

# COMMENT LA CHIMIE MÉTALLURGIQUE PEUT-ELLE FAIRE FACE AUX BESOINS EN MATIÈRES PREMIÈRES STRATÉGIQUES ?

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 critiques, métallurgie, extraction, mine, criticité, recyclage

## INTRODUCTION

Pour lutter contre le changement climatique, diminuer la consommation d'énergie fossile est nécessaire. Cette diminution accroît les besoins en ressources minérales, de nombreux produits présents dans notre quotidien mettant en jeu des matières premières qualifiées stratégiques. La dépendance de l'Europe aux importations de ces matières premières a mis en évidence, dans un contexte géopolitique et économique incertain, sa vulnérabilité face aux enjeux des transitions écologique et numérique<sup>1</sup>. Une sécurisation de l'approvisionnement en métaux considérés comme essentiels s'impose à l'Europe comme à la France. Comment la France peut-elle relever les défis stratégiques pour garantir un accès durable, sûr et écoresponsable à ces ressources ?

## ÉTAT DES LIEUX

### Une demande en forte croissance

La demande en métaux (nickel, lithium, terres rares, etc.) est en forte augmentation du fait de la croissance démographique et de l'augmentation du niveau de vie, sans oublier les effets multiplicateurs dus aux transitions énergétique et numérique. La transition énergétique engagée implique certes un recul du recours aux énergies fossiles, mais ne fait qu'augmenter les besoins en métaux, y compris ceux de base comme l'acier, l'aluminium et le cuivre. Prenons l'exemple d'un véhicule électrique : il contient 3 à 5 fois plus

<sup>1</sup> Alerte à la pénurie de métaux (Éditorial de J.-C. Bernier) : <https://www.mediachimie.org/actualite/alerte-%C3%A0-la-p%C3%A9nurie-de-m%C3%A9taux>

de cuivre qu'un véhicule thermique<sup>2</sup> ; les batteries qu'il contient mettent en jeu de grandes quantités de cobalt<sup>3</sup>, lithium, nickel, manganèse et graphite<sup>4</sup>. Le numérique est quant à lui très gourmand en métaux au travers du transport des données (câbles filaires ou fibres optiques), du stockage des données (disques durs, serveurs, data centers), des objets connectés (smartphones, etc.), du déploiement de la 5G. Le développement de l'intelligence artificielle aura certainement à l'avenir sa part dans cette consommation déjà exponentielle.

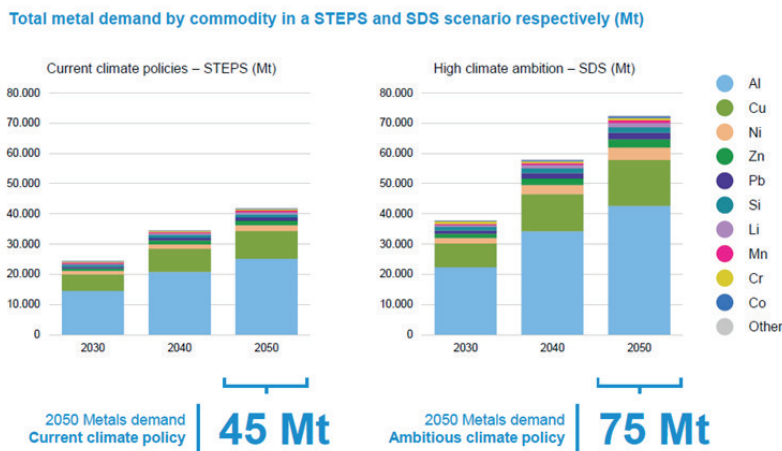


Figure 1. Demande totale par commodités selon 2 scénarios de l'AIE — Source : Patrick D'Hugues.

La demande en métaux va ainsi augmenter en quantité et en diversité. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) prévoit ainsi des besoins en 2040 multipliés par 42 et 7 respectivement pour le lithium et les terres rares (Figure 1).

Les extractions minières nécessaires pour répondre à cette demande accrue sont également en nette hausse : selon l'OCDE<sup>5</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.

### Un approvisionnement contraint

Avant de pouvoir retrouver un métal dans une batterie, ou dans les différents composants d'un téléphone, par exemple, le minerai passe par de nombreuses phases de son extraction à sa production.

Il faut forer les roches, les extraire, les concasser et/ou les tamiser. Après cette première phase, il faut extraire le métal de la roche, en le séparant des autres constituants. Le métal est enfin raffiné, purifié et usiné. Il est alors prêt pour être utilisé dans la fabrication d'objets de notre quotidien (Figure 2).



Figure 2. Exemple de la chaîne de valeur appliquée à la fabrication d'un câble électrique — Source : Jean-François Gaillaud.

Chaque étape de cette transformation est soumise à des réglementations contraignantes, voire à des restrictions commerciales qui peuvent bouleverser la totalité de la chaîne de valeur. Il apparaît actuellement une diminution problématique du rendement des mines pour l'extraction de certains métaux : les gisements sont de moins en moins concentrés et en conséquence plus profonds, avec des coûts d'exploitation et donc de vente croissants.

Des risques pour la santé humaine et l'environnement sont également à prendre en compte : érosion des sols, déforestation, pertes de biodiversité, contamination de l'eau, des sols, de l'air et des écosystèmes par des métaux et des produits chimiques (ex : arsenic, plomb ou soufre présents dans certains minerais)<sup>6</sup>. Sachant que 70 % des gisements miniers exploités par les six plus grandes sociétés minières se trouvent

2. Voir graphiques : <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/cuivre-transition-energetique-metal-essentiel-structurel-et-geopolitique>

3. <https://www.mediachimie.org/actualite/et-si-le-cobalt-manquait-quel-serait-lavenir-des-voitures-%C3%A9lectriques>

4. <https://mobiliteverte.engie.fr/conseils-et-actualites/vehicule-electrique/composition-batterie-voiture-electrique.html>

5. Organisation de coopération et de développement économiques.

6. Exemple de pollution par des effluents miniers en Espagne, en 1998 : [https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/fiche\\_detaillee/12831/](https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/fiche_detaillee/12831/)

dans des zones en stress hydrique<sup>7</sup>, il faudra opérer, compte tenu du changement climatique en cours, une optimisation des procédés d'extraction pour gérer et limiter la consommation d'eau dans les mines existantes.

On assiste au phénomène NIMBY (*Not In My Backyard*)<sup>8</sup> : les projets d'extraction sont approuvés par les riverains à partir du moment où ils sont localisés ailleurs, sans impact sur leur cadre de vie ou la valeur de leur patrimoine.

Les ressources géologiques en France métropolitaine sont nombreuses (Figure 3), mais confrontées à l'absence d'industrie minière capable de répondre à la demande.



Figure 3. Ressources géologiques présentes en France — Source : Jean-François Gaillaud.

L'Europe, comme la France, dépend donc fortement des ressources extraites dans des pays à bas coût de main-d'œuvre (Figure 4), ce qui rend les filières d'approvisionnement complexes, difficiles à maîtriser et vulnérables. Les risques de voir certains pays en situation de monopole ou d'une compétition entre filières sont accrus. En effet, certains pays privilégient leur industrie locale et restreignent les exportations de minerais, alors que d'autres utilisent leurs ressources comme une « arme stratégique », en s'appuyant parfois sur leur position de monopole sur les marchés mondiaux. Ainsi, la souveraineté de la Chine en matière de terres rares est déjà problématique : entre 2012 et 2016, la Chine a fourni 98 % de l'approvisionnement de l'UE<sup>9</sup>. 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>10</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 stratégiques.

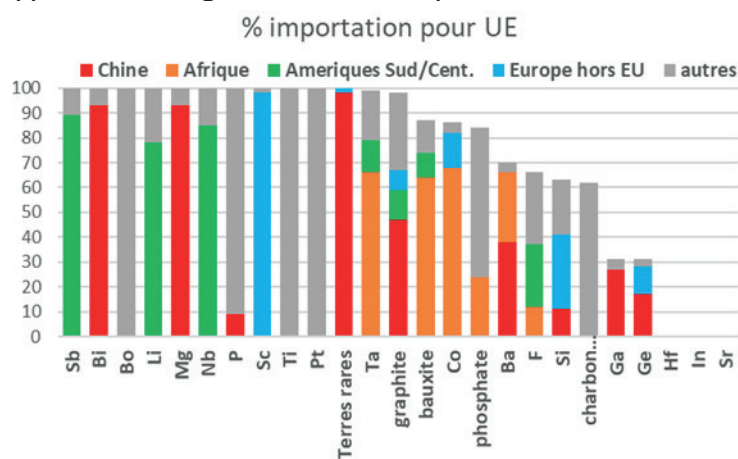


Figure 4. Dépendance européenne aux importations — Source : Patrick D'Hugues.

7. Également appelé « pénurie d'eau », voire « rareté de l'eau » dans les cas les plus extrêmes, le stress hydrique est une situation critique qui surgit lorsque les ressources en eau disponibles sont inférieures à la demande en eau.

8. NIMBY est un acronyme tiré de l'anglais traduit par « pas dans mon arrière-cour » ou « pas dans mon jardin » ; <https://www.cairn.info/geopolitique-de-l-amenagement-du-territoire--9782200621186-page-109.htm>

9. Source : <https://www.brgm.fr>

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

## La criticité des métaux

Il existe des tensions sur certaines ressources qui peuvent présenter un intérêt stratégique pour l'État, voire être critiques pour l'industrie.

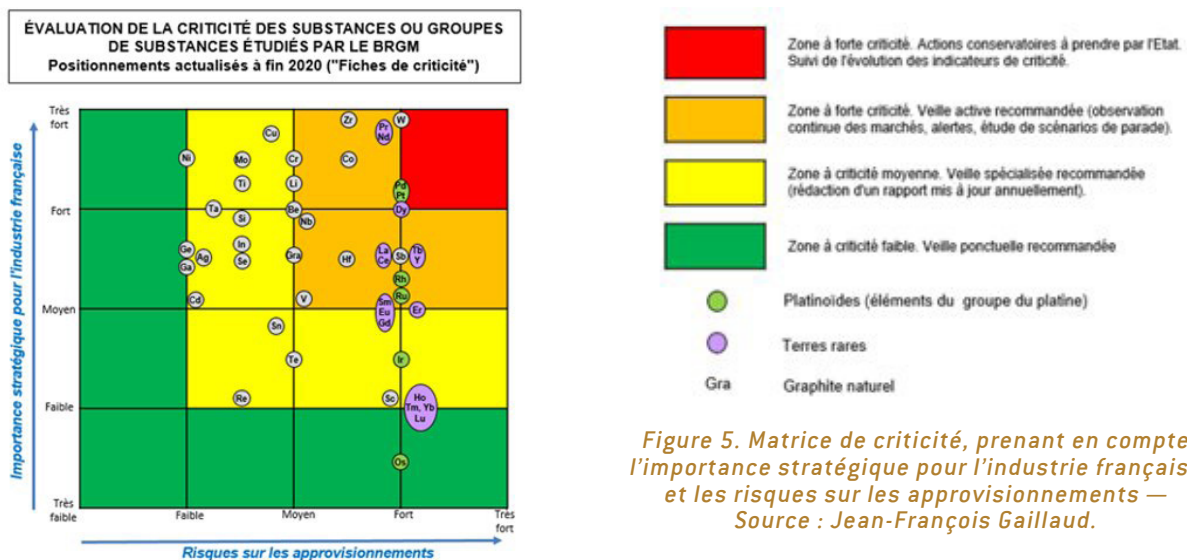
On peut alors classer les substances en trois catégories<sup>11</sup> :

- ▶ **substance stratégique** : substance indispensable à la politique économique d'un État, à sa défense, à sa politique étrangère ou à un secteur industriel spécifique (exemple : métaux utilisés dans le cadre de la transition énergétique) ;
- ▶ **substance critique** : substance dont les difficultés d'approvisionnement peuvent entraîner des conséquences industrielles ou économiques néfastes, avec une envolée des cours associés (exemple : lithium) ;
- ▶ **substance rare** : du point de vue géologique, substance dont l'abondance moyenne et/ou la disponibilité dans la croûte terrestre est faible (exemples : indium, cobalt, antimoine).

Lorsque les métaux critiques deviennent stratégiques, la situation est plus difficile à gérer.

La forte dépendance à l'égard des importations de matières premières nécessaires aux produits et technologies clés a montré l'importance de s'appuyer sur une matrice de criticité tenant compte à la fois des risques d'approvisionnement et de l'impact économique<sup>12</sup>.

Il s'agit d'un concept évolutif dans le temps qui varie selon celui qui l'analyse. Il est donc variable d'un pays à l'autre : la France, l'Union européenne, les États-Unis, le Japon et la Chine ont tous des matrices de criticité différentes (figures 5 et 6). Il en est de même pour l'industrie spécialisée ; par exemple, pour les constructeurs automobiles, le lithium et le cobalt nécessaires aux batteries des véhicules électriques sont devenus essentiels, alors que le platine utilisé dans les pots catalytiques des moteurs diesel l'est maintenant bien moins. Elle peut être sujette à des modifications en fonction des changements géopolitiques, de réglementation, sociétaux et techniques.



En France, c'est le BRGM qui réalise depuis 2010 des monographies relatives à des métaux potentiellement stratégiques pour l'économie. Depuis 2015, des fiches de criticité sont également élaborées par le BRGM sous la conduite du Comité pour les métaux stratégiques (COMES).

Elle fait par exemple apparaître des tensions sur le cobalt (Co), le tungstène (W), le cuivre (Cu), le palladium (Pd)...

Il devient alors nécessaire de trouver des stratégies pour limiter cette dépendance aux importations pour répondre à la demande.

11. Source : <https://www.mineralinfo.fr/fr/securete-des-approvisionnement-pour-leconomie/substances-critiques-strategiques>

12. <https://www.mineralinfo.fr/fr/securete-des-approvisionnement-pour-leconomie/substances-critiques-strategiques#politiques-publiques-et-mthodologie-en-matire-de-criticit>

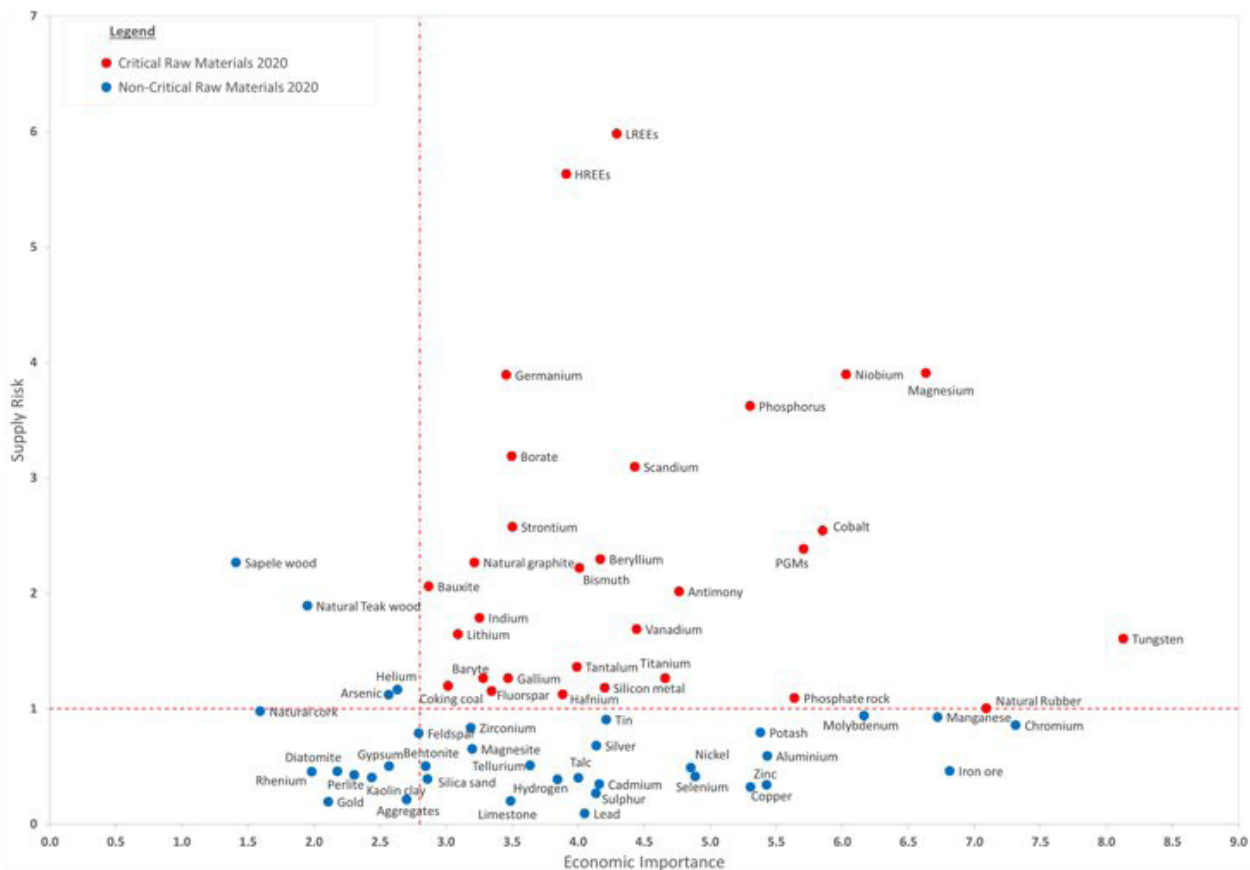


Figure 6. Matrice de criticité de l'Union européenne — Source : Jean-François Gaillaud.

## DES SOLUTIONS ENVISAGEABLES

### Des leviers industriels

Le premier levier envisageable pour sortir de la situation déséquilibrée décrite précédemment est le développement du **recyclage** des métaux. Tous les produits manufacturés de notre quotidien contenant des matériaux critiques deviennent des sources potentielles de récupération, sortes de « mines urbaines ». C'est ainsi que la Commission européenne a donné une ligne de conduite dans son nouveau plan *critical raw materials act*<sup>13</sup> : à l'horizon 2030, le **recyclage** effectué dans l'UE doit permettre de produire au moins 15 % de sa consommation annuelle.

Le recyclage ne pourra toutefois concerner qu'un nombre limité de produits, car il dépend à la fois de conditions techniques et économiques. La faible teneur en métal, la miniaturisation, la présence de plastiques, la présence d'alliages peuvent être des freins à la faisabilité ou la qualité du recyclage. D'un point de vue économique, il faut que les prix restent suffisamment élevés en fin de chaîne pour que le processus soit rentable : les produits recyclés doivent coûter moins cher que les originaux de même qualité, ce qui dépend tant du coût du recyclage que du prix du marché des matières premières.

Pour faciliter le recyclage, penser le produit dans son cycle de vie global par une approche plus circulaire, pourra se révéler salvateur.

Un deuxième levier d'action consisterait à accentuer la **substitution** des métaux critiques, en lien avec une écoconception des produits. La recherche et le développement dans ce domaine sont en cours, mais sur un temps long, car remplacer un métal qui possède des propriétés intrinsèques dues à sa structure peut s'avérer très complexe. C'est pourquoi il est possible d'envisager une substitution partielle, totale ou substance par matière (remplacer par exemple une pile à combustible basse température par une pile à « haute température » qui ne nécessite pas de catalyseur platine pour fonctionner).

13. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip\\_23\\_1661](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip_23_1661)



Un troisième levier d'action pourrait résider dans la production d'objets de consommation durables et réparables, limitant ainsi les besoins directs en matières premières ou la mise en place de recyclage.

### Développer une stratégie minière

La France dispose de ressources potentielles non négligeables pour plusieurs substances stratégiques comme le lithium<sup>14</sup>. C'est le BRGM<sup>15</sup> qui est chargé d'actualiser l'inventaire minier du territoire national afin de mettre en évidence des gisements<sup>16</sup> (Figure 7). Les sols sont cartographiés, sans nécessiter de les sonder.

Faire renaître l'exploitation minière en France métropolitaine ou la développer en Outre-mer pourrait être un autre levier pour gagner en indépendance d'approvisionnement. Les collectivités locales concernées par de nouveaux projets d'exploitation pourraient en tirer bénéfice d'un point de vue financier comme dans la création d'emplois. Cependant, comme cela a été précédemment évoqué, ce type d'implantation n'est possible qu'avec l'aval des populations et élus concernés. Pour faciliter le développement de mines, il conviendra alors de faire appel à des normes écoresponsables, peut-être en mettant en place des labels, mais surtout en pensant le process depuis l'impact de l'exploration et de l'exploitation jusqu'à celui de l'après-mine sur les populations voisines et l'environnement.

Il est difficilement envisageable de pouvoir se passer des ressources qui existent à l'étranger. Ainsi, il conviendra de préserver les intérêts de la France en mettant en œuvre une « diplomatie des métaux » efficace, par exemple en prenant des parts dans les compagnies de prospection et d'exploitation minière étrangères, avec une éthique écoresponsable.

### Renforcer la formation

De nombreuses formations dans le domaine des géosciences, et plus particulièrement des ressources minérales, existent en France, tant dans des écoles d'ingénieurs qu'à l'université (écoles des Mines accessibles sur concours après une classe préparatoire aux grandes écoles, par exemple).

Les besoins de formation sont vastes, allant de la géologie à l'écotoxicologie, sans oublier les secteurs annexes en sciences sociales liés à l'économie ou au droit, par exemple.

Il existe des carences dans certains types de formation : il n'existe pas de formation spécifique sur les terres rares dans les filières de chimie, les formations en toxicologie sont peu développées et le génie minier devient un enseignement rare.

Par ailleurs, les besoins en techniciens et opérateurs possédant des compétences spécifiques dans le domaine de la métallurgie ou des mines sont élevés. Il semble important de développer davantage de formations BAC +2 et BAC +3 capables de fournir un vivier performant, avec des emplois assurés en sortie.

*In fine*, cela permettrait d'obtenir un personnel hautement qualifié, capable de relever des défis techniques, économiques et environnementaux.

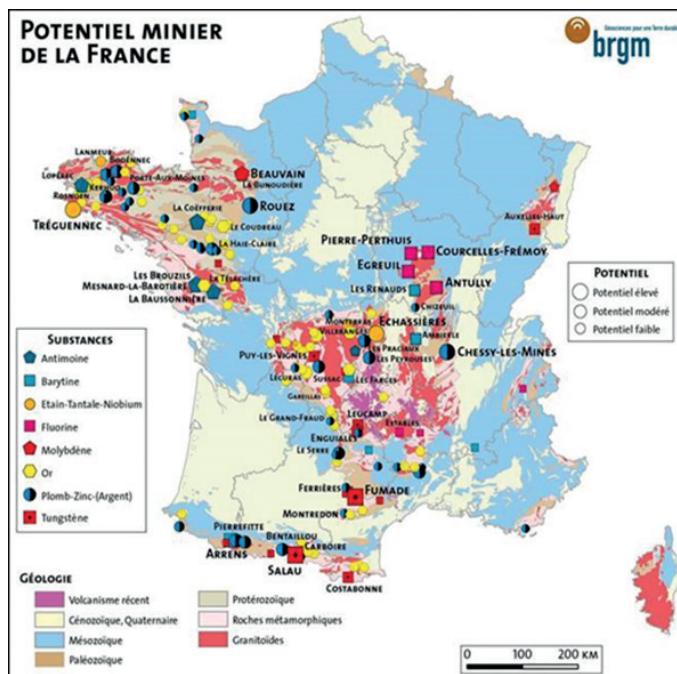


Figure 7. Carte des ressources minières d'intérêt potentiel connues en France métropolitaine — Source : Patrick D'Hugues.

14. <https://www.brgm.fr/fr/reference-projet-acheve/ressources-francaises-lithium-sous-forme-roches-dures>

15. 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.

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

## S'appuyer sur la recherche et le développement

Les besoins de progrès dans les méthodes d'exploration et de production sont un défi à relever avec les chercheurs.

Quelques points semblent d'une importance particulière :

- ▶ trouver des matériaux plus performants ;
- ▶ améliorer les techniques de recyclage des matériaux ;
- ▶ développer la recherche sur les procédés de production innovants, les substituts ou la diminution de la quantité de métaux rares dans les matériaux de catalyse, de batteries et dans les éoliennes ;
- ▶ accentuer le développement de l'hydrométallurgie<sup>17</sup> ;
- ▶ créer une filière de recherche en toxicologie métallique.

Rien de ceci ne peut bien évidemment se faire sans financements, qu'ils soient publics ou privés.

### CONCLUSION

Les besoins en ressources minérales pour répondre à une consommation accrue et aux transitions écologique et numérique ont fait apparaître une dépendance forte à l'approvisionnement à l'international pour la France comme pour l'Europe. La criticité de certains métaux est apparue et nécessite une veille constante. Face au monopole de certains pays, sécuriser l'approvisionnement en métaux critiques est primordial. Cela pourrait se faire en développant l'industrie métallurgique du recyclage sur notre territoire, en mettant en place des solutions alternatives innovantes, y compris en exploitant le potentiel minier, tout en s'appuyant sur une technicité forte des intervenants dans les différents maillons du système, de la prospection à la production d'objets manufacturés. Ceci ne pourra être viable qu'à condition de faire usage de technologies éco-efficientes. Adossés à une nécessaire sobriété dans notre consommation, ces leviers d'action suffiront-ils à éviter une pénurie de certains métaux dont nous sommes dépendants au quotidien ? De nombreux acteurs convoitent actuellement les réserves minières des grands fonds marins<sup>17</sup>. Cette nouvelle piste sera-t-elle souhaitable au regard de son éventuel impact sur les écosystèmes ?

### SOURCES PRINCIPALES

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

<https://www.mediachimie.org/ressource/la-transition-%C3%A9nerg%C3%A9tique-un-acc%C3%A9l%C3%A9rateur-de-notre-d%C3%A9pendance-aux-m%C3%A9taux-strat%C3%A9giques>

« Comment définir le périmètre des matériaux stratégiques ? » par Jean-François Gaillaud

<https://www.mediachimie.org/ressource/comment-d%C3%A9finir-le-p%C3%A9rim%C3%A8tre-des-mat%C3%A9riaux-strat%C3%A9giques>

« La stratégie de la France dans la sécurité des approvisionnements en matières premières stratégiques » par Philippe Varin

<https://www.mediachimie.org/ressource/la-strat%C3%A9gie-de-la-france-dans-la-s%C3%A9curit%C3%A9-des-approvisionnement-en-mati%C3%A8res-premi%C3%A8res>

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

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

17. Technique d'extraction des métaux qui comporte une étape où le métal est mis en solution pour permettre sa purification [source : CEA].

18. <https://www.usinenouvelle.com/article/les-groupes-miniers-a-la-conquete-controversee-des-metaux-sous-marins.N2150837>