. Sur la figure 11, les éléments apparaissant en bleu sont recyclés à plus de 50 %, ceux en rouge, comme le lithium, étant recyclés à moins de 1 % alors qu'ils sont pour beaucoup importants pour le secteur du numérique.

Des difficultés existent pour la mise en œuvre du recyclage des produits en fin de vie :

- ▶ identifier les différents métaux présents ;
- ▶ séparer les métaux présents, parfois sous forme d'alliages complexifiant le processus et augmentant les coûts.

8 Biolixiviation : procédé biotechnologique de métallurgie extractive qui repose sur l'oxydation chimique des minéraux sulfurés en milieu sulfurique acide.

9 Résines échangeuses d'ions : substances granulaires insolubles comportant dans leur structure macroporeuse des ions positifs ou négatifs. Elles se présentent principalement sous forme de billes et ont la capacité de permuter, sans modification physique et sans altération, leurs ions A contre des ions B de même signe se trouvant dans l'eau brute.

10 <https://www.eramet.com/fr/activites/lithium/notre-procede-dextraction-du-lithium/#>

11 Rapport 2021 : <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/eb052a18-c1f3-11eb-a925-01aa75ed71a1>

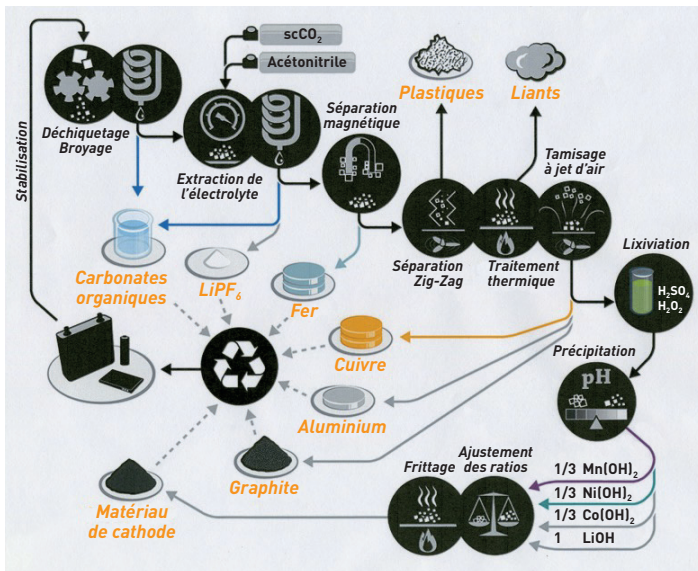


Figure 12. Recyclage des batteries Li-ion  
– Source : J.-C. Bernier.

La figure 12 illustre la complexité du processus dans le cas des batteries Li-ion : décharger la batterie, séparer les différents constituants chimiques, les broyer, puis leur faire subir une série de traitements, variables selon leur nature...

Notons par ailleurs que les procédés de recyclage des alliages ne permettent pas de récupérer les métaux sous leur forme la plus pure, des traces d'autres métaux persistant après séparation : ils subissent une « dégradation de l'usage » qui limite le champ de leur réemploi. On parle de recyclage en boucle ouverte<sup>12</sup>, et même si un recyclage à l'infini apparaît ainsi illusoire, il est nécessaire que des projets industriels soient développés pour mettre au point des procédés efficaces, écoresponsables et économiquement viables.

La Commission européenne impose la valorisation du lithium à partir des déchets de batteries à hauteur de 50 % d'ici à la fin de 2027 et de 80 % d'ici à la fin de 2031. Les batteries des véhicules électriques devront également, à partir de 2031, incorporer 16 % de cobalt recyclé ainsi que 6 % de lithium et nickel recyclés. Sous cette impulsion, des groupes industriels unissent leurs forces pour des projets pilotes, avec le soutien d'organismes publics comme l'ADEME<sup>13</sup>. La durée de vie d'une batterie de véhicule électrique étant estimée aux alentours de 10 ans, les industriels ne disposent pour l'heure pas de suffisamment de volumes de batteries en fin de vie pour des projets à grande échelle.

Recycler plutôt que produire s'impose aussi pour les terres rares. Leur présence dans les lampes LED ou les aimants permanents est à valoriser. Le site Solvay à La Rochelle investit pour devenir un pôle stratégique européen dans ce domaine.

Toutefois, malgré le potentiel de nos mines urbaines, le recyclage même avec un taux de 100 % ne pourra pas répondre à des besoins croissants en métaux. Il existe des pertes à chaque étape du cycle de vie et un décalage temporel entre la production primaire des métaux et leur recyclage lorsque les objets manufacturés arrivent en fin de vie. Ceci engendre un « déficit matière » rendant impossible la substitution de l'extraction par le recyclage pour combler les besoins dans ce laps de temps.

## CONCLUSION

La demande croissante en métaux pour répondre à la transition écologique et numérique impacte la disponibilité des ressources minérales. Afin de limiter la dépendance aux approvisionnements issus d'autres continents et de maîtriser davantage de chaînes de valeurs, il faut agir sur les méthodes utilisées dans toutes les étapes du processus d'exploitation des métaux. La gestion des déchets et le recyclage des métaux sont des leviers d'action importants pour lesquels les chercheurs et l'industrie chimique ont un rôle à jouer dans une démarche de transition énergétique durable. Une économie circulaire basée sur le recyclage et le réemploi des matériaux stratégiques semble cruciale pour rendre leur utilisation responsable et durable. La substitution de certains métaux dans des objets manufacturés est une piste d'exploration complémentaire. Toutefois, idéaliser le recyclage risque de faire oublier que limiter notre consommation reste un levier d'action essentiel.

12 <https://www.pourlascience.fr/sd/ecologie/peut-on-recycler-a-l-infini-7036.php>

13 ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie ou Agence de la transition écologique.

## SOURCES PRINCIPALES

« La transition énergétique un accélérateur de notre dépendance aux métaux stratégiques »  
par Patrick D'Hugues

[https://www.mediachimie.org/sites/default/files/Chimie\\_Mat-Strat-Chpt8.pdf](https://www.mediachimie.org/sites/default/files/Chimie_Mat-Strat-Chpt8.pdf)

« Chimie métallurgique et métaux rares ? » par Jean-Claude Bernier

[https://www.mediachimie.org/sites/default/files/Chimie\\_Mat-Strat-Chpt11.pdf](https://www.mediachimie.org/sites/default/files/Chimie_Mat-Strat-Chpt11.pdf)

### Pour en savoir plus

Colloque chimie, recyclage et économie circulaire : <https://www.mediachimie.org/ressource/chimie-recyclage-et-%C3%A9conomie-circulaire-colloque-novembre-2023>

Alerte à la pénurie de métaux (J.-C. Bernier) : <https://www.mediachimie.org/actualite/alerte-%C3%A0-la-p%C3%A9nurie-de-m%C3%A9taux>

Comment la chimie métallurgique peut-elle faire face aux besoins en matières premières stratégiques ? (S. Le Roy) : <https://www.mediachimie.org/ressource/comment-la-chimie-m%C3%A9tallurgique-peut-elle-faire-face-aux-besoins-en-mati%C3%A8res-premi%C3%A8res>

Avec quels matériaux sont fabriquées les éoliennes et comment les recycler ? (A. Harari et F. Brénon) <https://www.mediachimie.org/actualite/avec-quels-mat%C3%A9riaux-sont-fabriqu%C3%A9es-les-%C3%A9oliennes-et-comment-les-recycler>

La biolixiviation, comment ça fonctionne ? (BRGM) <https://www.youtube.com/watch?v=XWACB2yXP8U>

Les métaux de la révolution 4.0 : <https://www.systext.org/node/1568>

**Sophie Le Roy** est professeure certifiée de physique-chimie

**Comité éditorial** : Danièle Olivier, Jean-Claude Bernier, Grégory Syoen