

RÉALITÉS INDUSTRIELLES

« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »
Charles Coquebert, Journal des mines n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)



**Les métaux stratégiques, nouveau défi
de la transition énergétique
et de la réindustrialisation**



Notre site



NOVEMBRE 2025

Publiées avec le soutien
de l'Institut Mines Télécom



RÉALITÉS INDUSTRIELLES

ISSN 2271-7978 (en ligne)

ISSN 1148-7941 (imprimé)

Série trimestrielle - Novembre 2025

Rédaction

Conseil général de l'Économie (CGE)
Ministère de l'Économie, des Finances
et de la Souveraineté industrielle et numérique
120, rue de Bercy - Télédock 797
75572 Paris Cedex 12
Tél. : 01 53 18 52 68
<http://www.annales-des-mines.org>

Grégoire Postel-Vinay
Rédacteur en chef

Alexia Kappelmann
Secrétaire générale

Daniel Boula
Secrétaire général adjoint

Magali Gimon
Assistante de rédaction et Maquettiste

Nuria Gorris
Webmestre et Maquettiste

Publication

Photo de couverture
Gorodenkoff (Adobe Stock)

Iconographie
Alexia Kappelmann

Mise en page
Nuria Gorris

Impression
Dupliprint Mayenne

Membres du Comité de rédaction

Serge Catoire
Président du Comité de rédaction

Godefroy Beauvallet

Pierre Couveinhes

Jean-Pierre Dardayrol

Jean-Marc Grognet

Hervé Mariton

Stéphane Molinier

Grégoire Postel-Vinay

Françoise Roure

Rémy Steiner

Claude Trink

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. » correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

Le contenu des articles n'engage que la seule responsabilité de leurs auteurs.

Les métaux stratégiques, nouveau défi de la transition énergétique et de la réindustrialisation

Quels nouveaux enjeux stratégiques ?

5

Les ressources minérales, socle
du développement des sociétés humaines

Christophe POINSSOT et Philippe VARIN

9

La place des ressources minérales
dans notre quotidien

Bruno JACQUEMIN

12

Transition énergétique : une rupture
dans la dynamique de demande mondiale
en métaux ?

Emmanuel HACHE, Vincent D'HERBEMONT,
Louis-Marie MALBEC et Candice ROCHE

17

Les besoins en métaux pour le secteur
du numérique

Erwann FANGEAT et Olga KERGARAVAT

Les besoins des chaînes de valeur et les enjeux d'approvisionnement

22

Besoins de l'industrie aéronautique

Anthony BOURDON

26

La demande en matériaux critiques
dans l'industrie automobile

Rémi CORNUBERT

30

Introduction à la notion de chaînes
de valeur minérales et au marché
des commodités

Philippe CHALMIN et Yves JÉGOUREL

33

Le cuivre : chaîne de valeur d'un métal
hautement stratégique

Mathieu LEGUÉRINEL et Johann TUDURI

38

Chaîne de valeur des métaux
de la mobilité électrique

Louis-Marie MALBEC et Alice MARIE

42

The current state of the European Union's
dependency and its policies

Peter HANDLEY

47

Le rôle clé de la Chine dans les chaînes
de valeur des minerais critiques

John SEAMAN

52

Le rôle de la course aux métaux
stratégiques dans les conflits actuels

Marc-Antoine EYL-MAZZEGA

56

L'intelligence minérale au service
d'une meilleure connaissance
des chaînes de valeur

Stéphane BOURG

60

État des lieux du recyclage des métaux
stratégiques et projets industriels français

Olga KERGARAVAT

66

L'innovation au service du recyclage
de la mine urbaine

Stéphane PELLET-ROSTAING, Yannick MÉNARD,
Dr. Jean-Christophe P. GABRIEL et Solène TOUZÉ

71

Le recyclage, une contribution
indispensable mais forcément limitée
à la sécurisation des approvisionnements

Yannick MÉNARD, Stéphane BOURG

Mines et mines urbaines

75

Ressources minérales :
un nouvel inventaire pour renforcer
la souveraineté de la France

Dr. Blandine GOURCEROL
et Karim BEN SLIMANE

79

Les demandes de permis minier :
de l'exploration à l'exploitation

Jean-François GAILLAUD

83

Les enjeux scientifiques et techniques
et normatifs de l'approvisionnement
responsable en ressources minérales

Gaël BELLENFANT

88

Les enjeux de normalisation
de la mine responsable

Christophe DIDIER, Mercè FERRÉS HERNÁNDEZ
et David KRUPKA

91

L'acceptabilité sociale des projets d'intérêt
public : échelle et focale

Corinne GENDRON, Alice FRISER
et Stéphanie YATES

Les politiques publiques

95

La politique française
en matière de minerais
et métaux stratégiques

Benjamin GALLEZOT

101

Les outils de financement mobilisés pour
le soutien à la filière des métaux critiques

Massimiliano PICCIANI

105

La sécurité énergétique au cœur de la
diplomatie des minerais et métaux critiques

Maël LE BAIL

110

Le défi du renouvellement des compétences

Judith SAUSSE

114

Pourquoi renforcer la R&D française face
aux enjeux d'approvisionnement
en métaux ?

Damien GOETZ et Patrick d'HUGUES

Projets clés

118

Compléter la chaîne de valeur de la batterie en France avec le projet industriel d'Orano et de XTC New Energy (Neomat)

Philippe HATRON

120

Carester – Caremag : une expertise en terres rares pour une souveraineté européenne

Frédéric CARENCOTTE

121

Présentation du projet Emili

Alan PARTE

122

Le projet Lithium de France : la production de chaleur et de lithium géothermal dans le fossé rhénan

Romain MILLOT

123

Le projet Centenario d'Eramet

Fabien BURDET

124

Traduction des résumés

130

Biographies des auteurs

Ce numéro a été coordonné
par Christophe POINSSOT

Les ressources minérales, socle du développement des sociétés humaines

Par Christophe POINSSOT
BRGM

Et Philippe VARIN
Chambre Internationale de Commerce

Le développement des sociétés humaines s'est construit sur la découverte et l'utilisation progressive des ressources minérales du sous-sol, et notamment des métaux, qui ont permis de fabriquer des outils de plus en plus complexes jusqu'aux technologies innovantes et performantes qui sont au fondement des sociétés actuelles. Les ressources minérales sont ainsi le socle historique du développement de nos sociétés humaines complexes et technologiques.

En préférant délocaliser ces activités vers des pays tiers, l'Europe a laissé se créer un risque systémique porteur de nombreux enjeux : des enjeux de souveraineté, tant nos industries et notre économie dépendent maintenant des importations en provenance de pays tiers ; des enjeux d'acceptabilité pour être en mesure de relocaliser dans nos territoires des activités industrielles qui ont mauvaise presse ; des enjeux éthiques pour assumer dorénavant les risques et impacts de nos modes de vie ; et des enjeux scientifiques pour être en mesure d'inventer une nouvelle industrie minière, minéralurgique et métallurgique renouvelée, décarbonée, à faible impact environnemental et socialement acceptée.

En amont des divers articles qui détaillent les différents aspects de ce défi, cet article introductif vise à éclairer l'importance de ces enjeux pour la France, et plus largement l'Europe.

Pas une journée ne passe sans que les métaux stratégiques, ou leur porte-drapeau médiatique, les terres rares, ne fassent la « Une » de l'actualité. Des velléités américaines sur le Groenland à l'accord américano-ukrainien, des mesures chinoises de restriction d'exportation au conflit du Nord-Kivu entre la République démocratique du Congo (RDC) et le Rwanda, les ressources minérales qu'on croyait reléguées aux livres d'histoire sont redevenues un enjeu majeur de pouvoir et de souveraineté. Au point que depuis deux ans, des usines, notamment automobiles, sont contraintes de tourner au ralenti, voire de s'arrêter, faute de ressources suffisantes disponibles. Qui l'aurait imaginé il y a seulement dix ans ? Qui aurait pu penser que, la tête dans les étoiles de la *deeptech* et du numérique, nous allions être rattrapés par des enjeux vieux comme le monde d'approvisionnements en métaux stratégiques ?

Quel incroyable retournement de situation alors que notre pays pensait pouvoir tirer un trait sur son passé minier, voire, pour certains, sur les industries associées de raffinage et de transformation réputées à faible enjeu et polluantes... Évidemment, un tel changement ne peut pas aller sans heurt et sans opposition, tant il prend à contre-pied les réflexes pris par les entreprises depuis

quarante ans, tout comme notre culture sociale qui s'est ainsi construite depuis lors. Et cette situation est d'autant plus difficile à correctement appréhender qu'il n'existe pas aujourd'hui d'agence ou de structure chargée de rassembler et fournir des données mondiales consolidées sur les matériaux, à l'instar de ce qui existe sur l'énergie (Agence Internationale de l'Énergie).

Un tel changement méritait évidemment que la revue des Annales des Mines y consacre un numéro dédié pour expliciter les tenants et aboutissants de ce retournement de situation, au cœur des enjeux historiques de la revue. En amont des différents éclairages qui seront apportés par les articles successifs de ce numéro, cette introduction vise à resituer les enjeux globaux de l'approvisionnement en ressources minérales.

Les ressources minérales sont au fondement de nos sociétés

En dépit de notre tendance à l'oublier, l'exploitation des mines et des ressources minérales a permis, depuis l'origine, le développement des sociétés humaines : c'est l'invention de la métallurgie à l'âge du Bronze puis

la maîtrise progressive des différents métaux qui ont permis aux civilisations de produire des outils permettant de produire des quantités plus importantes de nourriture, de construire des villes et des infrastructures, de comprendre puis maîtriser le monde environnant, d'innover et développer des technologies de plus en plus performantes. Au point que l'approvisionnement en ressources minérales a été pendant longtemps le facteur limitant du développement des empires et des sociétés, et donc le moteur de leur expansion. Alors que l'exploitation des minerais se fait d'abord en surface sous forme de carrières (les premières datent de - 30 000 ans en Égypte), les premières mines souterraines apparaissent dès le cinquième millénaire avant notre ère en Europe, au Moyen-Orient, et les premières fonderies autour de - 8 000 ans en Turquie (Jebrak, 2024). Depuis lors, les Hommes n'ont eu de cesse d'élargir leurs connaissances sur les différents matériaux présents dans le sous-sol, et d'apprendre à les utiliser de manière croissante pour développer des usages puis des technologies de plus en plus performantes. Là où le monde se satisfaisait d'une dizaine de substances au XIX^e siècle, c'est plus de 60 d'entre elles qui sont aujourd'hui nécessaires pour faire fonctionner toutes nos technologies, comme le résume la Figure 1.

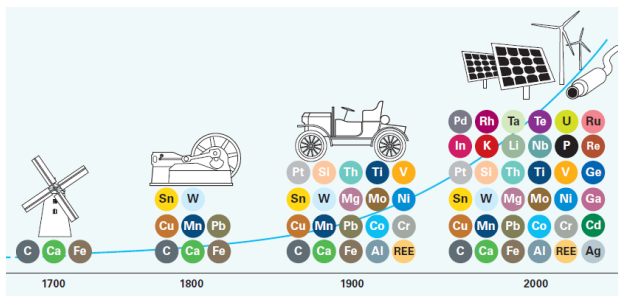


Figure 1 : Illustration de l'utilisation croissante des ressources du sous-sol pour développer des technologies énergétiques de plus en plus performantes (Source : Zepf *et al.*, 2014).

Sans ces ressources minérales, beaucoup de nos technologies n'existeraient donc pas et nos sociétés n'auraient pas pu atteindre un tel développement : en effet, tout ce qui nous entoure et n'est pas de nature biologique, c'est-à-dire ne se cultive pas ou ne se cueille pas, provient forcément du sous-sol, soit d'une ressource fossile (charbon, pétrole ou gaz) ou minérale. Dans cette perspective, on comprend l'importance que revêt la sécurisation des approvisionnements en ressources minérales, et pourquoi certains métaux sont devenus stratégiques, voire critiques pour nos sociétés.

La dépendance aux importations met en danger notre souveraineté

Alors que l'Europe a historiquement été un des berceaux de la révolution industrielle et de l'industrie minière, elle ne représente plus aujourd'hui que 5 à 6 % de l'activité minière mondiale (hors charbon), bien en deçà de sa place dans l'échiquier économique mondial, du fait d'une volonté assumée de délocaliser ces industries mal aimées et à faible valeur ajoutée dans les années 1980, notamment en France.

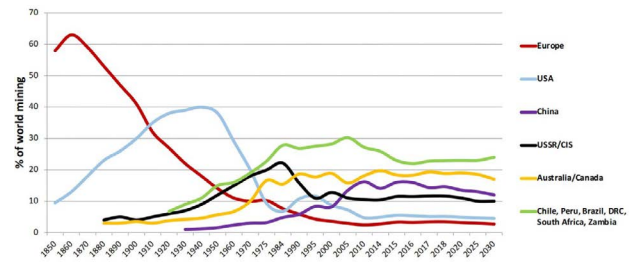


Figure 2 : Évolution de la place de l'Europe dans l'industrie minière mondiale (hors charbon) en valeur (Source : Kiprono *et al.*, 2023).

Elle doit dorénavant importer la majeure partie de ses besoins en matières premières pour alimenter ses industries de transformation, ou importer directement des produits finis ou semi-finis. Cela la place donc en situation de grande dépendance, comme le montre la Figure 3.

Cette situation crée donc une situation de grande dépendance géopolitique de l'Europe vis-à-vis des quelques pays devenus des fournisseurs quasi exclusifs, au premier rang desquels la Chine : pour des éléments comme les terres rares, le magnésium ou le gallium, l'Europe dépend à plus de 70 % de la Chine !

Dans un contexte de montée des tensions internationales et de remise en cause assumée du libre-échange, cette dépendance est évidemment problématique, et fragilise l'indépendance et l'autonomie de nos entreprises et, de ce fait, la souveraineté économique globale européenne, indispensable à toute souveraineté politique. Sans réaction vigoureuse, le risque est grand de voir l'Europe reléguée au rôle de consommateurs pour les grands pays exportateurs comme la Chine, avec une remise en cause implicite de l'ambition et du modèle politique et social européen. Cela explique pour partie l'ambition de la nouvelle directive européenne du Critical Raw Materials Act (entrée en vigueur en mai 2024), qui vise à extraire 10 % de nos besoins du sous-sol européen, à en raffiner 40 % dans les usines européennes, à utiliser 25 % de produits recyclés et ne pas dépendre à plus de 65 % d'un même pays. Le chemin pour y arriver sera long et sinueux, mais sans aucun doute indispensable pour préserver la souveraineté européenne.

Pour autant, l'enjeu n'est nullement de devenir totalement autonome, ce qui serait un leurre dangereux, mais de réduire nos dépendances et de développer des partenariats stratégiques de long terme avec les pays producteurs, notamment africains et d'Amérique du sud, non pas pour leur extorquer leurs ressources, mais pour les aider à les valoriser de manière responsable et les aider à transformer la « malédiction des ressources naturelles »¹ en véritable levier de développement local. C'est tout le sens des engagements pris par la France et l'Europe dans le cadre des partenariats stratégiques récemment noués, et auquel le BRGM contribue activement.

¹ La « malédiction des matières premières » est une situation économique paradoxale, caractérisée par la difficulté à se développer que rencontrent les nations exportant en grande quantité des ressources naturelles comme le pétrole ou les minerais, et qui se traduit par une corrélation négative entre taux de croissance et ressources naturelles (cf. https://fr.wikipedia.org/wiki/Mal%C3%A9diction_des_ressources_naturelles).

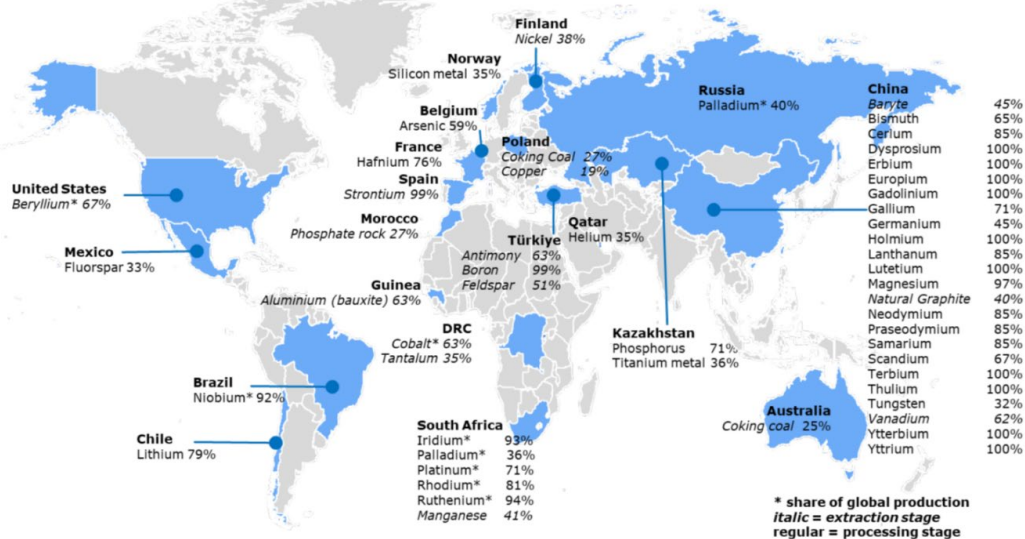


Figure 3 : Origine des ressources minérales consommées en Europe (Source : EC, 2023).

Le mythe d'une société tertiarisée a coupé notre lien historique avec le sous-sol et ses ressources

Malgré l'importance des ressources minérales dans nos vies, la plupart de nos concitoyens ont perdu la compréhension de ce lien profond qui lie nos modes de vie aux ressources minérales du sous-sol, du fait de l'invisibilisation sociétale progressive des industries minéralurgiques et métallurgiques d'extraction, de raffinage et de transformation, qui ont été délocalisées dans des pays tiers. Cette situation a ainsi pu laisser croire à la possibilité d'une société totalement tertiarisée bénéficiant d'un haut niveau technologique, sans mines ni métallurgies, oubliant que nous avons pourtant toujours besoin d'autant de ressources minérales mais que nous préférons les importer. D'autant que beaucoup ont pu croire à la possibilité de pourvoir à tous nos besoins par le recyclage, ce qui ne sera jamais possible du fait de l'impossibilité physique à récupérer 100 % des matières consommées (du fait de l'entropie...). Ce qui évidemment n'enlève en rien à l'intérêt évident du recyclage, qu'il convient de développer de manière beaucoup plus volontariste qu'il ne l'est aujourd'hui (seuls les métaux précieux sont recyclés de manière importante).

Le retour à la réalité, sous la double contrainte de besoins qui explosent du fait des transitions énergétique et numérique, et d'une globalisation en déconstruction, est brutal et douloureux pour nos démocraties occidentales, et déconcertant pour nos concitoyens. Alors que le changement climatique alimente les mouvements écologistes et l'éco-anxiété d'une part croissante de la population, convaincre que la décarbonation de notre société et la préservation de notre souveraineté passent par la réouverture de mines ou d'industries vues comme un vestige du passé devient un défi majeur, si ce n'est une gageure, et nécessitera probablement de revisiter la manière dont sont enseignés les enjeux des ressources et la connaissance du sous-sol. L'un comme l'autre restent méconnus, laissant la place belle aux mythes et aux peurs parfois irrationnelles.

La délocalisation des activités industrielles primaires porte des enjeux éthiques majeurs

Les activités minières et de premières transformations sont par définition des industries très capitalistiques et nécessitant de transporter et transformer une quantité importante de matériaux naturels et industriels, requérant de grande quantité d'énergie, avec des risques environnementaux évidents. Faire le choix de développer préférentiellement ces activités dans des pays tiers, souvent des pays en développement, n'était donc pas anodin dans la mesure où cela a conduit à exporter vers ces pays les impacts de ces activités dont nous étions pourtant largement bénéficiaires.

Alors que l'enjeu de la préservation de l'environnement devient chaque jour plus évident, alors que ces activités ont également pu contribuer au développement de conflits régionaux (exemple du conflit à l'Est de la RDC), continuer à fermer ainsi les yeux sur les conséquences de nos modes de vie devient éthiquement insoutenable. D'autant qu'en Europe, nous disposons généralement des compétences et savoir-faire qui permettraient de mener ces activités de manière plus responsable, en réduisant très largement les impacts environnementaux, et améliorant très largement également les conditions de travail. C'est tout l'enjeu des nombreux travaux menés à l'échelle mondiale pour faire émerger une nouvelle génération de standards miniers « responsables » qui réduisent fortement l'impact environnemental, garantissent une gouvernance équilibrée et transparente et des conditions optimales de travail, et une répartition juste et équitable de la valeur ajoutée créée.

Relever le défi de développer une industrie minière et de transformation moderne, performante et à faible impact environnemental

Nos concitoyens gardent très largement une image négative de l'industrie minière : que ce soient les récits de Zola sur la mine dans *Germinal*, les traces laissées dans nos paysages par nos activités minières passées (notamment dans le charbon), ou les reportages réguliers sur les gigamines de cuivre en Amérique du sud ou les mines artisanales en Afrique, les exemples négatifs ne manquent pas.

Et pourtant, l'industrie minière d'aujourd'hui, et encore plus de demain, n'a et n'aura plus grand-chose à voir avec ces images. La mine de demain sera avant tout robotisée et numérique, opérée à distance par des opérateurs postés dans des locaux sécurisés ; dans la mesure du possible souterraine, avec des engins électrifiés, utilisant des procédés permettant de ne creuser que les zones d'intérêt avec un faible coût énergétique (exemple des nouvelles technologies à courants pulsés, entre autres) ; recyclant son eau et réutilisant ses déchets... Les prémices de telles installations commencent à émerger (comme la mine de Mittershill dans le Tyrol autrichien), mais les technologies de la mine de demain restent encore à consolider.

Par sa longue culture et tradition industrielle et ses capacités d'innovation, l'Europe, avec sa forte ambition environnementale, doit relever le défi de développer les procédés et technologies de l'industrie minière de demain tout en contribuant à réduire son impact et renforcer son acceptabilité. Ce défi est également de nature à attirer de jeunes talents, alors que l'Europe doit renouveler ses compétences dans ces domaines qui restent peu attractifs pour les jeunes générations, du fait de leur invisibilité et de leur mauvaise réputation (les quelques masters spécialisés français dans les Écoles des Mines ou l'ENSG à Nancy forment principalement des étrangers à ce jour). Réussir à attirer de nouveaux talents sera pourtant une clé indubitable du succès du nouveau minier européen.

Développer et démontrer la pertinence et la performance de cette nouvelle industrie minière est d'autant plus important que l'Europe souhaite en faire un nouveau standard international en aidant les pays miniers à se l'approprier, pour qu'ils puissent également développer une industrie minière moderne, performante, respectueuse de l'environnement et vecteur de développement local.

Conclusion

Réussir à sécuriser les approvisionnements nationaux et européens en ressources minérales est donc redevenu un enjeu et un objectif majeur pour réduire nos dépendances, préserver notre tissu industriel et consolider notre souveraineté économique. Au-delà des enjeux techniques, industriels et environnementaux présentés dans ce numéro, c'est plus largement

le modèle européen qui est challengé sur son programme et sa capacité à construire des compromis entre notre ambition d'accélérer la transition écologique et énergétique, de préserver notre environnement et modèle social, et la nécessité de réindustrialiser et soutenir le développement économique.

Bibliographie

EUROPEAN COMMISSION (2023), Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report, DOI 10.2873/725585.

JEBRAK M. (2024), *Des mines et des empires*, éd. Multimondes, 294 p. ISBN 978-2-89773-402-2.

KIPRONO N., SMOLINSKI T., ROGOWSKI M. & CHMIELEWSKI A. (2023), "The state of critical and strategic metals recovery and the role of nuclear techniques in the separation technologies development: Review", *Separations*, <https://doi.org/10.3390/separations10020112>

ZEPF V., RELLER A., RENNIE C., ASHFIELD M. & SIMMONS J., BP (2014), *Materials critical to the energy industry. An introduction*, 2nd edition, ISBN 978-0-9928387-0-6.

La place des ressources minérales dans notre quotidien

Par Bruno JACQUEMIN

Délégué général d'A3M (Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux)

Des premiers silex aux batteries lithium-ion, les ressources minérales accompagnent l'humanité et façonnent ses civilisations. Fer, cuivre, aluminium, lithium, cobalt, terres rares : chaque métal raconte une histoire de progrès, de puissance et de rivalité. Nos villes, nos transports, nos communications, notre santé : rien n'échappe à cette infrastructure minérale invisible, mais décisive. Pourtant, cette abondance apparente cache des réalités plus dures : finitude des gisements, dépendances stratégiques, enjeux environnementaux et nécessité du recyclage. Les ressources minérales sont plus qu'un socle technique : elles sont le miroir de l'humanité, révélant ses contradictions et ses choix de société. Les intégrer au cœur de nos politiques et de nos stratégies collectives n'est pas un luxe, mais une condition pour inventer un avenir durable.

Introduction

Sommes-nous conscients que nous vivons dans une véritable civilisation minérale ? Chaque bâtiment, chaque véhicule, chaque objet banal repose sur des ressources extraites de la croûte terrestre. Pas un geste de notre quotidien qui ne mobilise des minéraux invisibles : ciment, acier, cuivre, silicium, lithium... Du silex taillé de la Préhistoire aux batteries lithium-ion de la transition énergétique, les minéraux n'ont jamais cessé de façonner l'humanité.

Ils ont bâti les civilisations, déclenché des guerres, inspiré nos imaginaires. Ils ont donné leur nom à des âges entiers de notre histoire : pierre, bronze, fer. Aujourd'hui, ils sont à la base de toutes les transitions : énergétique, numérique, industrielle. Peut-on encore parler de souveraineté ou de prospérité sans maîtriser l'accès et la transformation de ces ressources stratégiques ?

Dans cet article, nous proposons d'explorer la place des ressources minérales dans notre quotidien à travers cinq dimensions : leur diversité ; leur rôle historique ; leur poids géopolitique et culturel ; leur omniprésence concrète dans nos vies ; et enfin les stratégies contemporaines et prospectives qu'elles imposent. Les minéraux sont bien plus que des matériaux techniques : ils sont le miroir de l'humanité et de son avenir.

Diversité et abondance des ressources minérales

Chaque objet que nous utilisons est le résultat d'une alchimie minérale. Le fer, le cuivre, l'aluminium, le nickel ou le zinc forment la base matérielle de nos infrastructures et de notre énergie. L'or, l'argent et le platine, longtemps recherchés pour leur valeur symbolique, se retrouvent aujourd'hui dans les circuits électroniques ou les catalyseurs automobiles. Plus récemment, le lithium,

le cobalt, le silicium ou les terres rares sont devenus indispensables à la transition énergétique et numérique : sans eux, pas de batteries, pas d'éoliennes, pas de semi-conducteurs. Enfin, le sable, le calcaire, l'argile ou les phosphates façonnent notre habitat, nos verres, nos ciments, nos céramiques et même notre agriculture.

Un simple smartphone de 200 grammes concentre plus de 40 éléments chimiques différents : cuivre, aluminium, or, argent, tantale, indium, gallium, et plusieurs terres rares. Cette diversité illustre la sophistication de nos technologies, mais aussi la dépendance qu'elles créent.

Car l'enjeu ne réside pas seulement dans l'extraction. Entre le minerai et le produit fini s'interposent des étapes de transformation – raffinage, séparation, purification – qui concentrent la valeur ajoutée et les impacts environnementaux. C'est ce que l'on appelle le "midstream". Qui maîtrise ces étapes contrôle non seulement un marché, mais une chaîne de dépendances. La Chine, par exemple, ne se contente pas d'extraire : sa domination provient d'ailleurs du raffinage plus que de l'extraction des terres rares, et elle domine ainsi leur usage mondial.

La diversité minérale est donc double : diversité des familles et diversité des chaînes de valeur. Elle est à la fois richesse et fragilité, socle invisible de nos sociétés et source potentielle de dépendances.

Une histoire longue : des civilisations façonnées par les minéraux

L'histoire humaine est indissociable des minéraux. Elle porte leur empreinte jusque dans les noms que nous avons donnés à nos âges.

La pierre taillée a marqué les débuts de l'outillage. Le cuivre et le bronze ont ouvert la voie à des armes plus solides, à une agriculture plus efficace, à un artisanat

raffiné. Le fer, plus abondant et moins coûteux, s'est imposé comme matériau universel, armant les armées antiques, équipant les paysans et consolidant les empires.

Au Moyen Âge et à la Renaissance, les mines d'argent d'Europe centrale et l'or du Nouveau Monde ont propulsé des royaumes et financé l'expansion coloniale. La révolution industrielle a inauguré l'âge du charbon et de l'acier : le premier a alimenté les machines à vapeur, le second a bâti les ponts et les gratte-ciel. L'aluminium, découvert au XIX^e siècle, est devenu le métal léger de la modernité.

Il n'est pas si loin le temps où l'on trouvait encore des forges dans presque tous les villages de France. Le travail du métal faisait partie de la vie quotidienne, structurant les territoires autant que les économies locales.

Le XX^e siècle a ensuite vu l'avènement du pétrole et de l'uranium, symboles d'une puissance énergétique et militaire inédite. Aujourd'hui, les métaux critiques – lithium, cobalt, nickel, terres rares – incarnent à leur tour une nouvelle étape. Hier, le charbon ou l'acier ; aujourd'hui, la batterie : chaque époque a ses matériaux emblématiques, chaque âge son socle minéral.

Les ressources minérales comme facteur géopolitique et culturel

Les minéraux ne sont pas seulement des matériaux : ils sont des leviers de pouvoir. L'argent d'Espagne a enrichi Rome et l'Europe moderne. Le charbon et l'acier ont été si stratégiques qu'ils devinrent la base de la réconciliation européenne après 1945, avec la Communauté européenne du charbon et de l'acier. Le pétrole a provoqué des guerres et des crises ; l'usage militaire de l'uranium a structuré la guerre froide.

Aujourd'hui, cobalt, lithium, terres rares et tant d'autres métaux ou minéraux alimentent une nouvelle géopolitique. La Chine, qui contrôle environ 60 % de l'extraction et plus de 80 % du raffinage des terres rares, utilise ces ressources comme instruments de puissance. Les tensions autour des batteries, des semi-conducteurs ou des énergies renouvelables rappellent que nous sommes entrés dans une ère où les chaînes de valeur sont des champs de bataille. Faut-il s'étonner que la guerre en Ukraine ou l'instabilité en Afrique centrale soient liées, directement ou indirectement, à la maîtrise des ressources énergétiques et minières ?

Mais les ressources minérales imprègnent aussi nos cultures et nos langages. Nous parlons d'« âge d'or », d'une personne « solide comme le roc » ou ayant « du plomb dans l'aile ». L'« argent » est à la fois métal et monnaie. Le « salaire » vient du sel, jadis ressource vitale et stratégique, véritable « or blanc » qui structura des routes commerciales entières. L'or incarne le prestige, le diamant la rareté, l'uranium la puissance et la menace, mais aussi une composante notable pour la lutte contre le changement climatique. Aujourd'hui, les métaux critiques symbolisent à la fois le combat climatique et la vulnérabilité de nos sociétés.

Les minéraux dans notre quotidien concret

Si les minéraux construisent les empires, ils façonnent aussi nos vies les plus ordinaires.

Nos maisons et nos villes sont des architectures minérales. Béton, ciment, sable, gravier, acier, cuivre, verre, pigments : tout y est matière première transformée. Une maison moderne de 100 m² contient environ 40 tonnes de sable et de gravier, 2 tonnes de ciment, 200 kg d'acier, 100 kg de cuivre et 250 kg de verre. Chaque année, la planète consomme plus de 4 milliards de tonnes de ciment et 50 milliards de tonnes de sable – après l'eau, la ressource la plus utilisée au monde¹.

Nos déplacements sont eux aussi saturés de minéraux. Une voiture thermique embarque une tonne d'acier, 200 kilos d'aluminium, 20 kilos de cuivre et quelques grammes de métaux précieux. Une voiture électrique mobilise 250 kilos d'aluminium, 80 kilos de cuivre, 60 kilos de nickel, 30 kilos de cobalt, 10 kilos de lithium. Un véhicule électrique contient ainsi 4 à 5 fois plus de métaux stratégiques dont le cuivre qu'un véhicule classique. La demande mondiale de cuivre dépasse déjà 25 millions de tonnes par an, et celle d'aluminium 70 millions.

Nos environnements de travail et de communication ne sont pas en reste. Chaque année, plus d'1,5 milliard de smartphones et 300 millions d'ordinateurs sont produits dans le monde. Le numérique paraît immatériel ; il repose en réalité sur une infrastructure minérale colossale.

Même nos loisirs et notre santé en dépendent : vélos, consoles de jeux, instruments de musique, IRM, implants médicaux, panneaux solaires, éoliennes. Nous vivons dans une société minérale sans le savoir.

Les ressources minérales au cœur des stratégies contemporaines

Aujourd'hui, les minéraux sont au centre des rivalités stratégiques. Les États-Unis et la Chine sécurisent leurs approvisionnements à coups d'alliances et d'investissements, chacun cherchant à s'imposer sur les chaînes critiques. L'Afrique, riche en cobalt, cuivre, bauxite ou manganèse, devient un terrain d'influence, mais aussi un continent qui revendique sa part de valeur ajoutée en développant ses propres filières de transformation. L'Europe, longtemps dépendante, a fini par ouvrir les yeux : le règlement européen sur les matières premières critiques² du 11 avril 2024 marque une volonté de diversifier les sources, relancer certaines mines et bâtir des filières de recyclage.

¹ « Depuis trente ans, la demande en sable, qui est l'une des principales matières premières utilisées dans la construction, a augmenté de 360 %. 400 milliards de tonnes de sable sont extraites par an (à titre de comparaison, c'est neuf fois plus que le pétrole), c'est bien plus que ce que la Terre est capable d'offrir », <https://www.annales.org/ri/2021/ri-novembre-2021/2021-11-19.pdf>

² https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401252

La Chine extrait donc environ 60 % des terres rares et en raffine plus de 80 %. L'Europe, elle, n'en produit presque aucune, mais en consomme massivement. Cette asymétrie crée des dépendances lourdes, qui peuvent être utilisées comme armes diplomatiques.

Les ressources minérales sont désormais au cœur de toutes les transitions. La transition énergétique exige lithium, cobalt, nickel, cuivre, silicium et terres rares. La transition industrielle repose sur la relocalisation et sur des aciers et aluminiums bas-carbone. La transition numérique dépend des semi-conducteurs et des infrastructures minérales. La transition sociétale elle-même – mobilité, habitat, consommation – suppose des arbitrages sur l'usage de ressources limitées.

Deux cartes se superposent : celle des gisements primaires, donnée par la géologie, et celle des capacités de transformation et de recyclage, donnée par les choix politiques et industriels des nations de par le monde. Le recyclage et la sobriété deviennent essentiels. Près de 75 % de l'aluminium produit dans l'histoire circule encore, contre moins de 1 % pour le lithium. Ces chiffres suffisent à rappeler l'urgence de nouvelles stratégies.

Ressources minérales et perception de l'avenir

Les ressources minérales cristallisent nos peurs et nos espoirs. Elles sont finies, et leur extraction devient de plus en plus coûteuse en énergie et en eau. La teneur moyenne en cuivre est passée de plus de 2 % au début du XX^e siècle à moins de 0,6 % aujourd'hui. Comment concilier une demande croissante avec des gisements de plus en plus pauvres ?

Le recyclage et la sobriété apparaissent comme des réponses évidentes. L'aluminium se recycle indéfiniment avec 95 % d'énergie en moins que sa production primaire. Mais moins de 1 % du lithium ou du cobalt des batteries sont aujourd'hui récupérés. La conception d'objets réparables, la lutte contre l'obsolescence, l'allongement de la durée de vie deviennent des leviers indispensables.

Il n'est pas si loin le temps où chaque objet métallique était réutilisé, fondu, transformé à nouveau. Rien n'était perdu. C'est précisément cette logique qu'il nous faut remettre au goût du jour, avec les moyens technologiques et industriels d'aujourd'hui.

Face à la finitude terrestre, l'humanité regarde ailleurs. Les grands fonds marins recèlent des nodules polymétalliques riches en nickel, cobalt, manganèse et cuivre. Mais leur exploitation soulève à juste titre de vives inquiétudes environnementales, et une éventuelle viabilité économique reste à démontrer. L'espace est aussi perçu comme un nouvel horizon. Selon les co-fondateurs de Planetary Resources (notamment Peter Diamandis), un seul astéroïde métallique de taille moyenne pourrait contenir plus de platine que

tout ce qui a été extrait dans l'histoire humaine³. La Lune et Mars sont désormais pensées comme des réserves potentielles de ressources. Mais voulons-nous vraiment déplacer notre modèle extractif dans le cosmos ?

Les minéraux posent ici une question philosophique : comment une humanité consciente de ses limites peut-elle inventer un futur soutenable ?

Conclusion

Du silex des premiers outils aux batteries lithium-ion, des routes du sel aux rêves d'extraction spatiale, les ressources minérales ont toujours accompagné l'humanité. Elles ont bâti nos civilisations, nourri nos révolutions industrielles, déclenché nos conflits. Elles sont à la fois le socle invisible de notre quotidien et le moteur visible de nos ambitions.

Aujourd'hui, elles conditionnent la transition énergétique, la réindustrialisation, la souveraineté. Mais elles révèlent aussi nos limites : l'épuisement progressif des gisements, les dépendances stratégiques, les impacts environnementaux, les conflits pour les accaparer. Comment inventer un futur durable si nous refusons de regarder en face la matérialité de notre monde ?

Les minéraux ne sont pas un sujet technique parmi d'autres. Ils sont le prisme à travers lequel se lit l'histoire et l'avenir de l'humanité. Les intégrer au cœur de nos stratégies – politiques, industrielles, scientifiques, culturelles – n'est pas une option, c'est une nécessité. Car sans eux, que resterait-il de nos promesses de transition, de prospérité, d'exploration ?

³Lindy Elkins-Tanton, directrice de l'École des sciences de la Terre et de l'Espace à l'Université d'État de l'Arizona, a évalué à 10¹⁸ \$ la valeur potentielle de l'astéroïde Pysché 16 (Bloomberg).

Transition énergétique : une rupture dans la dynamique de demande mondiale en métaux ?

Par Emmanuel HACHE, Vincent D'HERBEMONT,
Louis-Marie MALBEC et Candice ROCHE

IFP énergies nouvelles et Observatoire des Ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI)

La transition énergétique entraîne une forte demande en métaux critiques, essentiels pour les véhicules électriques, les énergies renouvelables et l'hydrogène. Un véhicule électrique contient six fois plus de métaux critiques qu'un modèle thermique, et la production d'électricité bas-carbone nécessite davantage de métaux par MW que les sources fossiles. Cette intensité métallique fait craindre une pression croissante sur les ressources. Toutefois, pour plusieurs métaux (cuivre, nickel, cobalt), les rythmes attendus de croissance de la demande restent dans la continuité historique.

Les tensions pourraient davantage venir de la simultanéité de la demande sur l'ensemble des métaux, du contexte minier international, de la volatilité des prix, et des incertitudes technologiques ou géopolitiques. Si le recyclage et les politiques de sobriété peuvent atténuer la pression, les défis géopolitiques et environnementaux (gouvernance des ressources, acceptabilité sociale, durabilité) resteront centraux. La transition vers une économie bas-carbone impose donc de concilier accélération technologique, sécurité des approvisionnements et respect des limites planétaires.

En 2024, les investissements dans les technologies bas-carbone (énergies renouvelables, nucléaire, réseaux, stockage, efficacité énergétique, carburants peu émissifs et véhicules électriques) ont atteint près de 2 100 milliards de dollars, soit une hausse de 11 % par rapport à 2023 (BNEF, 2025). Si ces investissements représentent aujourd'hui quasiment le double de ceux observés dans le secteur des hydrocarbures, un objectif de limitation de la hausse des températures à 1,5°C à l'horizon 2050 nécessiterait une multiplication par 2,5 de ce niveau d'investissement annuel. Ce rythme d'investissement, bien qu'insuffisant au regard des enjeux climatiques, a ravivé l'intérêt pour la sécurisation des ressources minérales, mobilisées en grandes quantités par la transition énergétique. Ces ressources minérales constituent en effet la base des technologies bas-carbone. Elles sont ainsi essentielles pour les moteurs et batteries des véhicules électrifiés (cobalt, cuivre, lithium, nickel, terres rares, graphite), pour les divers composants des parcs éoliens (aluminium, cuivre, graphite, manganèse, molybdène, nickel, etc.), pour les panneaux solaires (argent, cuivre, indium, silicium, etc.) et pour les technologies de l'hydrogène (nickel, palladium, platine). La majeure partie de ces substances étant des métaux, on parle par abus de langage de métaux même si le lithium ou d'autres n'en sont pas. Le niveau de déploiement requis pour ces technologies à l'horizon 2050 pourrait entraîner une forte hausse de la demande en métaux et transformer en profondeur les marchés concernés.

Dans cet article, nous interrogeons les enjeux relatifs aux trajectoires de demande de métaux dans la transition énergétique mondiale. Pour cela, nous analysons d'abord les évolutions possibles des besoins à l'horizon 2050, puis les incertitudes qui y sont associées.

Évaluation des besoins de la transition bas-carbone

En comparaison avec les technologies existantes, les technologies bas-carbone ont une intensité métallique plus importante, ce qui explique la hausse significative attendue de la demande de métaux (voir la Figure 1). Un véhicule électrique contient ainsi 6 fois plus de métaux critiques que son équivalent thermique, notamment 2 à 4 fois plus de cuivre. Au niveau mondial, plus de 17 millions de véhicules électriques ont été mis sur le marché en 2024, soit une hausse de 25 % par rapport à 2023, en majorité en Chine (11 millions), en Europe (3,2 millions) et aux États-Unis (1,6 million) (AIE, 2025). En dehors de ces trois principaux marchés, les ventes ont augmenté de près de 40 % pour atteindre 1,3 million. Cette dynamique est appelée à s'amplifier dans les années à venir, notamment en raison des politiques de décarbonation du transport, telles que l'interdiction de vente de voitures thermiques neuves à partir de 2035 dans l'Union européenne. Le seul secteur du transport est en effet responsable, au niveau mondial, d'environ

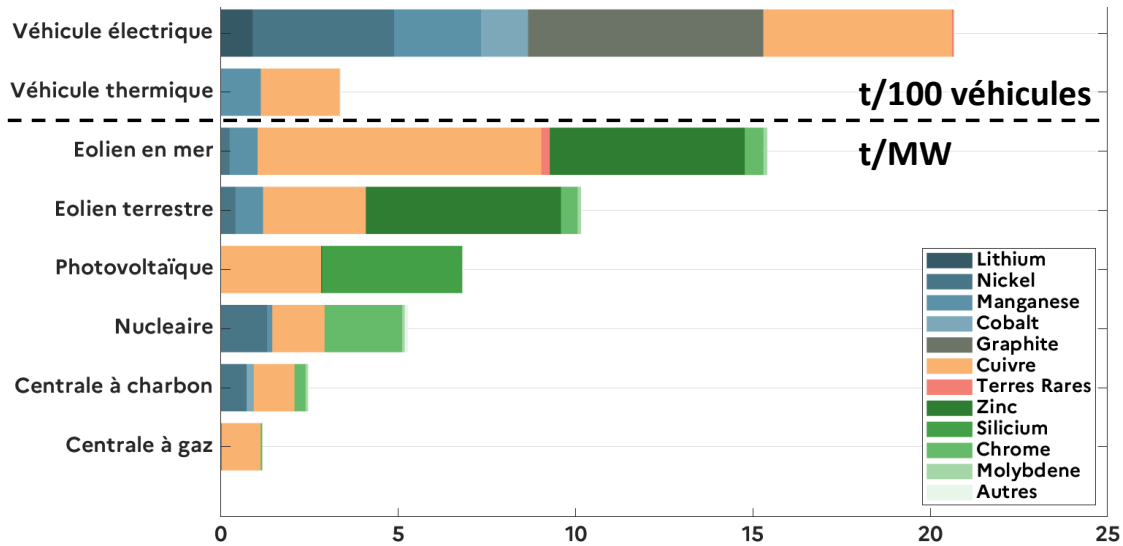


Figure 1 : Intensité des technologies bas-carbone, en t/MW et en t/100 véhicules (Source : AIE).

21 % des émissions de gaz à effet de serre, soit le deuxième contributeur après la production d'électricité, et le premier en Europe (SDES, 2025). Comme les véhicules électriques ne représentent aujourd'hui qu'environ 4 % du stock de véhicules particuliers dans le monde, la dynamique d'électrification devrait ainsi porter la demande en métaux et, notamment, ceux des batteries (cobalt, lithium, manganèse, nickel, graphite, etc.).

Le secteur de la production d'électricité et de chaleur, premier secteur d'émission de gaz à effet de serre au niveau mondial (39 %), contribue aussi à la demande en métaux, notamment le cuivre pour le raccordement aux réseaux, mais également le zinc, le silicium, le chrome ou le manganèse. Si l'on compare ainsi les besoins en métaux par MW installé, les éoliennes en mer en nécessitent environ 15 tonnes, les éoliennes terrestres plus de 10, et le solaire environ 7 – des chiffres à comparer aux technologies thermiques comme les centrales à charbon (environ 2,5 tonnes) ou au gaz (environ 1 tonne) ou au nucléaire (environ 5 tonnes). En 2024, portée par la dynamique de décarbonation, la part de la génération mondiale d'électricité à partir de sources bas-carbone (éolien, solaire, hydroélectricité et nucléaire) a atteint plus de 40 %, portée principalement par le solaire et l'éolien. Or, le charbon (34 % de la génération d'électricité mondiale en 2024) et le gaz (22 %) restent les deux principales sources de production. Leur substitution par des sources décarbonées entraînera *de facto* une hausse de la demande en métaux.

Dans ce contexte et depuis le milieu de la décennie 2010, de nombreux rapports internationaux ont identifié le caractère métallivore de la transition énergétique. Dès 2020, la Banque mondiale chiffrait par exemple l'impact de cette transition sur les métaux avec une multiplication par 6 de la demande de cobalt, de graphite et de lithium à l'horizon 2050. En 2024, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) estimait de son côté qu'un scénario visant la neutralité carbone à l'horizon 2050 entraînerait une forte augmentation des besoins mondiaux en métaux : la demande de cuivre serait multipliée par 1,5, celle de cobalt et de nickel par environ 2, et celle de lithium par 9. Excepté pour le segment des terres rares dont une large partie est utilisée par le secteur du numérique, le premier

usage des métaux devrait être ainsi les technologies bas-carbone à l'horizon 2050.

Face à une hausse marquée de la demande, des inquiétudes émergent quant à une potentielle pression géologique sur les ressources dans les années à venir (Hache *et al.*, 2018 ; Seck *et al.*, 2020 ; 2022). La pression de la dynamique de transition en cours s'exerce ainsi bien sur les métaux dits de transition (cobalt, lithium) que sur les métaux non ferreux traditionnels (aluminium, cuivre, nickel), pour lesquels les usages sectoriels comme la construction (infrastructure, logement) ou les biens de consommation sont déjà très diversifiés.

Une rupture avec les tendances passées ?

Ces projections n'inciteraient dès lors pas à l'optimisme. Il peut être toutefois intéressant de se tourner vers le passé pour déceler une possible rupture de tendance dans les années à venir. Le cuivre est à ce titre particulièrement intéressant : depuis plus d'un siècle, sa production mondiale a crû au rythme moyen de 3 % par an, passant d'environ 1 Mt en 1900 à plus de 20 Mt aujourd'hui (cf. Figure 2).

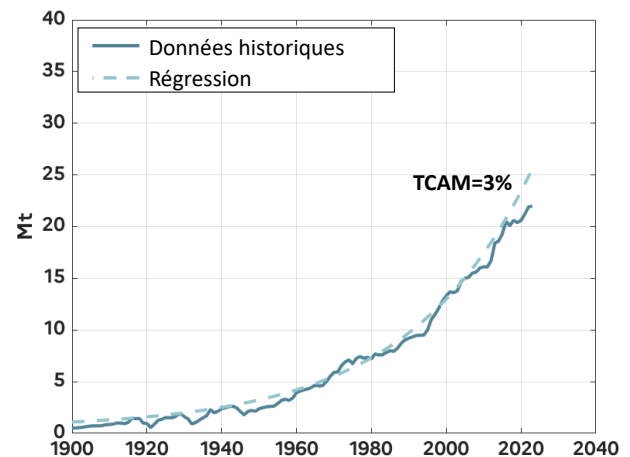


Figure 2 : Évolution de la production mondiale de cuivre (Source : USGS). *Nb* : TCAM = Taux de croissance annuel moyen.

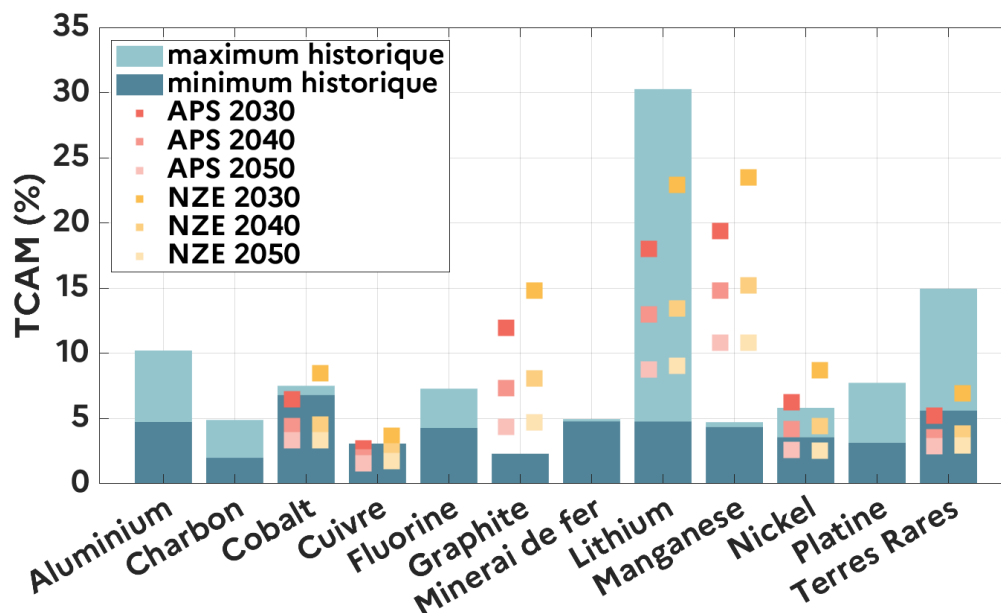


Figure 3 : Taux de croissance annuel historique de la production dans différents scénarios à l'horizon 2030, 2040, 2050 (Source : USGS et AIE, 2024). Nb : TCAM = Taux de croissance annuel moyen.

Scénario APS : il est basé sur les engagements climatiques déclarés par les États.

Scénario NZE : scénario normatif qui décrit une trajectoire permettant d'atteindre zéro émission nette de CO₂ d'ici 2050.

Or, en se basant sur les projections de l'AIE, pour atteindre les niveaux nécessaires à la transition énergétique bas-carbone en 2050, il faudrait un rythme de croissance moyen de... 3 % ! Soit sensiblement le même que celui observé depuis plus d'un siècle. Le constat est similaire pour d'autres métaux. Dans des scénarios climatiques très contraints, les seuls métaux dont le rythme de croissance moyen jusqu'à 2050 pourrait largement dépasser le rythme historique sont ceux nécessaires à la production de batteries : le lithium, le graphite et le manganèse, ainsi que, dans une moindre mesure, le cobalt et le nickel. Si le rythme de croissance moyen de la production de lithium était de 5 % entre 1980 et 2015, ce taux est passé à 30 % sur la période 2020-2023, soit le double de celui nécessaire à la transition bas-carbone. Le cas du graphite est particulier, en raison de l'existence du graphite synthétique. Reste le manganèse, pour lequel la sonnette d'alarme a été tirée, mais plus pour des questions de raffinage que d'extraction. Ainsi, il n'y pas de signe clair d'un changement de régime d'extraction marqué pour la plupart des métaux de la transition énergétique pris individuellement. Des goulots d'étranglement pourraient toutefois apparaître en raison de la complexité croissante des gisements à exploiter et de leurs coûts économiques et environnementaux associés.

En outre, l'originalité de la dynamique de la transition bas-carbone repose sur une simultanéité d'augmentation de demande pour l'ensemble du secteur minier, ce qui, dans un contexte de financement limité, pourrait induire de fortes contraintes. La question dépasse ainsi la seule sphère de la demande, et il est nécessaire d'observer les changements dans la sphère de la production et des réserves. Là encore, la situation paraît plus nuancée que ne le laissent entrevoir les travaux prospectifs. La mise en production d'un nouveau champ minier répond à une logique économique d'offre / demande à travers les prix. L'évolution du ratio R / P (réserves sur production,

exprimé en années d'exploitation des réserves actuelles à production constante) peut être utilisée comme un proxy représentatif de cet équilibre entre offre et demande. Les données publiées par l'USGS (United States Geological Survey) mettent en évidence que ce ratio est particulièrement stable depuis presque trente ans pour le manganèse, le nickel et le cuivre, s'établissant autour de quarante ans. Celui du cobalt diminue, mais semble converger vers celui du cuivre. Cette stabilité est celle de marchés matures, à l'image de ceux du pétrole et du gaz naturel. Aucune indication ne laisse ainsi penser que nous avons changé de régime avec le tournant naissant de la transition bas-carbone. Cela ne se traduit pas non plus dans les prix des métaux, qui, certes volatils, ont retrouvé leur cours d'avant l'invasion de l'Ukraine.

Quelles incertitudes associées aux trajectoires ?

Ces estimations sont toutefois réalisées dans un contexte d'incertitudes marquées sur les facteurs structurants de la demande et l'offre sur les marchés. Concernant la demande, les modèles prospectifs ont de grandes difficultés à anticiper la dynamique réelle de déploiement des technologies bas-carbone, ainsi que les ruptures technologiques et le rythme des transformations. La place des nouvelles chimies de batteries est par exemple intéressante à étudier. Alors qu'en 2021, les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2021) anticipaient un net déclin des batteries au lithium-fer-phosphate (LFP) au profit d'une montée en puissance des technologies à base de nickel-manganèse-cobalt (NMC) pour l'électrification du parc automobile, elles ont sensiblement évolué en 2024. On observe en effet un retournement notable des tendances technologiques marqué par une résurgence des batteries LFP. Or celles-ci ne contiennent ni nickel

ni cobalt, ce qui réduirait potentiellement la demande et constituerait un avantage économique significatif en réduisant l'exposition aux prix élevés et à la forte volatilité de ces matières premières critiques. Il reste de plus difficile de préjuger de l'arrivée sur le marché des futures chimies de batteries.

Outre ces incertitudes technologiques, la mise en place de nombreuses politiques publiques conditionne fortement la demande en métaux. Le développement du recyclage constitue un levier important de réduction de la demande en métaux primaires et, *in fine*, du risque de criticité sur les métaux. Il permettrait d'améliorer la sécurité d'approvisionnement dans les pays dépourvus de ressources primaires en minimisant les effets des hausses des prix sur le coût des importations, et apparaît également comme une réponse pertinente aux problèmes d'acceptabilité des projets miniers. De la même manière, des politiques favorisant le développement de la mobilité soutenable (autopartage, transports en commun, vélo, etc.) pourraient conduire à une limitation de la hausse des besoins, notamment des métaux des batteries (Seck *et al.*, 2020).

À ces interrogations se superposent celles observées sur les dynamiques de production. Alors que les débats sur la transition énergétique se concentraient jusqu'à présent sur la disponibilité des ressources (le réservoir), les tensions croissantes sur les chaînes d'approvisionnement en métaux critiques font plutôt émerger une problématique de flux (le robinet). Autrement dit, ce n'est donc pas la quantité globale de ressources dans le sous-sol qui est en jeu, mais la capacité effective du secteur minier à répondre, en temps voulu et de manière soutenable, à une demande en forte croissance. Plusieurs éléments contribueraient à fragiliser les capacités d'approvisionnement. D'une part, les activités minières sont confrontées à de fortes incertitudes quant à leur rentabilité à long terme, notamment du fait des cycles de prix prolongés qu'ont connus de nombreux métaux au cours des dernières décennies. D'autre part, le temps minier, la durée nécessaire pour développer une mine et la rendre opérationnelle, semble particulièrement critique. Ce délai varie fortement selon les métaux : il est estimé à environ 5 ans pour le lithium, contre jusqu'à 17 ans pour le cuivre. Ce décalage temporel entre la hausse rapide de la demande et les délais de réponse de l'offre constitue un goulot d'étranglement structurel (Hache, 2023). À cela s'ajoutent les goulots potentiels dans le raffinage et les rivalités géopolitiques croissantes autour de l'accès aux ressources stratégiques, qui pourraient faire plonger l'économie mondiale dans une véritable insécurité minière. D'autre part, les impacts environnementaux associés à l'extraction (pollutions, consommation d'eau, déforestation) suscitent des oppositions croissantes, tant au niveau local qu'international, posant des enjeux d'acceptabilité sociale et de durabilité majeurs.

Face à ces multiples contraintes, l'intégration de la sobriété comme pilier de la transition bas-carbone apparaît de plus en plus nécessaire. Reconnue par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) comme un levier d'atténuation majeur du changement climatique, la sobriété permettrait

également de réduire la pression sur les ressources métalliques. Elle constitue, à l'échelle nationale, une opportunité de repenser le contrat social, en conciliant résilience et souveraineté matérielles, soutenabilité écologique et justice sociale.

Conclusion

En raison d'une utilisation intensive des métaux dans les technologies bas-carbone, les trajectoires de demande font apparaître une hausse marquée des besoins à l'horizon 2050. Toutefois, pour certains métaux (cuivre, terres rares, cobalt, nickel), les rythmes d'augmentation n'apparaissent pas en rupture avec les tendances observées par le passé. Ces trajectoires sont néanmoins soumises à de profondes incertitudes à la fois sur la demande (changements technologiques ou sociétaux) et sur l'offre (capacité du secteur à alimenter les marchés, recyclage). Dès lors, il semble que les questions géopolitiques ou environnementales seront les deux éléments les plus structurants des marchés dans les années à venir. En effet, la capacité des acteurs à gérer les questions de dépendance et de souveraineté sera essentielle dans un monde sujet aux politiques de restrictions et au nationalisme des ressources. Dans ce contexte, la question de la durabilité environnementale, sociale et éthique des activités minières paraît également centrale.

Bibliographie

- AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (AIE) (2025), *Global EV Outlook 2025, Expanding sales in diverse markets*, mai 2025.
- AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (AIE) (2024), *Global Critical Minerals Outlook 2024*, mai 2024.
- AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (AIE) (2021), *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, mai 2021.
- BANQUE MONDIALE (2020), *Minerals for climate action: The mineral intensity of the clean energy transition*.
- BLOOMBERGNEF (2025), *Energy Transition Investment Trends 2025*.
- HACHE E. (2024), « Prospective de l'insécurité minière : anticiper la nouvelle ère métallique de la transition bas-carbone », *Futuribles*, janvier-mars 2024.
- HACHE E. & LOUVET B. (2023), *Métaux, le nouvel or noir*, Éditions du Rocher, 240 p.
- HACHE E., SECK G. S., SIMOËN M., BONNET C. & CARCANAGUE S. (2019), "Critical raw materials and transportation sector electrification: A detailed bottom-up analysis in world transport", *Applied Energy*, 240, pp. 6-25.
- HACHE E. (2023), « Transition bas-carbone : vers une nouvelle géopolitique des matières premières », *L'économie politique*, n°97, pp. 59-70.
- HACHE E., D'HERBEMONT V. & MALBEC L.-M. (2023), « Criticité et géopolitique des matières premières

requis par les technologies bas-carbone », *Annales des Mines - Responsabilité et Environnement*, n°111, juillet.

SECK G., HACHE E., BONNET C., SIMOËN M. & CARCARNAGUE S. (2020), "Copper at the crossroads: Assessment of the interactions between low-carbon energy transition and supply limitations", *Resources, Conservation and Recycling*, 163, p. 105072.

SERVICE DES DONNÉES ET ÉTUDES STATISTIQUES (SDES), Chiffres clés du climat. France, Europe et Monde, édition 2024, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat/fr/livre>

Les besoins en métaux pour le secteur du numérique

Par Erwann FANGEAT et Olga KERGARAVAT
ADEME

Les caractéristiques des métaux les rendent indispensables dans tous les secteurs industriels et dans les biens d'équipements du quotidien : secteur de l'énergie, TIC (Technologies de l'information et de la communication), transports, construction.

Dans le domaine du numérique, les métaux jouent un rôle important dans la fabrication de divers composants et technologies. Ils sont classés en grandes « familles » en fonction de leurs utilisations spécifiques. Les principales familles identifiées incluent les métaux de structure, les métaux pour la fabrication d'aimants, les métaux de batterie, les métaux semi-conducteurs, les métaux conducteurs, et les métaux pour écrans. Les impacts environnementaux et sociaux sont importants, notamment au cours de la phase d'extraction minière et de raffinage.

La cartographie mondiale de l'extraction des métaux utilisés dans les équipements numériques montre la forte dépendance à certains pays, en particulier la Chine, qui est le premier producteur mondial d'une grande partie des métaux mobilisés pour le numérique.

L'étain, l'argent, le ruthénium, le nickel et l'antimoine sont jugés (ADEME, Étude métaux et Numérique, 2024) comme particulièrement critiques, compte tenu de la convergence de risques sociaux, environnementaux ou encore géopolitiques.

Le recyclage des métaux issus de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) est indispensable mais encore très limité, notamment en raison de la dispersion des matières, de leurs faibles quantités en valeur absolue par appareil ou encore de la généralisation de l'utilisation d'alliages, et ne cible que les métaux les plus chers (par exemple or, argent, cuivre, platine).

Les technologies du numérique, compte tenu de l'évolution des usages et de la multiplication des équipements (nouveautés tels que les objets connectés, augmentation en volume, augmentation des performances), représentent un poids environnemental de plus en plus conséquent, notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre, de consommation d'énergie et de ressources (métaux).

L'usage du numérique ne cesse de croître et posera à terme la question de sa soutenabilité au regard des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de consommation de ressources et, notamment, de métaux.

L'empreinte matières des équipements numériques a été identifiée, notamment dans une étude menée par l'ADEME sur les besoins en métaux dans le secteur du numérique¹ (ADEME, 2024), comme l'un des enjeux majeurs de l'empreinte environnementale du secteur, générant également des impacts importants sur les populations avoisinantes des sites d'extraction et de raffinage, des risques géopolitiques et des risques de conflits armés.

¹ <https://bibliothèque.ademe.fr/industrie-et-production-durable/7713-etude-numerique-et-metaux.html>

Des métaux utilisés dans le secteur numérique pour leurs multiples caractéristiques

Les substances minérales utilisées pour le numérique sont souvent des métaux (et ce terme sera utilisé par abus de langage dans la suite) qui ont de multiples caractéristiques comme la très bonne conductivité, le fort potentiel électrochimique, la résistance à la corrosion ou les propriétés ferromagnétiques. Les caractéristiques suivantes ont été identifiées pour l'utilisation des métaux dans le numérique :

- les métaux à fort potentiel électrochimique sont plutôt utilisés dans la fabrication des batteries ;
- les métaux à permittivité diélectrique élevée sont généralement utilisés dans la confection de condensateurs ;
- les métaux résistants et / ou légers sont souvent utilisés pour la structure des équipements et au sein d'alliages dans le but de les rendre résistants tout en leur permettant de garder une certaine légèreté ;
- les métaux possédant un point de fusion élevé trouvent habituellement une utilité au sein d'alliages pour donner une résistance aux hautes températures ;

Caractéristique	Al	Sb	Ag	Co	Cu	Sn	Ga	Ge	In	Li	Mg	Mn	Ni	Au	Pd	Pt	Ru	Si	Ta	Pr, Nd	Dy	W	Y	Zn
Fort potentiel électrochimique										X														
Permittivité élevée															X				X					
Résistant et/ou léger	X									X	X													
Résistant à la corrosion ou l'usure	X		X	X		X						X	X	X	X	X	X		X			X		X
Point de fusion élevé				X								X	X		X	X	X		X			X	X	
Ferromagnétique				X								X	X							X	X			
Très bons conducteurs électriques	X		X		X										X									
Semi-conducteurs		X						X	X	X								X						
Propriétés optiques						X	X	X	X									X		X			X	
Conducteur électrique et transparent						X			X														X	
Retardateur de flammes		X																						

Tableau 1 : Caractéristiques recensées des métaux pour application dans le secteur numérique
(Source : Elementarium, Mineral Info, JRC 2023, CRM 2020 Critical Factsheets et CRM 2020 Non-Critical Factsheets).

- les métaux ferromagnétiques permettent la fabrication d'aimants permanents ;
- les métaux très bons conducteurs sont souvent utilisés comme conducteurs électriques ou en revêtement pour augmenter la conductivité d'un autre métal ;
- les métaux semi-conducteurs sont utiles en électronique (circuits intégrés, carte de circuit imprimé, etc.) ;
- les métaux possédant des propriétés optiques sont utilisés plutôt pour la confection de fibres optiques ;
- les métaux conducteurs électriques transparents sont généralement utilisés dans les écrans tactiles.

Des besoins en métaux spécifiques au numérique très différents d'un métal à l'autre

La Figure 1 présente en ordonnées la demande mondiale du numérique par métal (en kt), et en abscisses la part du numérique dans la demande mondiale selon Malmodin *et al.* (2018).

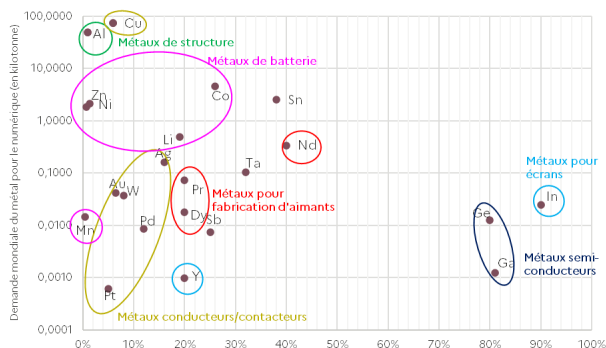


Figure 1 : Part du numérique dans les secteurs utilisateurs pour les métaux du périmètre de l'étude
(Source : Deloitte, d'après diverses données ; Malmodin *et al.*, 2018).

Ce graphique conduit à plusieurs analyses :

- La demande mondiale pour certains métaux est majoritairement destinée au secteur numérique. C'est le cas, notamment, des métaux pour écrans (indium) et des métaux aux propriétés semi-conductrices (gallium, germanium). Ces métaux sont consommés en faibles quantités, mais sont essentiels pour ce secteur. Cela pourrait indiquer un risque en termes d'approvisionnement si leur production est perturbée.
- Certains métaux comme le cuivre (Cu) et l'aluminium (Al) représentent les quantités demandées les plus élevées pour le numérique parmi les métaux analysés. En revanche, la part du secteur numérique dans les secteurs utilisateurs est faible.
- Les métaux précieux (dont les métaux conducteurs) et semi-conducteurs représentent tout à la fois une faible part de la consommation mondiale des métaux destinés au numérique et des volumes faibles à l'intérieur des équipements numériques. Leur utilisation peut, notamment, être freinée par un prix élevé (cas des métaux précieux).

Des impacts importants sur toute la chaîne de valeur

Les métaux passent par de nombreuses étapes de transformation avant leur intégration dans un équipement numérique. La chaîne de valeur « Métaux et numérique » est présentée schématiquement en Figure 2, avec une vision simplifiée des étapes de la chaîne de valeur d'un minerai.

- D'un point de vue socio-environnemental, la chaîne de valeur actuelle des métaux est responsable de nombreux impacts négatifs, notamment au cours de la phase d'extraction minière mais aussi dans les phases de minéralogie / pré traitement et de métallurgie / raffinage (forte consommation d'énergie, d'eau douce, de terres agricoles ou forestières, production de déchets solides, liquides et / ou d'aérosols, rejets de polluants dans les sols, l'air et l'eau, éventuel non-respect des droits fondamentaux,...).

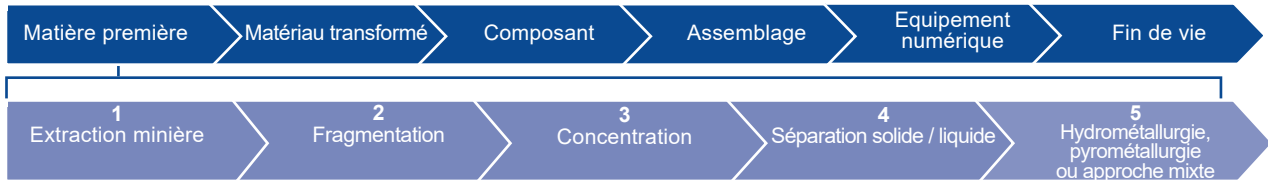


Figure 2 : Étapes de la chaîne de valeur des métaux utilisés dans le secteur numérique
(Sources : JRC, 2023 ; RECORD, 2023).

Une dépendance importante à un pays comme la Chine

D'un point de vue économique, la dépendance aux importations des acteurs européens du numérique pour leurs approvisionnements en métaux est élevée, notamment vis-à-vis de la Chine (cf. « Le rôle clé de la Chine dans les chaînes de valeur des minerais critiques », pp. 47-51).

La cartographie des chaînes de valeur « métaux et numérique » montre la forte concentration des activités d'extraction dans certains pays, en particulier la Chine. En effet, la Chine est le premier producteur mondial de 15 des 25 principaux métaux mobilisés pour le numérique, et en situation de quasi-monopole pour 7 d'entre eux : dysprosium, gallium, germanium, néodyme, praséodyme, tungstène, yttrium.

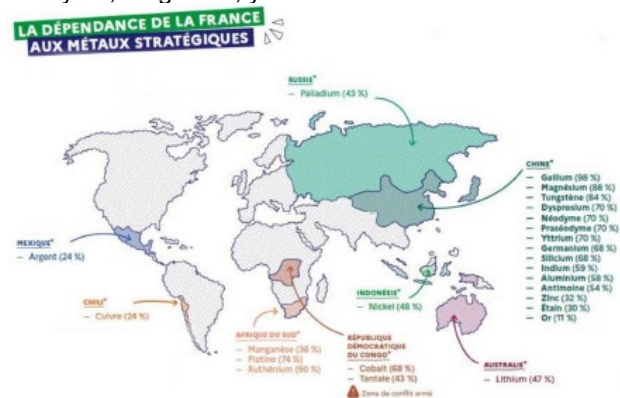


Figure 3 : Dépendance de la France aux métaux stratégiques.
Cartographie extraite de l'étude ADEME Numérique et Métaux, 2024 (Source : Deloitte, d'après diverses sources dont USGS).

L'enjeu de souveraineté de la localisation des chaînes de valeur est autant lié à l'extraction des métaux qu'au développement de capacités de raffinage des métaux. Les métaux sont raffinés à un degré de pureté très élevé, par des procédés spécifiques dont les coûts d'investissement sont élevés.

Un niveau de criticité varié

L'analyse de criticité consiste à croiser deux dimensions pour classer les métaux selon leur degré de criticité, à l'échelle d'un pays, d'un groupe de pays ou d'une organisation (CGDD, 2023) :

- l'importance stratégique du métal pour l'entité ;
- le risque sur l'approvisionnement du métal.

De nombreuses méthodologies en France et à l'international ont été développées pour estimer la criticité d'un métal, notamment par le BRGM et l'OFREMI,

la Commission européenne, l'IFPEN, l'USGS, le BGS. Dans le cadre de l'étude ADEME sur les métaux et le numérique (ADEME, 2024), un travail d'agrégation de ces différentes méthodologies et indicateurs² a été réalisé.

L'étude ADEME conclut que trois métaux ont des scores de criticité particulièrement élevés :

- L'étain (Sn), pour lequel les risques géopolitiques d'approvisionnement sont élevés, du fait de la concentration de sa production dans de nombreux pays à l'indice WGI (World Governance Index) faible (par exemple Myanmar, République Démocratique du Congo), du très fort déficit d'approvisionnement anticipé, et du risque sur la longévité des réserves connues. L'étain est utilisé dans les alliages de brasage de circuits imprimés, et dans les écrans tactiles sous forme d'oxyde d'indium et d'étain (ITO).
- L'argent (Ag) présente également des risques géopolitiques d'approvisionnement élevés, couplés avec des incertitudes importantes sur la disponibilité du métal, ainsi qu'un impact environnemental de l'extraction plus élevé, par exemple lié à l'utilisation de mercure dans les mines artisanales (SCREEN, 2020). L'argent est utilisé en particulier comme commutateur et dans les cartes électroniques, du fait de ses propriétés conductrices et de résistance à la corrosion.
- Le ruthénium (Ru) se distingue par un impact environnemental de l'extraction particulièrement élevé ainsi que des incertitudes fortes sur sa disponibilité. Cependant, il présente un faible risque sur la longévité des réserves connues, contrastant avec l'étain et l'argent. Il est utilisé dans les couches et sous-couches magnétiques sur les disques durs pour les applications de stockage de données, comme pâte en couches épaisses et résistives, dans les résistances à puce et les circuits électroniques intégrés hybrides, et sous la forme de sels organométalliques pour les applications de revêtement dans les puces mémoires de dernière technologie.

L'évaluation de la criticité des métaux pour le secteur révèle que les acteurs économiques du secteur en France ont encore un faible niveau de maturité sur la question. Un des éléments d'explication possibles est l'absence d'impact significatif du prix des métaux sur la production d'équipements, les fabricants étant soit en capacité d'absorber les hausses de prix, soit non exposés à des restrictions d'approvisionnement.

²Les indicateurs suivants ont été pris en compte dans la notation : longévité des réserves connues, incertitude sur la disponibilité du métal, risques géopolitiques de l'approvisionnement, volatilité du prix du métal, performance environnementale de la production minière et performance sociétale de la production minière.

L'évaluation de la criticité des métaux pour le secteur du numérique pourrait ainsi faire ressortir d'éventuels conflits d'usages liés à la double transition énergétique et numérique à moyen et long terme, puisque les deux transitions vont demander des métaux identiques, tels que le cuivre³.

Un faible nombre de métaux sont recyclés

À date, le devenir des métaux est incertain une fois collectés, comme l'indique le Tableau 2 :

- pour près de la moitié des métaux mobilisés pour le numérique, il n'existe pas de filière de recyclage à l'échelle industrielle en France et dans l'UE, en particulier du fait de l'absence de demande justifiant l'opération de recyclage ;
- lorsque de telles filières existent, il n'y a pas de preuve que les métaux récupérés soient réincorporés dans de nouveaux équipements numériques (notamment parce que les équipements ne sont pas fabriqués en Europe). C'est le cas pour les métaux « abondants » dans les équipements numériques (par exemple aluminium, cuivre) et pour ceux dont la valeur à l'issue du recyclage reste élevée (par exemple or).

Plusieurs freins à la valorisation en recyclage des métaux issus des DEEE subsistent tout au long des étapes de la fin de vie des équipements numériques :

- freins liés à la collecte : thésaurisation et hibernation des DEEE, existence de filières illégales, avantages économiques à l'export d'équipements / composants, etc. ;
- freins liés au tri des DEEE et à l'extraction des composants pour recyclage : manque d'éco-conception pour démonter certains composants (par exemple les

batteries), équipements trop petits ou trop gros pour être broyés, etc. ;

- freins liés à l'extraction des métaux : conflits techniques de récupération entre métaux, très faible concentration en certains métaux, nombreux métaux sous la forme d'alliages, faible rentabilité économique de l'extraction qui pourrait être liée à l'absence de flux de métaux concentrés et en quantité suffisante pour pouvoir rentabiliser le traitement, limités à la récupération des métaux des procédés pyro / hydro / électro-métallurgiques, etc. ;
- freins liés aux données sur la composition des équipements électriques et électroniques qui sont les plus souvent lacunaires.

En particulier, seuls les métaux de structure et les métaux précieux sont récupérés dans les déchets d'équipements numériques, en raison d'un frein économique à l'extraction des autres métaux et de manque de la demande.

Les métaux issus des DEEE sont généralement recyclés en boucle ouverte dans les applications différentes de leur utilisation d'origine. La demande est très faible pour la réincorporation des métaux en boucle fermée, même dans les cas où le taux de pureté est très élevé.

En règle générale, la volatilité du prix des métaux influence la viabilité des projets de récupération des métaux. De plus, les prix des matières premières de recyclage (MPR) ne sont pas suffisamment compétitifs par rapport à ceux des matières premières vierges (MPV) pour que leur extraction dans la mine urbaine soit économiquement pertinente.

Face à cette forte hausse attendue de la demande de métaux, l'optimisation du recyclage de nos mines urbaines est indispensable, afin de constituer à terme et au niveau européen des stocks de métaux stratégiques, mais insuffisante pour répondre aux besoins.

³Avis ADEME, OFREMI, 2025. Transition énergétique et matériaux stratégiques : dépendances, sobriété et recyclage.

Recyclage performant	Recyclage partiel	Absence de recyclage ou recyclage en voie de développement
●	●	●
Le recyclage de ces métaux est assuré à l'échelle industrielle en France et / ou dans le reste de l'UE. Des technologies permettant de les récupérer ont été déployées par plusieurs acteurs, qui y trouvent un équilibre économique.	Des boucles de recyclage existent à l'échelle industrielle pour ces métaux, mais sont peu nombreuses en raison d'un manque de rentabilité économique à leur récupération et / ou de complexités techniques pour les récupérer.	Le recyclage de ces métaux du numérique est peu ou pas déployé, notamment pour des raisons techniques (faible contenu du métal par équipement), technologiques (absence de procédé performant) ou économiques (faible rentabilité). Plusieurs projets pilotes sont en cours pour certains métaux.
<ul style="list-style-type: none"> • aluminium • argent • cuivre • cobalt • nickel • or • palladium • platine 	<ul style="list-style-type: none"> • antimoine • étain • lithium • ruthénium • zinc 	<ul style="list-style-type: none"> • dysprosium • gallium • germanium • indium • magnésium • manganèse • néodyme • praséodyme • silicium • tantale • tungstène • yttrium

Tableau 2 : Récapitulatif des niveaux de recyclage de 25 métaux utilisés dans le secteur du numérique (Source : ADEME, Deloitte, 2024)

Conclusion

L'évaluation de la consommation en métaux des équipements numériques est rendue difficile par le peu d'information disponible sur leur composition. Cette opacité se retrouve également s'agissant des chaînes de valeur : tant en amont, de la mine à l'équipement, qu'en aval, après la fin de vie de ces équipements, la chaîne de valeur des métaux comporte de nombreuses zones d'ombre qu'une recherche approfondie ne permet qu'en partie d'éclairer.

Les données accessibles permettent cependant de constater une forte concentration de l'extraction de métaux : la Chine se trouve en effet en quasi-monopole pour l'extraction d'une dizaine de métaux utilisés dans les équipements numériques. Ceux-ci nécessitent par ailleurs un niveau très élevé de pureté. Ces opérations, dites de raffinage, sont réalisées par un nombre limité d'acteurs en aval de l'extraction. Enfin, la production des équipements eux-mêmes est le plus souvent réalisée en Asie de l'Est.

En aval de la chaîne de valeur, le devenir des métaux, une fois collectés, est incertain : pour la moitié d'entre eux, il n'existe pas de filière de recyclage à échelle industrielle en France et dans l'UE, en particulier du fait de l'absence de demande justifiant l'opération de recyclage. Lorsqu'elles existent, en l'état actuel du marché et de la répartition des chaînes de valeur dans le monde, il n'existe pas de preuve que les métaux recyclés sont réincorporés dans de nouveaux équipements numériques.

L'évaluation de la criticité des métaux pour le secteur révèle que les acteurs économiques du secteur en France ont encore un faible niveau de maturité sur la question. Un des éléments d'explication possibles est l'absence d'impact significatif du prix des métaux sur la production d'équipements, les fabricants étant soit en capacité d'absorber les hausses de prix, soit non exposés à des restrictions d'approvisionnement.

Enfin, l'évaluation de la criticité des métaux pourrait ainsi faire ressortir d'éventuels conflits d'usages liés à la double transition énergétique et numérique à moyen et long terme, puisque les deux transitions vont demander des métaux identiques.

Bibliographie

AVIS ADEME, OFREMI (2025), Transition énergétique et matériaux stratégiques : dépendances, sobriété et recyclage.

AVIS ADEME (2025), Numérique & Environnement : entre opportunité et nécessaire sobriété.

FRANCE STRATÉGIE (2020), La consommation de métaux du numérique : un secteur loin d'être dématérialisé, document de travail.

MALMODIN J., BERGMARK P. & MATINFAR S., (2018), "A high-level estimate of the material footprints of the ICT and E&M sector, ICT for Sustainability 2018", *EPiC Series in Computing*, vol. 52, pp. 168-186.

OLLION L. (Deloitte), DRAPEAU P. (Deloitte), BOZTEPE L. (Deloitte), DE VILLERS S. (Deloitte), BOUYER G. (Deloitte), VERGARI L. (Deloitte), FANGEAT E. (ADEME) & KERGARAVAT O. (ADEME) (2024), Étude des besoins en métaux dans le secteur numérique.

Besoins de l'industrie aéronautique

Par Anthony BOURDON

Gifas

Les contraintes géopolitiques de ces dernières années nous ont rappelé notre dépendance extérieure à l'approvisionnement en minerais et matières premières. Vues par certains comme des risques, elles offrent en réalité de vraies opportunités de développer de nouvelles chaînes de valeur, d'encourager l'économie circulaire afin de redonner un sens industriel à la France et à l'Europe, tout en ayant en ligne de mire la compétitivité et la productivité, fers de lance d'une industrie pérenne et innovante.

L'aéronautique a toujours été un secteur technologique de pointe. L'utilisation des meilleurs matériaux, c'est-à-dire ayant les meilleures propriétés mécaniques, à la chaleur, à la corrosion, a toujours été une condition *sine qua non* d'une industrie au plus haut niveau de performances.

La transition énergétique ou décarbonation est un vecteur de changement important pour l'industrie aérospatiale, qui appelle à une nouvelle génération d'aéronefs plus frugaux.

La complexité de cette industrie, pour laquelle l'Europe est toujours en pointe, oblige à l'humilité tant le champ d'étude peut être grand ; il a été décidé de limiter cette dernière étude aux matériaux actuels et à ceux perçus comme pouvant contribuer à celui de demain.

En espérant que vous prendrez plaisir à lire ces quelques lignes, il est de bon ton de rappeler que nous sommes à un point pivot de vassalisation ou, au contraire, de voir ce jour opportun pour réinventer une industrie française et européenne souveraine et résiliente ; pour mettre en œuvre et en avant la qualité de nos ingénieurs, centres de recherche et des écosystèmes scientifiques-industriels français.

Introduction

Les défis actuels de montée en cadence de l'ensemble de la filière aérospatiale, sur les deux domaines que sont l'aéronautique et le spatial et leurs deux marchés attribués que sont le civil et la défense, ainsi que les contraintes géopolitiques persistantes, voire en forte augmentation, rappellent notre dépendance extérieure pour l'approvisionnement en minerais et matières premières.

Les chaînes de valeur pré-Covid étaient bien établies, avec un équilibre d'approvisionnement géographique faisant sens. Depuis, les déséquilibres engendrés par le Covid-19, puis par l'invasion russe en Ukraine et l'ensemble des événements géopolitiques mondiaux ont obligé à repenser nos approvisionnements de minerais, et sont devenus une opportunité pour étudier nos chaînes de valeur et en construire de nouvelles afin de gagner en résilience et en souveraineté. Il s'agit d'opportunités offertes de développer l'économie circulaire tout en restant dans un objectif de compétitivité, qui reste le fer de lance d'une industrie pérenne et innovante.

L'aéronautique a toujours été un secteur technologique de pointe pour lequel les matériaux utilisés ont suivi les besoins de performances des aéronefs tant sur les civils que militaires. Les matériaux ont d'ailleurs évolué au rythme de l'innovation et des performances souhaitées pour les aéronefs. Depuis les premiers avions en bois, l'aéronautique utilise ce jour les meilleurs matériaux ayant les propriétés

mécaniques en résistance à la chaleur pour atteindre les performances attendues.

La transition énergétique ou décarbonation est un vecteur de changement important pour l'industrie aérospatiale, qui nécessite aussi de revoir ses besoins en matériaux, de mieux différencier les usages et pourquoi pas d'imaginer de nouveaux matériaux ayant des propriétés mécaniques meilleures, dont les *process* de fabrication sont plus respectueux de l'environnement et pour lesquels la maîtrise technologique se situerait en Europe.

La future génération d'avions sera aussi un vecteur fort des changements de modèle classique d'avion utilisant les matériaux métalliques actuels connus, pour des matériaux dont les propriétés de résistance et apportant une plus grande légèreté globale viendront contribuer à rendre ces aéronefs du futur plus frugaux.

Le champ d'étude peut être très grand ; il a été décidé de limiter cette dernière aux matériaux apparaissant comme déterminants pour l'industrie aéronautique actuelle mais aussi pour ceux qui se positionneront probablement comme incontournables dans le cadre du développement d'un futur aéronef répondant aux objectifs de transition énergétique de l'aviation.

Afin de vulgariser les notions, il est bon de savoir que les matériaux métalliques utilisés dans l'aéronautique du type matériaux durs comme le titane ou l'Inconel, les matériaux à base nickel ou base cobalt ainsi que les alliages d'aluminium, obéissent à une normalisation

destinée à garantir la performance finale des produits fabriqués pour des applications certifiées.

Les procédés de transformation de ces matériaux et de fabrication des pièces dites « avionnables » sont soumis à des qualifications qui garantissent la performance finale des produits fabriqués.

Pour ces raisons, l'approvisionnement à partir de nouvelles sources, la réutilisation de matière issue des procédés de transformation (chutes, copeaux, rebuts), nécessitent de mettre en place une maîtrise de l'origine de ces matières, et des actions de démonstration de la qualité des procédés et des produits fabriqués.

Le composite

Légers, résistants, et de plus en plus performants, les matériaux composites (définition Wikipédia : « Un matériau composite est un **matériau** que la **technologie** moderne a analysé comme un **assemblage**, ou un mélange hétérogène, d'au moins deux composants non **miscibles**. Le résultat possède des propriétés avantageuses que les composants seuls ne possèdent pas. On distingue trois éléments d'un composite : une **matrice**, des renforts (souvent des grains, ou des fils ou fibres, tissés ou non, ou encore une **armature** solide), et (optionnellement) une **charge** et des **additifs** ») n'ont pas fini de révolutionner l'aéronautique. En ciblant la réduction de masse des avions, qui reste un défi permanent pour l'industrie aéronautique, les matériaux composites sont un des axes majeurs pour diminuer la consommation de carburant et les émissions de CO₂ associées, pour un transport aérien plus économe et plus écologique.

Mais ce n'est pas la seule contrainte s'imposant aux industriels, car les matériaux employés doivent être légers, certes, mais également rigides et suffisamment robustes pour résister à des sollicitations mécaniques intenses, voire à des impacts de grêlons ou de volatiles (dits tests aux chocs d'oiseaux), lorsqu'il s'agit de certains éléments d'aéronefs. Les matériaux composites sont utilisés depuis plus de trente ans, ils font l'objet d'un effort de recherche et d'innovation continus. Dans ce cadre, deux grandes familles de matériaux composites avec leurs technologies associées sont identifiées : composites thermodurs (TS) et composites thermoplastiques (TP).

Les matériaux composites utilisés dans l'aéronautique s'organisent en deux grandes familles principalement, qui permettent d'adresser l'exhaustivité des usages.

Les matériaux composites dits à matrice organique (CMO) sont essentiellement à base de résine polymère thermodurcissable et de fibres de carbone. Ces matériaux résistent à des températures maximales de 100 à 150°C (jusqu'à 250°C pour des résines et des applications très spécifiques). Pour les raisons citées précédemment, les composites CMO offrent à ce jour le meilleur compromis possible par rapport aux matériaux métalliques pour les températures inférieures à 150°C. L'un des axes d'innovation est de poursuivre la recherche fondamentale afin d'augmenter leur domaine de température tout en conservant leurs propriétés.

Pour des pièces exposées à des températures supérieures, que l'on retrouvera principalement dans les parties chaudes des moteurs, seuls les composites à matrice céramique (CMC) peuvent être utilisés. Ces matériaux, dont la mise en œuvre reste parfois complexe, répondent parfaitement au besoin d'application extrême.

D'autres types de composite existent, avec des structures différentes qui apportent d'autres propriétés, comme les matériaux composites stratifiés qui réduisent à la fois la masse et les émissions sonores. À chaque fois, le cas d'usage doit être abordé selon le besoin, en apportant une réponse à une contrainte de conception.

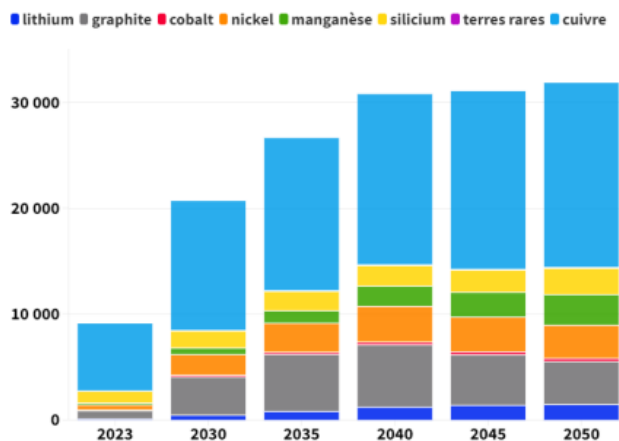
Le marché mondial, estimé à 4,7 millions de tonnes en 2024, devrait croître à 6 millions d'ici 2029 (+5 %/an), illustrant l'importance de structurer une offre française forte, couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur par des partenariats entre clients et fournisseurs. Plus que jamais, il est donc naturel de penser que la consommation de ces matériaux à l'horizon 2045-2050 aura probablement doublé. Cela ne pourra cependant se faire que si les enjeux pour améliorer les performances des matériaux (robustesse, durabilité, résistance thermique, tenue au feu...) et optimiser les procédés de fabrication, notamment par l'automatisation et la simulation, sont atteints ; ce qui implique une réflexion plus large au niveau de la structure du système industriel de production du futur, et surtout un engagement de l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur par la signature d'accords entre les fournisseurs partenaires et les plus grands utilisateurs.

Les minerais et matériaux stratégiques de la transition écologique

La transition énergétique enclenchée depuis de nombreuses années s'appuie sur des technologies faisant un usage intense de certains minerais, soit dits « critiques » ou soit « stratégiques » comme le lithium, le graphite, le nickel, le manganèse, le silicium, les terres rares (germanium, gallium, rhénium, ruthénium...), le cuivre, etc.

À court terme, bien que l'offre mondiale en minerais stratégiques apparaisse suffisante pour répondre aux nouveaux usages liés à la transition énergétique (à l'exception notable de certains métaux génériques comme le cuivre), la surexposition industrielle à des pays comme la Chine est identifiée comme un risque majeur pouvant impacter le bon déroulé de cette révolution industrielle. En effet, bien que l'extraction des principaux minerais stratégiques soit distribuée entre plusieurs pays, la Chine domine désormais largement le raffinage et la transformation de la majeure partie d'entre eux, se plaçant en situation d'oligopole, si ce n'est de monopole pour certains (cf. « Le rôle clé de la Chine dans les chaînes de valeur des minerais critiques », pp. 47-51).

D'ici 2050, les meilleurs spécialistes estiment que la demande mondiale pourrait plus que tripler pour répondre aux objectifs environnementaux internationaux et nationaux (cf., graphique ci-dessous). Pour certains minerais (lithium, graphite, cobalt), cette hausse est largement supérieure au niveau de production actuel.



Prévisions d'évolution de la demande de minerais stratégiques à horizon 2050 (en milliers de tonnes)
(Source : Agence internationale de l'énergie, selon un scénario correspondant aux objectifs climatiques annoncés et réalisé en mai 2024)

Malgré des ressources minières *a priori* suffisantes et malgré la volonté de nombreux États producteurs de valoriser leurs minerais, des pénuries sont probables du fait de manques chroniques d'investissements dans la dernière décennie (on rappelle qu'il faut en moyenne plus de quinze ans pour ouvrir une mine), ou des conséquences probables de jeux géopolitiques subis par l'Europe. Dans les deux cas, cela aura un impact significatif sur les chaînes d'approvisionnement mondiales ; d'autant que le contexte récent de prix bas pèse à nouveau sur la rentabilité anticipée des projets d'investissement et de nouveaux sites de production, ce qui pourrait amener à des reports, au pire à des annulations de projets industriels.

Les superalliages

Largement utilisés pour les parties chaudes moteur ou les composants de pièces critiques soumis à de très fortes contraintes mécaniques, la fabrication des superalliages pour l'industrie aérospatiale reste à très forte domination américaine.

En effet, les approvisionnements en superalliages sont très majoritairement (> 90 %) réalisés auprès des *leaders* mondiaux américains, qui disposent de grandes capacités en place et de qualifications sur les applications pour pièces tournantes critiques (disques de moteurs). Ainsi, certains superalliages pour disques de turbine ou alliages Monocristaux pour aubages de turbines par exemple sont approvisionnés en source unique auprès de sociétés américaines. Il en va de même pour certains procédés de transformation, filages de barres en métallurgie des poudres, y compris pour des applications militaires.

L'acteur européen de référence est Aubert & Duval (F). Aubert & Duval agrègent les expertises de conception et de production de superalliages critiques qui existent en France. Dans une moindre mesure pour Böhler (Au), ces expertises sont en cours de développement en Europe. Des solutions de réduction pour limiter les risques sur ces matériaux sont actuellement en développement chez les principaux industriels concernés.

Concernant l'extraction minière pour les superalliages, le chrome, le niobium et l'Hafnium sont à risque, car il n'existe pas de production minière conséquente en Europe. En revanche, il convient de rappeler que la France est l'un des premiers producteurs mondiaux d'Hafnium, qui est une impureté contenue dans le zirconium utilisé pour les gaines de combustibles nucléaires.

Nous disposons en Europe, et plus particulièrement en France, d'une mine secondaire considérable au travers des chutes et copeaux générés par l'industrie manufacturière aéronautique, mais ces matières ne sont pas recyclées en Europe du fait de l'absence d'une filière efficace de recyclage pour les superalliages. Une telle filière doit être développée avec des incitations financières fortes pour accompagner une stratégie superalliages nationale, et devenir le *leader* européen de ces matériaux critiques dont les usages peuvent être étendus au-delà de l'aéronautique.

Il s'agit donc pour l'industrie française et européenne de sauvegarder et renforcer l'indépendance stratégique de la filière superalliages, en atteignant une taille critique de volume et de rentabilité et en poursuivant les innovations de produit attendues pour répondre aux futurs enjeux.

Dans les années à venir, la consommation de superalliages mondiale devrait poursuivre le rythme de croissance des montées en cadence des principaux industriels concernés.

Le titane

Le titane est un matériau au cœur d'enjeux géostratégiques, fortement impacté par le Covid-19 et la crise russo-ukrainienne depuis 2022.

Le titane métal est un matériau stratégique pour les industries de l'énergie, de la défense, de l'aéronautique militaire, mais aussi civile avec le développement de l'utilisation des matériaux composites. La demande mondiale de titane métal est estimée à 200 kt/an, dont la moitié pour l'aéronautique civile. Les perspectives sont sur une augmentation de consommation multipliée par deux à un horizon 2045-2050 à la faveur des modernisations de flottes d'avions dans les compagnies aériennes et des besoins en nouveaux appareils afin de répondre à la demande croissante du trafic.

Majoritairement utilisé pour les pièces dites « nobles », le titane est particulièrement utilisé pour les pièces soumises à de fortes contraintes en stress, température, corrosion... Reconnu pour ses qualités mécaniques et sa légèreté, c'est tout naturellement que le titane s'est imposé comme le matériau de nombreuses pièces d'avions : moteurs, pylônes, rotors, pièces zones nacelle et APU, trains d'atterrissage, cadres fuselage, encadrement de portes, tuyauteries chaudes...

La chaîne de valeur du titane reste particulièrement complexe. Il y a plus de quinze ans, la filière aéronautique européenne a fait le constat d'une dépendance critique vis-à-vis d'acteurs non européens – notamment russes et américains – pour la fourniture de produits en titane nécessaires à la production de pièces de différenciation. Des groupes de travail sur

les métaux stratégiques avaient confirmé en 2019 une augmentation de ces risques dans un contexte de tensions géopolitiques ; l'impact du Covid-19 sur l'industrie aéronautique civile a failli mettre en péril la filière titane française à très court terme ; et la crise russo-ukrainienne a complexifié les chaînes logistiques mondiales (à savoir : avant 2022, une part significative estimée à environ 45 % de la consommation de l'UE en titane provenait de minerais ukrainiens raffinés en Russie).

Depuis, les industriels français ont engagé avec l'appui de donneurs d'ordre un projet ambitieux d'intégration amont dans la chaîne de valeur du titane, avec deux projets industriels phares : EcoTitanium, qui vise à élaborer par fusion de lingots sur un modèle de valorisation de chutes, et UKAD, qui vise à forger des lingots de titane ; tous les deux portés par l'entreprise française Aubert & Duval. Ces deux projets répondent au point de découplage nécessaire pour gagner en souveraineté. Ils devraient pouvoir répondre partiellement à la demande pour la filière française estimée autour de 10-15 kt/an, très majoritairement soutenue par les volumes dédiés pour les applications civiles. Ces volumes seront en croissance dans la mesure des montées en cadence des industriels concernés et dans l'attente d'orientation de ce que pourrait être un futur SMR (*Single Middle Range*).

Le recyclage, ou « mine secondaire », est une opportunité pour notre filière en raison des ratios « *buy-to-fly* » élevés. La filière aéronautique s'engage déjà fortement pour atteindre des taux de recyclage structurants pour le titane, afin de pérenniser cette ressource secondaire et abaisser notre dépendance à des pays tiers

Conclusions

L'approvisionnement en minerais et métaux représente un défi pour l'Europe et la France en particulier, qui sont pauvres en ressources ou qui refusent de les exploiter.

Le défi est géopolitique, compte tenu de la concentration des ressources dans un nombre limité de pays.

Le défi est économique, à cause de l'importance de ces ressources pour le déploiement des technologies de la transition énergétique mais aussi par notre capacité à être compétitifs sur le sol européen.

Le défi est industriel afin de pouvoir poursuivre les montées en cadence de la filière et éviter les disruptions de flux nécessaires à la résilience de la *supply chain*.

Le défi est sur l'innovation, afin de préparer les enjeux futurs et accompagner la transition énergétique.

Et pour finir, le défi est également environnemental pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, notamment en électrifiant les usages de l'énergie. Mais aussi, en innovant dans les technologies utilisant les ressources dites de « la mine secondaire » par le développement de technologies avancées et compétitives de recyclage des matériaux.

Les progrès technologiques sont rapides, tant sur l'offre que sur la demande de matériaux critiques, et

des "*game changers*" sont attendus (y compris pour la substitution de matériaux critiques par des matériaux classiques), qui doivent être préparés et exploités par l'industrie française pour contribuer à la résilience de notre économie.

Mais tous ces défis sont avant tout des opportunités pour réfléchir à demain, et pour repositionner, au travers de la grande qualité d'innovation, de recherche et de technologies de notre pays, notre industrie au centre du jeu, et regagner en souveraineté et résilience.

La demande en matériaux critiques dans l'industrie automobile

Par Rémi CORNUBERT

Fondateur de Strat Anticipation

L'électrification en cours dans l'automobile entraîne une nette augmentation de la demande en métaux critiques comme le lithium, le cobalt, le nickel, le cuivre, l'aluminium et les terres rares. Cette demande devrait être multipliée par 2 à 5 d'ici 2035, selon les métaux considérés. Les véhicules électriques nécessitent en effet bien plus de ces matériaux que les véhicules thermiques, en raison de leurs motorisations électrifiées, de leurs batteries et des besoins d'allègement.

Cette transition met en lumière la forte dépendance de l'Europe envers la Chine, qui contrôle une grande partie de la production et du raffinage de ces matériaux critiques. Pour sécuriser ses approvisionnements et réduire cette dépendance, l'Europe doit accélérer ses initiatives stratégiques : passer des accords à long terme avec des pays amis ou des acteurs miniers non chinois, investir dans des projets miniers et des capacités de raffinage européens, et enfin investir massivement dans le recyclage pour conserver le gisement initialement capté.

Introduction

Les matériaux sont essentiels pour l'industrie automobile. Au-delà de l'évidence qu'ils constituent la majorité des pièces, mis à part les nouvelles fonctionnalités réalisées par des logiciels, les nouveaux matériaux sont clés pour plusieurs raisons :

- ils permettent d'innover et d'apporter de nouvelles fonctionnalités (thermique...);
- ils réduisent le poids des composants avec une consommation en carburant moindre (plastiques, acier à très haute limite élastique, aluminium, composites...);
- ils aident à atteindre les cibles ambitieuses de décarbonation et de réduction des émissions du transport routier (filtres à particule, catalyseurs des pots d'échappement et d'AdBlue pour réduire les oxydes d'azote...);
- ils peuvent avoir une empreinte carbone moindre quand ils sont recyclés ou biosourcés, mais encore quand ils sont fabriqués avec des meilleurs procédés industriels (acier vert, aluminium primaire produit avec des énergies renouvelables).

L'industrie automobile a ainsi vu la multiplication des types de matériaux utilisés au fil du temps.

Le poids des véhicules est en augmentation constante depuis des décennies. Le poids moyen d'un véhicule en Europe est passé de 1 250 kg en 2000 à plus de 1 550 kg en 2023.

Cette évolution s'explique par plusieurs facteurs :

- l'augmentation de la taille (plus long, large et haut) des véhicules par segment (A, B, C, D, E...);

- le développement des silhouettes « MPV » et « SUV », dont la part de marché est de 50 % ;
- l'augmentation du nombre d'équipements proposés aux clients (connectivité, confort) ;
- la régulation sur les émissions, qui conduit à ajouter des systèmes de dépollution ou de nouvelles motorisations plus lourdes (hybrides, hybrides rechargeables et électriques) ;
- les normes de sécurité, qui rendent standards les équipements de sécurité passive et active.

Cette tendance est parfaitement illustrée par le fait que les véhicules premium et de luxe font plus de 2 tonnes...

La répartition des matériaux a aussi beaucoup évolué avec le temps : l'acier qui était largement dominant a vu sa part baisser alors que celle des matières plastiques et de l'aluminium ne cesse d'augmenter.

Ces répartitions en évolution permanente est communément appelée « la guerre des matériaux » dans l'industrie automobile. Cette distribution entre les différents matériaux va continuer à évoluer en Europe afin d'atteindre les objectifs de réduction d'empreinte carbone et de circularité.

Les métaux critiques & leurs enjeux

Le gros changement qui est apparu ces dernières années est l'importance des matériaux critiques dont le poids augmente avec les nouvelles générations de véhicules :

- le cuivre, déjà présent depuis longtemps dans les petits moteurs électriques et le câblage mais dont l'usage augmente fortement avec les moteurs qui servent à propulser les véhicules et les câbles haute tension ;

- les terres rares, qui servent à fabriquer les aimants permanents des petits moteurs électriques et des moteurs de traction ;
- le germanium et le gallium, qui sont des matériaux essentiels pour fabriquer l'électronique traditionnelle et l'électronique de puissance ;
- les métaux critiques, qui sont les principaux constituants des cellules de batteries de haute puissance : principalement nickel, cobalt, lithium, graphite et manganèse haute pureté, sans parler des éléments d'ajouts servant à fonctionnaliser ces matériaux (niobium par exemple) ;
- enfin, l'aluminium est désormais considéré comme critique en Europe.

Ces derniers matériaux sont devenus stratégiques, car ils sont au cœur de la guerre commerciale qui s'intensifie dans l'industrie automobile, et sont devenus des enjeux essentiels en termes de compétitivité et de souveraineté.

La raison principale est que l'Europe a préféré depuis les années 1980 laisser partir les industries d'extraction et de raffinage, qui sont polluantes et à forte intensité de main-d'œuvre, alors que la Chine a, dans le même temps, eu une politique industrielle volontariste et expansionniste développant ou visant à rapatrier sur son territoire les industries de raffinage, ce qui la place aujourd'hui en oligopole, si ce n'est monopole, sur une grande partie de la chaîne de valeur de l'industrie des batteries en particulier :

- lithium : 18 % de l'extraction minière (hors contrôle des mines non chinoises), 64 % du raffinage ;
- nickel : 3 % de l'extraction minière (hors contrôle des mines indonésiennes), 36 % du raffinage ;
- cobalt : 2 % de l'extraction minière (hors contrôle des mines en RDC), 75 % du raffinage ;
- graphite : 92 % de l'extraction minière pour le graphite naturel (hors contrôle des mines africaines), 98 % du raffinage.

Les pays occidentaux ont maintenant pris conscience de cette domination et essayent de s'en affranchir, mais à horizon 2030, la Chine conservera son contrôle

stratégique même si sa part dans leur raffinage va baisser de quelques points de pourcentage.

La Chine a une domination similaire sur les terres rares (cf. « Le rôle clé de la Chine dans les chaînes de valeur des minerais critiques », pp. 47-51). Ces dernières ne sont pas spécialement rares car abondamment disponibles dans la croûte terrestre, mais la Chine a pris le contrôle total de leur raffinage à plus de 90 % (61 % pour l'extraction), les Européens et les Américains les ayant délaissées pour des raisons environnementales et de coûts.

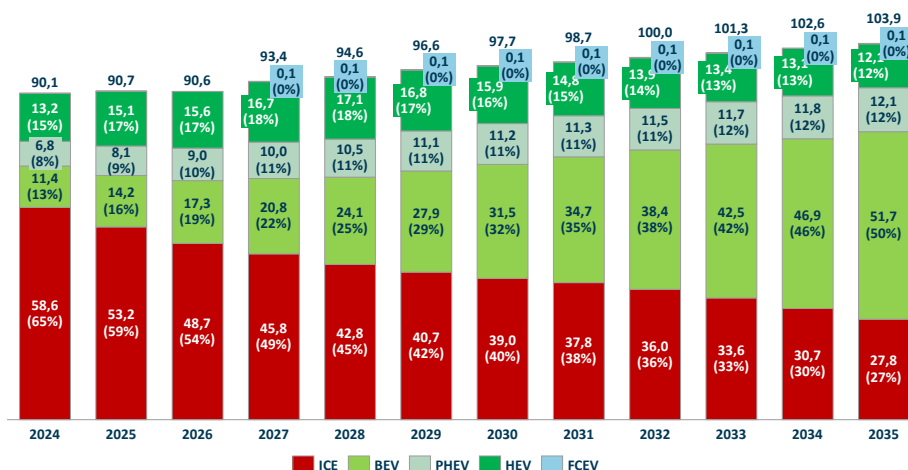
La Chine a clairement actionné son levier stratégique de contrôle de la chaîne de valeur en mettant en place des restrictions à l'export d'abord du germanium et du gallium, puis du graphite et enfin plus récemment des matériaux actifs de cathode pour les chimies de batteries LFP, où la dominance chinoise est à 98 % comme pour le graphite synthétique. La Chine produit également 77 % des matériaux actifs de cathode, et la dominance est totale pour la chimie LFP.

Pour les métaux plus traditionnels comme l'aluminium et l'acier, la pression est exercée par la surcapacité installée en Chine, qui inonde l'Europe de produits à prix cassés, tandis que leur fabrication est encore essentiellement alimentée par des centrales à charbon, induisant une empreinte carbone élevée.

Demande en métaux critiques pour l'automobile

La production mondiale de véhicules légers sera en faible croissance, de 1 % par an, et elle devrait passer dans le scénario de référence d'une production de 90 millions de véhicules légers à environ 104 millions en 2035. Le plus gros changement sur cette période est la place croissante prise par les motorisations électriques :

- essence et diesel : de 65 à 27 % ;
- hybrides : de 15 à 12 % ;
- hybrides rechargeables : de 8 à 12 % ;
- électriques : de 13 à 50 % ;
- autres : de 0 à 0,1 %.



After 2030, Volumes are deduced from 2028-2031 trends and align with regulation
 BEV = Electric Vehicle, PHEV = Plug-in Hybrid Vehicle, HEV = Hybrid Vehicle, FCEV = Fuel Cell Electric Vehicle
 Source: LMCA Q1 2025, Strat Anticipation analysis for 2031-2035

Figure 1 : Prévission de production mondiale de véhicules légers (Source : Global Data Q1-2025, Strat Anticipation Analysis).

Le poids moyen du cuivre contenu dans un véhicule léger est passé de 24 kg pour une motorisation traditionnelle à 29 kg pour un véhicule hybride, et 45 et 60 kg pour un véhicule hybride rechargeable et électrique respectivement. Le contenu en cuivre est ainsi près de 3 fois plus important dans cette dernière.

La demande en cuivre pour des applications automobiles devrait passer de 2,8 millions de tonnes en 2024 à 4,7 millions de tonnes en 2035, soit une croissance moyenne de 5 % par an, soit une demande qui augmente de 68 % sur la période.

Le poids moyen d'aluminium contenu dans un véhicule léger européen est d'environ 165 kg pour une motorisation traditionnelle, de 200 kg pour un véhicule hybride et de 275 et 300 kg pour un véhicule hybride rechargeable et électrique respectivement. Le contenu en aluminium est près de 2 fois plus important dans cette dernière qu'un véhicule thermique. Cette augmentation du contenu est tirée par le besoin d'alléger les véhicules électriques, qui sont plus lourds. Le poids en aluminium est similaire dans les véhicules chinois, et un peu plus élevé dans les véhicules américains, plus gros, avec une fourchette de 200 à 375 kg suivant les motorisations.

La demande mondiale en aluminium pour des applications automobiles devrait donc passer de 18,2 millions de tonnes en 2024 à 25,5 millions de tonnes en 2035, soit une croissance moyenne de 3 % par an, soit une demande qui devrait augmenter de 41 % sur la période.

Le contenu en terres rares dans un véhicule dépend beaucoup de sa motorisation, car les moteurs électriques de traction ont pour la plupart des gros aimants permanents :

- moteurs à combustion : 0,2 kg ;
- hybrides : 0,45 kg ;
- hybrides rechargeables : 0,5 kg ;
- électriques : 0,8 kg.

Les montants paraissent faibles par rapport au cuivre, mais il y a 4 fois plus de terres rares dans un véhicule électrique que dans un véhicule à moteur à combustion, ce qui représente un enjeu majeur d'approvisionnement et de souveraineté. Un véhicule thermique en contient 0,2 kg, un hybride 0,45 kg, un hybride rechargeable 0,5 kg et un véhicule électrique 0,8 kg.

La demande en terres rares pour des applications automobiles devrait passer de 27 000 tonnes en 2024 à 52 000 tonnes en 2035, soit une croissance moyenne de 6 % par an.

La demande en batteries de puissance pour la production de véhicules légers électrifiés (HEV, PHEV, BEV) devrait passer de 897 GWh en 2024 à plus de 3,9 TWh en 2035, soit une croissance de 14 % par an ; cette estimation a cependant diminué récemment étant donné les révisions à la baisse de la pénétration des véhicules électriques en Europe et en Amérique du Nord.

En 2024, la puissance moyenne d'un pack de batteries de véhicule électrique de 66 kW est 3 fois plus importante que celle d'un hybride rechargeable d'environ 22 kW. Celle des hybrides simples est très faible (quelques kW). La puissance moyenne va augmenter de 10 % à 72 kW en 2030. La taille de la batterie est 4 à 5 fois plus puissante pour les segments haut de gamme et les grandes voitures que pour les petits véhicules urbains, la fourchette va de 23 à 124 kW... le contenu en métaux critiques a un spectre très large, qui va de 1,2 kg pour un véhicule hybride, 21,7 kg pour un hybride rechargeable et enfin 62 kg pour un pur électrique.

Les contenus en lithium, nickel, cobalt et manganèse dépendent beaucoup de la chimie utilisée. Leur somme varie de 65 g à plus de 700 g par kWh, suivant la composition des matériaux actifs.

La demande en métaux critiques pour les batteries de haute puissance dans l'automobile devrait passer de 1,6 million de tonnes en 2023 à 7,2 millions de tonnes en 2035, soit une croissance moyenne de 13 % par an. En une décennie, elle devrait ainsi être multipliée par 4,5 !

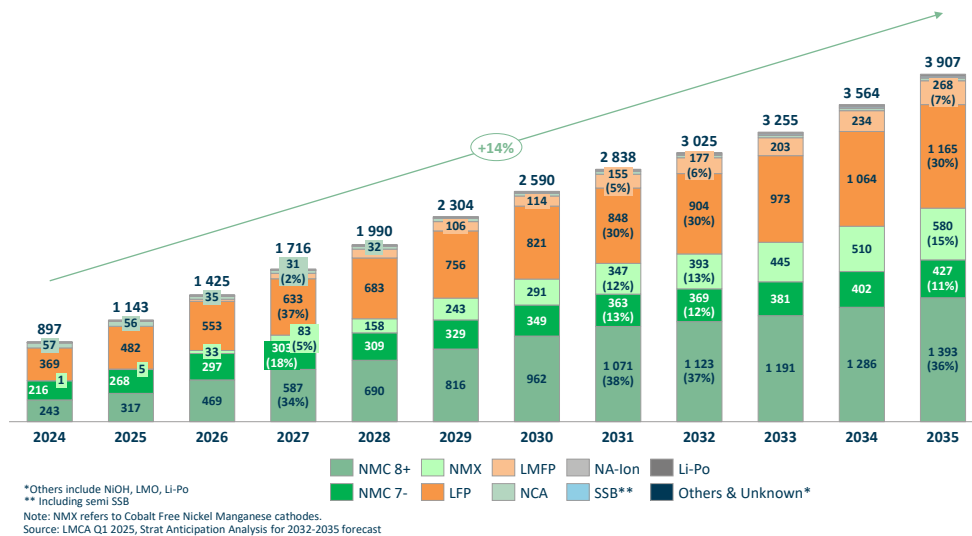


Figure 2 : Prévisions de la demande en batteries par électrochimie pour la production de véhicules légers (Source : Global Data Q1-2025, Strat Anticipation Analysis).

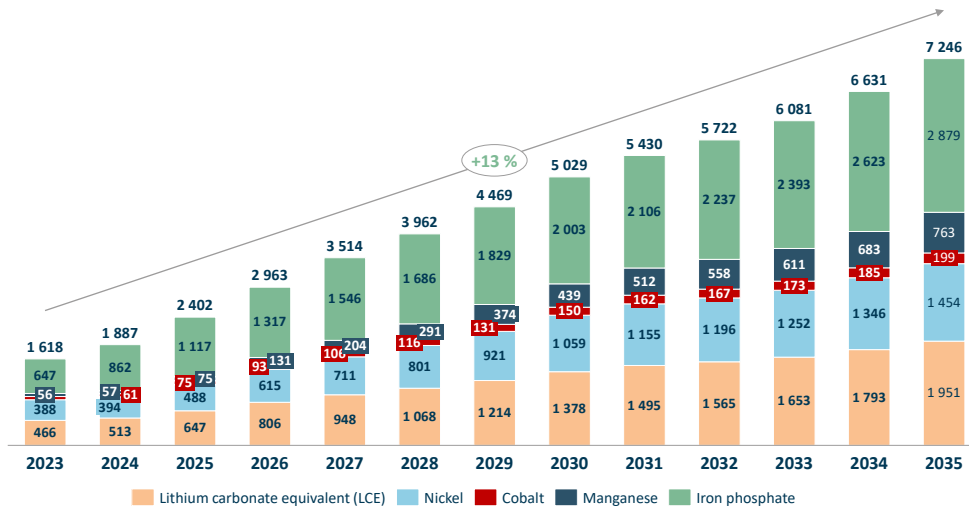


Figure 3 : Prévisions de la demande en métaux critiques pour la production de véhicules légers (Source : Global Data Q1-2025, Strat Anticipation Analysis).

Conclusion

L'Europe reste vulnérable dans son approvisionnement en matériaux critiques pour réussir sa transition énergétique. La demande devrait être multipliée par 2,5 à 4,5 fois sur la prochaine décennie, suivant les matériaux.

La Chine va conserver un contrôle très important de la chaîne de valeur de ces matériaux, et les États-Unis ont décidé depuis l'administration Biden d'investir massivement dans l'extraction minière, afin de s'affranchir de cette dépendance chinoise.

L'Europe doit passer des accords à long terme avec des pays affinitaires ou des grandes compagnies minières non chinoises ou non contrôlées par des capitaux de l'Empire du Milieu, afin de sécuriser son approvisionnement en matériaux critiques pour le Pacte vert.

Elle doit investir dans l'amont de la chaîne de valeur, et, à chaque étape, soutenir l'installation de capacités très importantes de raffinage de ces métaux sur le territoire européen, en particulier pour le lithium, mais aussi de la fabrication de précurseurs et de matériaux actifs d'électrode.

Sur le graphite, il est essentiel de soutenir, d'une part, les projets miniers de graphite naturel en Finlande, et, d'autre part, d'investir dans les entreprises européennes qui ont développé des procédés innovants de production de graphite synthétique moins énergivores que le procédé utilisé en Chine (Acheson).

La Commission européenne a lancé des initiatives majeures depuis quelques années autour de ce thème (cf. "The current state of the European Union's dependency and its policies", pp. 42-46) et a récemment sélectionné 47 projets stratégiques en 2025, dont plusieurs concernent directement l'industrie automobile.

L'Europe est aussi clairement *leader* dans l'économie circulaire, car elle considère que c'est un levier très

important afin de réduire sa dépendance et permettre d'assurer une partie de sa souveraineté.

Pour les batteries, elle a fixé dans le paquet de régulation les concernant des cibles très claires et ambitieuses pour réutiliser des métaux recyclés dans les nouvelles cellules à partir de 2031.

Ce sont des clairement de bonnes initiatives, mais l'Europe doit accélérer mais aussi s'assurer que les financements disponibles seront bien du bon ordre de grandeur et disponibles en temps utile ; notre souveraineté et notre compétitivité en dépendent.

Il faut éviter que des situations comme celle de NorthVolt ne se reproduisent...

Nos grands partenaires commerciaux ne nous attendent pas, et investissent massivement dans les métaux critiques, de l'amont à l'aval !

Introduction à la notion de chaînes de valeur minérales et au marché des commodités

Par Philippe CHALMIN

Professeur émérite, Université Paris Dauphine – PSL, Fondateur et président de CyclOpe

Et Yves JÉGOUREL

Professeur titulaire de chaire, Directeur du département Économie, Finance, Assurance Banque (Efab) du Conservatoire national des arts et métiers (Cnam)

Une matière première répond à une définition complexe où les critères économiques d'homogénéité du produit, de variabilité des prix et de commercialisation sur de vastes marchés d'exportation prévalent. De la même façon, une filière de matières premières assume trois fonctions principales, souvent sous-estimées : l'adaptation du produit tel qu'il apparaît en amont de la filière aux besoins industriels exprimés par l'aval, la valorisation du produit ainsi transformé aux différentes étapes de la chaîne de valeur, ainsi que la répartition et la dilution des risques, et notamment le risque de prix, qu'implique le transfert de ce produit. Cette dernière fonction explique pourquoi les marchés de nombreux métaux sont financiarisés, *i.e.*, accordent un rôle central aux places boursières dans la fixation des prix et la gestion du risque de prix.

Face à la domination de la Chine sur la quasi-totalité des ressources minérales dites « critiques », *i.e.* celles indispensables pour satisfaire les besoins grandissants de la transition énergétique et de la révolution numérique, la question de la sécurisation de leur approvisionnement s'est affirmée avec force dans l'agenda des pays industrialisés. « Cuivre », « lithium », « nickel », « terres rares » : les ressources minérales sont toutefois bien souvent appréhendées dans une dénomination unique qui, bien que pratique, tend à masquer l'hétérogénéité des problématiques de disponibilités qui sont les leurs. Pour le comprendre, il importe donc de revenir, dans un premier temps, sur la notion même de matières premières, minérales ou non, et, dans un second temps, sur celle de chaînes de valeur en précisant les différentes fonctions qui sont les leurs : transformation technico-commerciale, valorisation des produits, et dilution des risques.

Matières premières : une définition complexe

Il n'existe pas de définition unanimement partagée de ce qu'est une matière première. On peut néanmoins se référer utilement à celle donnée aux « produits de base » dans la charte de la Havane de 1948¹, préfiguratrice d'une Organisation internationale du commerce qui ne vit pourtant jamais le jour. Il est ainsi écrit dans l'article 56 (section A du chapitre VI) que cette notion « s'entend de

tout produit de l'agriculture, des forêts ou des pêches, et de tout minéral, que ce produit soit sous sa forme naturelle ou qu'il ait subi la transformation qu'exige communément la vente en quantités importantes sur le marché international ». Si cette définition apparaît particulièrement large, elle met en exergue deux caractéristiques importantes des matières premières : leur transformation éventuelle et la prééminence des marchés d'exportation sur lesquels elles sont négociées. Ceci appelle toutefois plusieurs commentaires.

En pratique, on observe, en premier lieu, que les matières premières, agricoles ou minérales, subissent toujours des opérations de transformation pour des raisons de conservation et / ou de rentabilité, et que celles-ci peuvent être de nature variable : minimale pour les minerais exportés sous forme de concentrés, substantielle lorsqu'il s'agit de métaux, par exemple. Les notions de « matières premières » et de « produits industriels » ne sont en conséquence pas mutuellement exclusives. À titre d'exemple, l'aluminium primaire (comme l'ensemble des autres métaux de base – cuivre, étain, nickel, plomb, zinc) est considéré comme une matière première alors qu'il est issu de procédés physiques et chimiques, et donc industriels, multiples. En revanche, certaines opérations de transformation / valorisation peuvent être telles que le produit considéré cesse d'être une matière première *stricto sensu*. Ainsi, la potasse, l'urée, la roche phosphatée ou le phosphate diammonique comptent parmi les produits de base, tandis que les engrais dits « ternaires » (associant dans des quantités variables les trois nutriments)

¹https://www.wto.org/french/docs_f/legal_f/havana_f.pdf

sont, à l'inverse, des produits complexes, différenciés, pouvant être produits, grâce à des usines de *blending*, pour répondre à des demandes spécifiques relatives à la nature des sols à fertiliser ou des produits agricoles cultivés.

Il est utile de souligner, en deuxième lieu, que la notion de matières premières ne peut être appréhendée qu'à l'aune de critères physiques. Elle revêt en effet une dimension « économique » au travers de l'existence de ces marchés internationaux sur lesquels elles sont échangées. On note, en dernier lieu, l'ambiguïté forte du vocable « en grandes quantités », et *de facto* la grande hétérogénéité des volumes de production et d'exportation desdites matières premières. Au sein même des métaux de base coexistent ainsi l'étain dont l'offre minière mondiale est proche de 300 000 tonnes, tandis que celles de bauxite et de cuivre avoisinent respectivement 450 millions de tonnes (Mt) et 23 millions de tonnes en 2024 (USGS, 2025² ; CycloPe, 2025). La prise des « petits métaux »³ met, elle, en lumière des volumes bien plus faibles, de l'ordre de 63 tonnes (en métal contenu) pour le rhénium, de 360 tonnes pour le béryllium, ou de 760 tonnes pour le gallium.

À l'instar des matières premières auxquelles ils se rattachent, les minerais et métaux constituent, en conséquence, un ensemble singulièrement hétéroclite. Le recours à une terminologie commune s'explique donc aussi par le partage d'autres propriétés de nature économique. Elles sont au nombre de trois : homogénéité du produit, forte volatilité des cours et propension à la financiarisation. Les matières premières sont en effet des biens homogènes dans le sens où leur qualité intrinsèque (teneur en métal, degré de valorisation des coproduits ou sous-produits, nécessité de retraitement, localisation, etc.) ne constitue une variable suffisamment importante pour autoriser des stratégies de différenciation par la qualité. En d'autres termes, la qualité d'une matière première donnée ne s'exprime qu'au travers d'un différentiel par rapport à un prix de référence. Ce différentiel participe aux ajustements du marché, mais sa variabilité est, par définition, plus faible que celle du prix de référence auquel il se rattache. Si l'on prend l'exemple du minerai de fer, plusieurs standards de qualité coexistent ainsi (52 % de teneur, 58 %, 62 %, 65 %), mais leurs prix demeurent le plus souvent fortement corrélés.

La forte volatilité des cours constitue la deuxième caractéristique propre des matières premières. Conséquence d'une instabilité quasi permanente de l'offre et de la demande, celle-ci a des origines multiples. Les flux d'exportation de produits de base répondent, en premier lieu, à une diversité de variables tant économiques que géopolitiques : niveaux de production et des stocks, contraintes logistiques éventuelles, ampleur des barrières tarifaires et non tarifaires, cours de change, etc.

En toute logique, ils dépendent également de l'intensité de la demande d'importation, elle-même tributaire de nombreux facteurs, au premier rang desquels la croissance économique du pays qui l'exprime. Qu'elles répondent à des stratégies de couverture des risques (*hedging*) ou de spéculation, les anticipations sont, par ailleurs, déterminantes dans la trajectoire que suivent les cours des matières premières. Celles-ci étant, par essence, plus instables que les variables dites « fondamentales » évoquées précédemment, elles contribuent aussi substantiellement à ce phénomène de volatilité.

La notion de « commodité » est, pour certains praticiens, indifférente de celle de matières premières dès lors que le premier critère susmentionné est vérifié. Pour d'autres, c'est la propension à la financiarisation qui les distingue. Dans une telle approche, les matières premières voient leur prix se former sur des bourses telles que London Metal Exchange (LME) – la référence mondiale sur le marché des métaux de base –, le Chicago Mercantile Exchange (CME) ou, de manière non exhaustive, le Shanghai Futures Exchange (SHFE). Cette financiarisation n'est pas propre à tous les métaux, certains voyant leur prix se former par une confrontation directe entre producteur et utilisateurs. Lorsqu'elle existe, elle a toutefois des conséquences majeures sur les mécanismes de formation des prix, sur la dynamique de ces derniers et, partant, sur la stratégie de gestion des risques des entreprises productrices et utilisatrices, comme sur leurs stratégies d'investissement. Comprendre pourquoi certains marchés de produits de base se sont financiarisés est donc essentiel, ce qui implique d'explicitier les différentes fonctions assumées par une filière de matières premières, minérales ou non.

Les fonctions des filières ou « chaînes de valeur » des matières premières

Les filières de matières premières ont trois fonctions principales (Marquet, 1993). La première est la plus évidente : adapter le produit tel qu'il apparaît en amont de la filière (le minerai donc, dans le cas des ressources minérales) aux besoins exprimés par l'aval. De toute évidence, un minerai n'est pas un produit utile « directement » pour répondre à la diversité des demandes industrielles avec, pour conséquence, de multiples opérations industrielles allant de la purification ou adaptation de la composition du métal ou des alliages jusqu'à la réalisation de produits complexes, tels que les pré-curseurs de batterie. Sa transformation est donc nécessaire, ce qui implique, si l'on souhaite comprendre la filière dont il dépend, de connaître toutes ses étapes de valorisation et, partant, les entités économiques qui en ont la responsabilité. Ceci signifie que toute matière première va subir un double processus : d'homogénéisation / standardisation, tout d'abord, pour éliminer les différences qualitatives pouvant exister aux premiers stades de production ; puis de diversification afin de répondre à l'ensemble des besoins industriels exprimés par l'aval de la filière. Dans le cas du nickel par exemple, la nature du minerai va déterminer ses modalités de traitement minéralurgique et métallurgique,

²United States Geological Survey: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-copper.pdf>

³Voir le chapitre éponyme et celui des « métaux électriques » du rapport Cyclope, ainsi que le site Mineralinfo, le portail français des ressources minérales non énergétiques : <https://www.mineralinfo.fr/fr>

ainsi que ses débouchés principaux ou stratégiques : l'acier inoxydable, d'une part, les batteries lithium-ion de type NCA⁴ ou NMC, d'autre part. Dans l'analyse de cette fonction technico-commerciale, il est également important de rappeler qu'un grand nombre de filières de matières premières ne permettent pas la « rencontre » directe entre mineurs / raffineurs / utilisateurs et que l'intermédiation des maisons de négoce, dont le rôle est précisément de réconcilier dans le temps et dans l'espace les besoins de ces différents opérateurs industriels, est souvent nécessaire.

La deuxième fonction d'une filière est d'assurer la valorisation du produit aux différents stades de son transfert. Si la réalité industrielle de cette transformation est évidente, elle n'en reste pas moins assumée par des entités économiques dont l'exigence de rentabilité à court terme est souvent présente. Les impulsions de l'offre et de la demande vont ainsi influencer le niveau des prix du produit, ainsi que certaines conditions tarifaires spécifiques, notamment les charges de traitement et de raffinage (TC/RC⁵), qui participent également aux ajustements du marché. Se définissant comme les sommes dues par les mineurs aux raffineurs et étant *de facto* représentatives du pouvoir de négociation de ces derniers, les TC/RC se sont, à titre d'exemple, largement effondrées en 2025 sur le marché du cuivre en raison des tensions existantes sur l'offre de minerai. Il convient toutefois de préciser que ces différents prix ne résultent pas uniquement de la confrontation d'une demande et d'une offre « immédiate », l'existence de prix à terme, *i.e.*, fixé en t_0 pour un achat / livraison en $t+n$, étant une des caractéristiques importantes de nombreux marchés de commodités. Une multiplicité de pratiques contractuelles co-existent ainsi, des opérations dites « au comptant » (ou *spot*) aux contrats de long terme, *infra* ou pluriannuels, à prix fixe, indexé, ou « en prix à fixer ».

En lien avec ce dernier point, la dernière fonction d'une filière de matières premières est probablement la plus méconnue : assurer le partage et la dilution des risques entre les différents acteurs économiques qui la composent. Lorsqu'il existe une tension forte sur la ressource couplée à une structure de marché oligopolistique, les filières tendent à fonctionner sous le régime dit « des prix producteurs », et donc à se cartelliser (Jégourel, 2015). Les ajustements s'opèrent alors par les quantités, notamment par une variation de l'offre assumée par les entreprises dominantes. Dans le cas contraire, ce sont les prix qui créent les conditions de l'équilibre du marché par une variation, à court terme, des niveaux de production, de la demande ou du niveau des stocks ou, à plus long terme, par l'adaptation des capacités de production. Ce mode de « régulation » du marché induit nécessairement une variabilité importante des prix, elle-même reflet de l'instabilité de l'offre et de la demande. Elle nourrit alors un risque de prix pour l'ensemble des agents économiques de la filière qui peut parfois excéder leur capacité financière à l'assumer. Il devra donc être soit réduit en étant

partiellement porté par un acteur étatique (instauration d'un prix minimum pour les producteurs, subventions, etc.), soit géré grâce à l'utilisation de produits dérivés financiers (options, *swaps*, contrats à terme) échangés sur les places boursières susmentionnées. De ce point de vue, le phénomène de financiarisation ne peut être assimilé *stricto sensu* à celui de spéculation : devant vérifier de nombreux critères techniques, la cotation en bourse des matières premières (à l'instar des tentatives récentes sur l'hydroxyde de lithium) répond en effet à un double besoin de transparence sur les prix et d'externalisation du risque de prix. Elle induit, en revanche, nécessairement, le développement d'activités spéculatives, dont l'influence sur le niveau des cours peut être majeure. Cette influence n'est toutefois pas la seule conséquence de la spéculation, certains marchés fonctionnant de manière oligopolistique, voire monopolistique, et parfois opaque. La capacité d'influence, voire de détermination des prix peut alors être utilisée par l'acteur dominant pour limiter l'émergence de concurrents étrangers, à l'instar de la stratégie d'exportation massive menée par la Chine sur certains métaux.

Bibliographie

CHALMIN P. & JEGOUREL Y. (dir.) (2025), *Le piétinement sourd des légions en marche*, XXXIX^e rapport CycloPé, Paris, Economica.

CHRISTMANN P. & JEGOUREL Y. (2020), « De la structuration des chaînes de valeur aux mécanismes de formation des prix : une analyse englobante des marchés des métaux de base », *Annales des Mines - Responsabilité & Environnement*, 99(3), pp. 6-18, septembre, <https://doi.org/10.3917/re1.099.0006>

JEGOUREL Y. (2015), « Marchés libres vs systèmes de prix producteurs : pourquoi les marchés de matières premières se financiarisent-ils ? », *Policy Brief*, n°15/18.

MARQUET Y. (1993), *Négoce international de matières premières*, Paris, Eyrolles.

⁴ Nickel, Cobalt, Aluminium & Nickel Manganèse Cobalt.

⁵ *Treatment Charges/Refining Charges*.

Le cuivre : chaîne de valeur d'un métal hautement stratégique

Par Mathieu LEGUÉRINEL

Géologue et analyste des marchés des métaux du Bureau de Recherches géologiques et minières (BRGM)

Et Johann TUDURI

Directeur de Programme Ressources minérales & Économie circulaire du BRGM

Le cuivre figure parmi les matières premières les plus stratégiques de l'économie mondiale, en raison de son importance cruciale pour des secteurs clés tels que l'électronique, l'automobile, la construction et surtout l'énergie. Sa demande est particulièrement forte dans le domaine des énergies renouvelables (panneaux solaires, éoliennes), dans le développement des réseaux électriques intelligents, ainsi que dans la fabrication de véhicules électriques, qui nécessitent jusqu'à trois fois plus de cuivre que les modèles à moteur thermique. Ce rôle fondamental fait du cuivre une ressource critique pour accompagner les transitions énergétique et numérique à l'échelle mondiale. Le marché du cuivre est fortement conditionné par des dynamiques économiques, géopolitiques et technologiques. La production mondiale est concentrée entre quelques grands acteurs, principalement le Chili – qui en assure environ un quart, et qui détient un peu moins d'un tiers des réserves mondiales –, le Pérou, la Chine et les États-Unis.

Le cuivre fait partie des premiers métaux utilisés par l'Homme. Des bijoux en cuivre natif datant de près de 9 000 ans ont été découverts, et des traces d'exploitation minière dans les Balkans remontent à 4 000 ans av. J.-C. Dès 3 000 av. J.-C., les civilisations savaient extraire et travailler ce métal, ouvrant la voie à l'ère des métaux et à la fabrication d'alliages comme le bronze. Ce métal a ainsi jeté les bases de la métallurgie et accompagné les grandes étapes du développement de l'humanité. Aujourd'hui, le cuivre est le matériau le plus essentiel, après le fer et le béton, pour le développement des pays à faibles et moyens revenus. C'est un matériau stratégique, utilisé à 75 % dans les secteurs électrique et électronique, grâce à ses excellentes propriétés de conduction. Mais cette ressource, aussi ancienne que précieuse, est au centre d'une inquiétude croissante dans la communauté des ressources minérales : sera-t-elle disponible en quantité suffisante pour soutenir la transition énergétique mondiale ? Alors que la demande explose, notamment dans les pays en développement, et que les besoins liés aux énergies renouvelables et aux véhicules électriques s'intensifient, les capacités d'extraction peinent à suivre. Contrairement à d'autres métaux plus récents comme le lithium, le cuivre a déjà été largement exploité, rendant toute augmentation de production beaucoup plus complexe. Comprendre la chaîne de valeur du cuivre devient dès lors essentiel pour anticiper les tensions à venir, et orienter les choix industriels et politiques.

Une demande mondiale en hausse

La consommation apparente mondiale en cuivre raffiné a progressé de 2,8 % en 2024, franchissant pour la première fois les 27 Mt (27,35 Mt selon l'ICSG (2025)¹). Cette hausse s'inscrit dans une tendance continue amorcée en 2021 (+ 1,2 %, + 2,4 %, + 2,9 % en 2021, 2022 et 2023). Elle est tirée par la Chine (demande apparente : + 3,4 %, réelle estimée : + 3,8 %) et, plus largement, par l'essor industriel de l'Asie du Sud-Est, notamment l'Inde (+ 8,6 %) avec l'installation de nouvelles lignes de production de fils de cuivre. En revanche, la demande européenne (UE + Royaume-Uni) recule de 1 %, pénalisée par la faiblesse des secteurs de l'automobile et de la construction.

La demande mondiale en cuivre a fortement augmenté ces dernières décennies, et les projections indiquent une poursuite de cette croissance exponentielle. L'OFREMI² (2023) estime qu'elle pourrait atteindre 41 Mt en 2035, voire doubler d'ici 2050 sous les effets de trois dynamiques majeures :

- la croissance démographique et l'élévation des niveaux de vie, en particulier dans les pays émergents ;
- l'essor toujours plus soutenu des technologies (internet mobile, objets connectés, automatisation, robotique...);

¹International Copper Study Group.

²Observatoire Français des REssources Minérales pour les filières Industrielles.

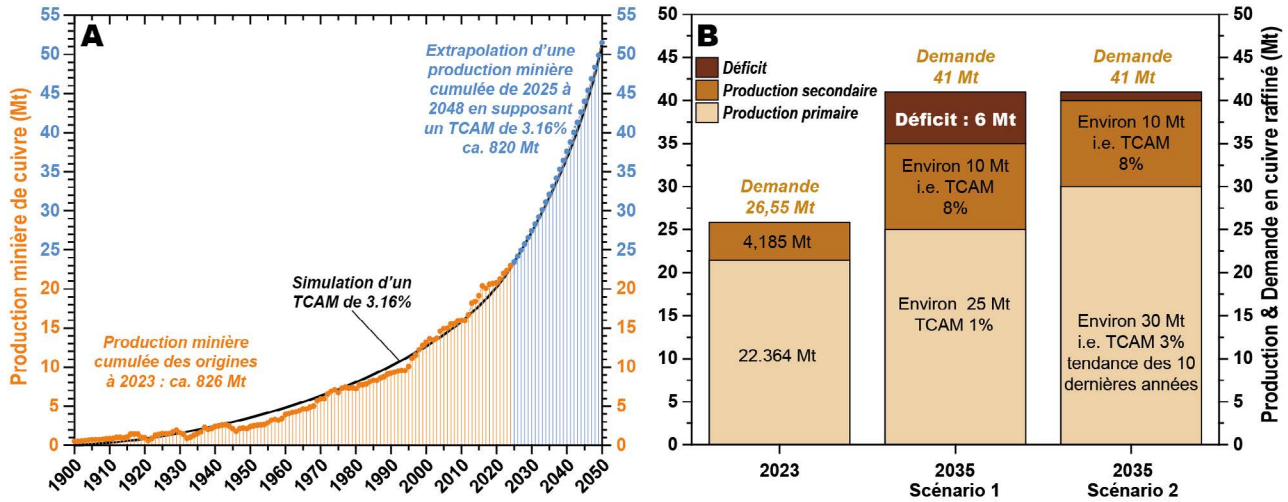


Figure 1 : a) Évolution historique de la production minière annuelle de cuivre en millions de tonnes de 1900 à 2024 (données ICSG), et scénario jusqu'en 2050 dans l'hypothèse d'une poursuite de la tendance depuis un peu plus d'un siècle, marquée par un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 3,16 % ; b) Projection de la demande mondiale en cuivre raffiné à l'horizon 2035 (41 Mt), comparée à celle de 2023 (26,55 Mt). Deux scénarios prospectifs sont présentés. Dans le scénario 1, un ralentissement hypothétique du TCAM de la production primaire de cuivre raffiné à environ 1 % est compensé par une augmentation soutenue de la production secondaire (cuivre recyclé) estimée à 8 % par an. Dans le scénario 2, l'hypothèse d'une croissance continue de la production primaire à un rythme de 3 % par an est également accompagnée d'une hausse de la production secondaire de 8 % par an. Dans les deux cas, un déficit de production est anticipé pour répondre à la demande projetée de 41 Mt : 6 Mt dans le scénario 1 et 1 Mt dans le scénario 2 (Source : OFREMI, 2023).

- les transitions énergétique et numérique (énergies renouvelables, véhicules électriques, stockage de l'énergie...).

Mais cette hausse pourrait dépasser les capacités de production et d'approvisionnement, et conduire à un déficit mondial estimé à 6 Mt à l'horizon de 2035, en l'absence de mesure complémentaire à la production primaire (voir la Figure 1). En effet, plusieurs risques pèsent sur les approvisionnements primaires :

- la raréfaction des gisements à haute teneur et / ou accessibles, qui rend l'extraction plus coûteuse et complexe (gisements de plus en plus profonds ou situés dans des zones moins développées) ;
- des contraintes environnementales et sociales croissantes exigeant des pratiques minières plus responsables (réduction de l'empreinte écologique, meilleure gestion des déchets miniers, respect des droits des populations locales...) ;
- un recours au recyclage insuffisant, qui représente déjà 30 % de l'approvisionnement mondial, et devra continuer à progresser pour limiter la pression sur les ressources naturelles et l'industrie extractive.

La production de cuivre s'inscrit dans une chaîne de valeur complexe

Production minière de cuivre

Pour répondre aux défis d'approvisionnement, la découverte de nouveaux gisements est devenue cruciale, entraînant une forte hausse des investissements dans l'industrie minière. Face à l'épuisement des réserves facilement accessibles, les compagnies minières et les gouvernements intensifient leurs efforts pour développer des projets dans des zones plus complexes.

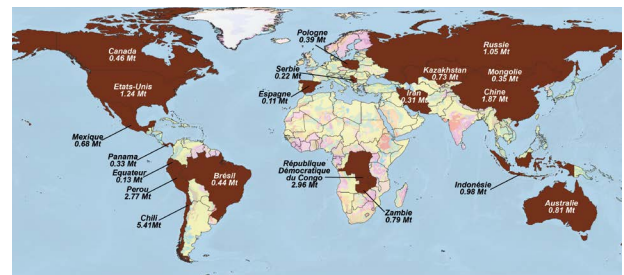


Figure 2 : Les vingt principaux pays producteurs de cuivre en 2024. Avec près de 23 Mt produites en 2024, le cuivre est la troisième substance métallique exploitée dans le monde, après le fer et l'aluminium (Source : S&P Global, 2025).

Entre 2004 et 2024, la production minière est ainsi passée de 14,6 à près de 23 Mt de cuivre (BRGM, 2025), modifiant la géographie des acteurs. Si le Chili reste dominant, de nouveaux acteurs comme le Pérou, la République démocratique du Congo (RDC), le Mexique, et bien entendu la Chine, ont gagné en importance, au détriment de l'Indonésie, de la Pologne ou, dans une moindre mesure, des États-Unis (voir la Figure 2).

Après une progression de 3,2 % en 2022 et 2,1 % en 2023, la production minière mondiale a enregistré une croissance de 2,7 % en 2024. Cette dynamique s'explique par l'augmentation des volumes extraits au Chili, en RDC, en Russie et en Indonésie. À l'inverse, la production de concentrés miniers a reculé au Panama, aux États-Unis et au Pérou. Sur la période 2019-2024, la RDC s'est distinguée par une croissance de sa production particulièrement soutenue et une augmentation de 1,7 Mt, devançant l'Indonésie (+ 700 kt) tandis que le Chili est en recul d'environ 250 kt. Selon les prévisions de l'ICSG, la production minière mondiale devrait poursuivre sa progression en 2025, avec une hausse estimée à 2,3 %, pour atteindre un total de 23,5 Mt.

Les prix élevés et soutenus du cuivre depuis 2021 (>> 8 000 \$/t) et son rôle sans cesse croissant pour les

transitions énergétique et numérique devraient susciter un regain d'intérêt pour accélérer le développement de projets mis en sommeil, ou en recherche de nouveaux. Cependant, le climat géopolitique et économique actuel instable pourrait limiter les investissements des sociétés minières, en particulier avec la situation sur les tarifs douaniers imposés par les États-Unis et la Chine. Les principaux projets qui font actuellement l'objet de travaux d'exploration ou d'études de faisabilité pourraient ajouter environ 10 Mt/an après 2026, avec, parmi les projets majeurs, la reprise de la mine historique de Resolution (500 kt) en Arizona (États-Unis), qui est dans la liste des projets bénéficiant d'une accélération des procédures d'octroi de permis par le gouvernement américain, ou Tampakan (375 kt) aux Philippines porté par Sagittarius Mines (contrôlée par Glencore). Si certains de ces projets ont un potentiel immense, il n'y aura que peu de mise en production de projets importants en 2026, 2027 et 2028. L'augmentation de la production de cuivre mondiale passera surtout par le changement d'échelle de projets plus modestes ou l'entrée dans une nouvelle phase de production de mines plus conséquentes.

Sur le long terme, la production minière mondiale de cuivre a affiché une croissance relativement stable, avec un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 3,16 % depuis 1900 (voir la Figure 1a). Ce chiffre, qui peut paraître modeste à première vue, révèle en réalité une dynamique préoccupante. En effet, plus de cuivre a été

extrait entre 1999 et 2022 qu'au cours de toute la période allant de l'Antiquité à 1998, soit environ 400 millions de tonnes. Si cette tendance se maintient, la production cumulée entre 2025 et 2048 devrait atteindre près de 820 millions de tonnes, un volume équivalent à tout ce qui a été extrait depuis les débuts de la métallurgie. La stabilité historique de ce taux de croissance laisse entrevoir d'immenses défis à venir pour le secteur du cuivre, tant en matière de ressources que de durabilité. Par ailleurs, si la hausse des prix des métaux peut stimuler les efforts d'exploration et la découverte de nouveaux gisements, le développement de nouvelles mines reste un processus long : comme le rappelle l'AIE (2021), il faut en moyenne à l'échelle mondiale environ 17 ans pour passer de la découverte à la mise en production d'un gisement de cuivre, sachant que ces délais sont allongés dans les pays occidentaux. La production de cuivre d'ici 2040 est ainsi peu ou prou déterminée par les investissements et les travaux d'exploration qui ont été menés dans la dernière décennie, ce qui laisse craindre un déficit probable de production.

Production métallurgique de cuivre

Les minerais du cuivre se répartissent en deux grandes catégories, selon les conditions géologiques de formation des gisements exploités : les minerais sulfurés et les minerais oxydés. Chacun de ces types requiert des procédés de traitement spécifiques afin d'en extraire

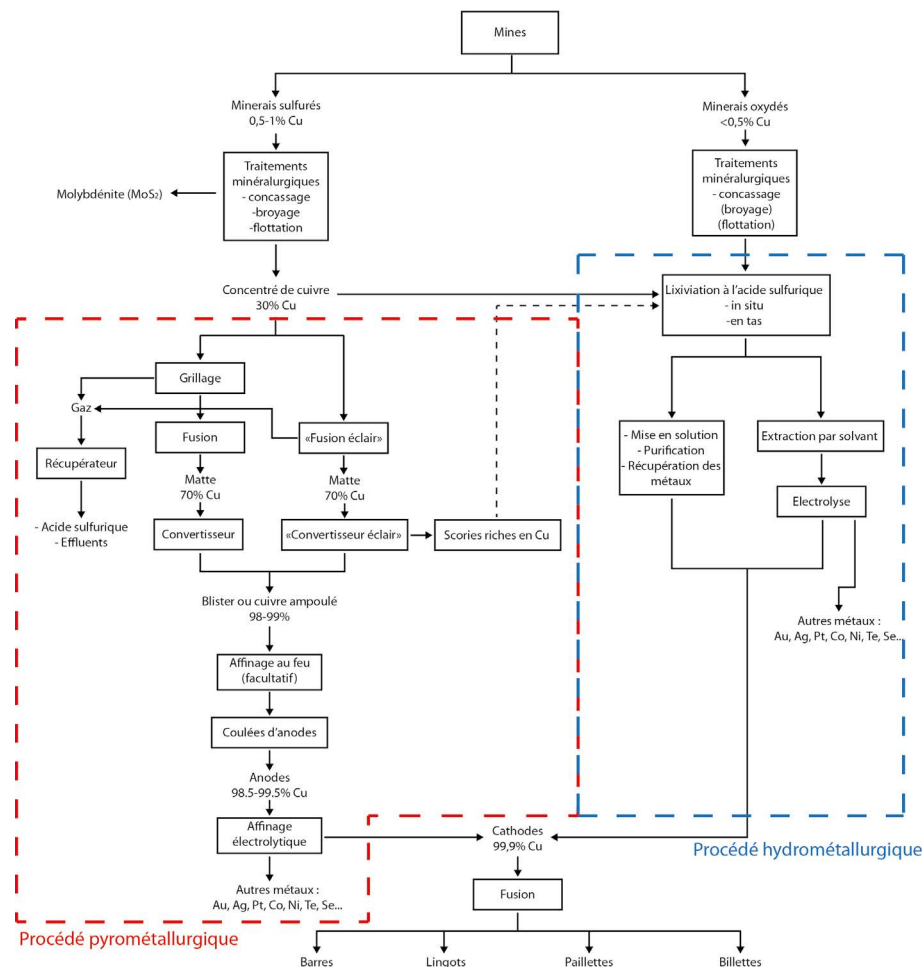


Figure 3 : Schéma simplifié des procédés de production de cuivre, de la mine aux produits finis et semi-finis pour les filières des minerais sulfurés et oxydés (Source : BRGM, 2019).

efficacement le métal, en raison de leurs propriétés physico-chimiques distinctes (Schlesinger *et al.*, 2011) (voir la Figure 3, page 35).

Les minerais sulfurés, dont la teneur en cuivre varie généralement entre 0,5 et 1 %, sont d'abord soumis à des opérations de traitement minéralurgique sur le site d'extraction, incluant le concassage, le broyage et la flottation. Ces étapes permettent d'obtenir un concentré de cuivre à environ 30 %. Ce concentré est ensuite traité par des procédés pyrométallurgiques, principalement la fusion et l'affinage. Le cuivre est d'abord transformé en "blister" (ou cuivre ampoulé) titrant entre 98 et 99 %, puis coulé en anodes d'environ 300 kg qui vont être électroraffinées en cathodes de 8 kg de pureté de 99,99 %. Cette filière constitue environ 80 % des cathodes produites dans le monde (voir la Figure 4a).

Les minerais oxydés, quant à eux, se situent généralement dans la zone superficielle (supergène) des gisements sulfurés tels que les porphyres ou les gisements de cuivre sédimentaire. Bien que souvent pauvres en cuivre, ils restent rentables en raison de leur accessibilité et de coûts de traitement relativement bas. Contrairement aux minerais sulfurés, leur traitement ne nécessite pas systématiquement de broyage ou de flottation. Ils sont traités par hydrométallurgie, *via* une lixiviation à l'acide sulfurique (en tas ou *in situ*), suivie d'un procédé d'extraction par solvant et une électroextraction (SX-EW, pour *Solvent Extraction – ElectroWinning*), permettant d'obtenir des cathodes de cuivre à 99,9 % de pureté. Cette filière représente environ 20 % de la production mondiale annuelle de cuivre (voir la Figure 4a).

Les cathodes issues de ces deux procédés constituent le standard de référence pour la cotation sur les marchés internationaux tels que le LME (London Metal Exchange) ou le SHFE (Shanghai Futures Exchange). Elles sont ensuite fondues pour produire des semi-produits comme des barres, lingots, paillettes ou billettes.

En 1990, le Chili représentait encore 13 % des capacités mondiales de fusion-affinage du cuivre. Ce chiffre

est tombé à 8 % en 2016 et devrait continuer à diminuer pour atteindre seulement 5 % d'ici 2030. Cette baisse s'inscrit dans un transfert progressif de ses capacités de traitement vers la Chine (pour diverses raisons dont la rentabilité ou les normes de rejet de certains polluants, et la volonté de la Chine de dominer ces marchés), dont la part ne cesse de croître : elle est passée de 31 % en 2016 à une projection de 43 % en 2030. La Chine occupe une position dominante dans la production d'anodes de cuivre, avec près de 12 millions de tonnes produites en 2023, sur un total mondial avoisinant les 23 millions de tonnes. Elle abrite 10 des 20 plus grandes fonderies du monde en termes de capacité, dont celles de Nanko et Guixi, affichant respectivement des capacités annuelles de 675 et 520 kt. De même, la Chine domine largement la production de cuivre raffiné sous forme de cathodes (voir la Figure 4b). En 2023, elle en a produit environ 12 millions de tonnes, soit près de 45 % de la production mondiale, estimée à 26,5 millions de tonnes. La Chine compte également 9 des 20 plus grandes raffineries mondiales, dont celle de Guixi (opérée par Jiangxi Copper Corporation), avec une capacité atteignant 1,1 million de tonnes de cuivre. À noter qu'en 2022, la RDC a dépassé le Chili pour devenir le deuxième producteur mondial de cuivre raffiné.

Les cathodes de cuivre peuvent être produites à partir de cuivre primaire (filière mine pyrométallurgique ou filière mine hydrométallurgique) et de cuivre secondaire (filière recyclage). Selon les pays, il existe donc des différences importantes dans les sources de production du cuivre raffiné.

Produits semi-finis

Le métal liquide, issu de la fonte des cathodes de cuivre, est ensuite coulé sous forme de barres à fil, plateaux à laminier, billettes à section circulaire et autres formes similaires destinées au laminage, au filage, à l'étrépage, au tréfilage, au forgeage, pour la fabrication de plaques, tôles, bandes, fils, tubes et autres produits ou sous forme de lingots destinés à la refonte, notamment pour la préparation d'alliages (Schlesinger *et al.*,

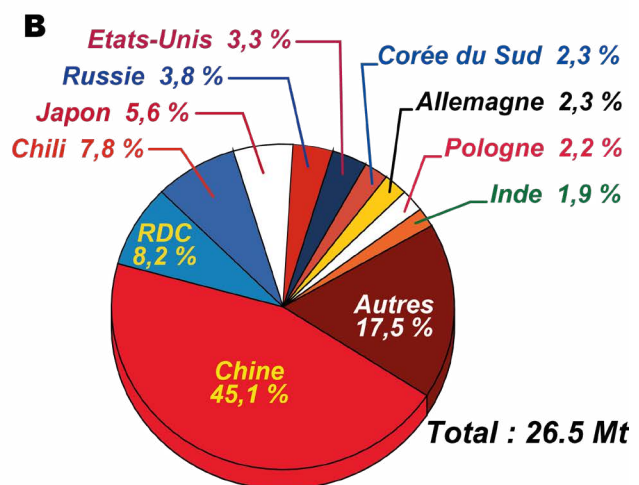
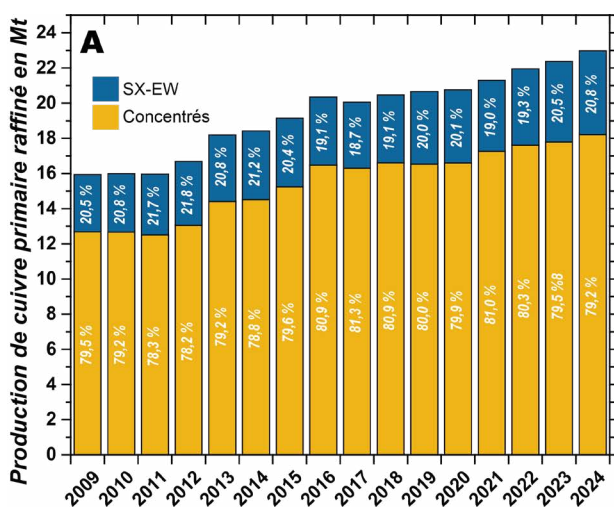


Figure 4 : a) Part des filières pyrométallurgique et hydrométallurgique dans la production minière de 2009 à 2024.

SX-EW : extraction par solvant & électroextraction (Source : Données ICSG). b)

Part des pays producteurs de cuivre raffiné (cathodes) en 2023 (Source : Données ICSG).

2011). Le cuivre affiné peut également se présenter sous forme de grenailles utilisées principalement pour la préparation d'alliages ou parfois pour être réduites en poudre. Cette première transformation du cuivre et de ses alliages conduit à la fabrication des produits finis comme les barres et profilés en cuivre ou en laiton, les fils et câbles destinés à la distribution de l'électricité, les tubes destinés aux canalisations industrielles et domestiques, les pièces moulées, etc. La France ne joue plus de rôle dans l'amont de la chaîne de valeur du cuivre depuis plus de vingt ans (M. Le Gleuher et C. Greffié, 2023). Depuis l'arrêt de l'exploitation des gisements nationaux, il n'y a plus de production primaire de cuivre, ni sous forme d'anodes ni de cathodes. La filière française débute désormais à l'étape de la transformation, incluant notamment la fabrication d'alliages.

La part du recyclage stagne autour d'un tiers de la consommation

Le recyclage joue un rôle essentiel et croissant dans le marché mondial du cuivre. Il comprend deux grandes catégories : les déchets issus des chutes de fabrication (ou *new scraps*) et les déchets de produits en fin de vie (ou *old scraps*). Selon l'ICSG, environ 6 millions de tonnes de *new scraps* ont été recyclées en 2023. Une partie de ces rebuts, propre et non contaminée, peut être réintégrée directement dans le processus de production en boucle courte. D'autres, souillés ou mélangés à d'autres matériaux, nécessitent un traitement préalable ou sont exclus du circuit immédiat. Il est généralement admis que 85 % du cuivre contenu dans les produits en fin de vie peut être récupéré. La durée de vie de ces produits varie fortement : de quelques années pour les équipements électroniques à plus de cent ans pour certaines infrastructures dans le bâtiment. Le cuivre pur non allié peut être refondu et utilisé directement pour produire de nouvelles anodes. Les alliages comme le bronze ou le laiton sont également refondus pour une réutilisation directe, leurs propriétés métallurgiques étant conservées. L'ICSG estime à 4,5 millions de tonnes la quantité de *old scraps* recyclés par les fonderies et les affineurs en 2023. En combinant ces deux flux, environ 11 millions de tonnes de cuivre secondaire ont été utilisées en 2022, soit près d'un tiers des 32,4 millions de tonnes de cuivre consommées, mais cela reste très hétérogène selon les régions du monde.

Conclusion

Les dynamiques des prochains mois risquent d'être compliquées à anticiper en raison de la mise en place de taxes sur les importations de cuivre aux États-Unis et en Chine, de soucis techniques sur plusieurs mines ayant pour conséquence (entre autres) une production moins soutenue qu'attendue, et d'un ralentissement de la croissance de la demande en Chine et globalement pour toutes les économies matures sur les secteurs traditionnels dont la construction. Ces incertitudes pèsent sur la volatilité des prix, qui, selon le LME, oscillent entre 9 500 et 10 000 \$/t. Après un déficit d'environ 100 kt en 2023 et un surplus de 140 kt en 2024, les observateurs et

analystes semblent s'accorder sur un surplus en 2025 et 2026 (dont les volumes sont encore à déterminer) du fait d'une production métallurgique élevée, et si les volumes de concentrés miniers sont au rendez-vous. Mais ces prévisions restent très dépendantes des évolutions économiques et géostratégiques, et sont donc susceptibles de changer très rapidement au gré des annonces et événements affectant de près ou de loin ce marché.

Bibliographie

INTERNATIONAL COPPER STUDY GROUP - ICSG (2025).

LE GLEUHER M. & GREFFIÉ C. (2023), Le cuivre français : consommation et commerce de produits en cuivre affiné sur la période 2012 – 2021. Rapport final. BRGM/RP-72548-FR, 43 p., 4 ann. Non publié.

LEGUÉRINEL M. & LE GLEUHER M. (2019), Le cuivre : revue de l'offre mondiale en 2019. Rapport final. BRGM/RP-69037-FR, 62 fig., 10 tabl.

LONDON METAL EXCHANGE (2025), www.lme.com

OFREMI (2023), www.ofremi.fr/fr

S&P GLOBAL (2025), www.capitaliq.spglobal.com

SchlesINGER M. E., KINGM. J., SOLE K. C. & DAVENPORT W. G. (2011), *Extractive metallurgy of copper*, Oxford, Elsevier, 455 p.

Chaîne de valeur des métaux de la mobilité électrique

Par **Louis-Marie MALBEC**

Économiste-prospectiviste à IFP Énergies nouvelles (IFPEN)

Et **Alice MARIE**

Ingénieure chercheuse au CEA

Pour sa mobilité électrique, l'Europe développe une filière des batteries lithium-ion et des aimants permanents. Elle s'articule autour de matériaux critiques : lithium, nickel, cobalt, manganèse, graphite et terres rares. Actuellement cette chaîne de valeur est dominée par la Chine, avec plus de 70 % des capacités mondiales à chaque étape de raffinage, de fabrication de composants, d'assemblage et de recyclage. Les annonces européennes montrent un retard aux étapes intermédiaires entre la mine et le produit fini, soulevant trois défis : les tensions mondiales sur les capacités de production ; l'accès aux compétences techniques ; et la nécessité d'une compétitivité économique. Le recyclage est clé pour constituer une ressource secondaire souveraine, et pose des questions de sécurisation des flux matière, d'incertitude sur les chimies de batteries, et de compétitivité avec la matière primaire. Les réglementations et les acteurs innovants continuent à s'installer sur l'échiquier européen, qui ne manque pas d'atouts pour relever les défis de la chaîne de valeur des métaux de la mobilité électrique.

L'électrification de la mobilité repose sur l'équipement des véhicules en batteries et en moteurs électriques, tous deux consommateurs de matériaux critiques. Les batteries lithium-ion se composent d'une anode essentiellement constituée de graphite, et d'une cathode dont les formulations les plus répandues sont les lithium-fer-phosphate (LFP) et les nickel-manganèse-cobalt (NMC). Les aimants permanents des moteurs électriques sont essentiellement des néodyme-fer-bore (NdFeB) comprenant des terres rares légères (néodyme et praséodyme) ainsi que du dysprosium (terre rare lourde). Le cuivre, en tant que conducteur d'électricité, est bien évidemment largement utilisé : il est traité dans un article multisectoriel dédié dans cet ouvrage (cf. « Le cuivre : chaîne de valeur d'un métal hautement stratégique », pp. 33-37).

L'interdiction de vente de véhicules particuliers thermiques en Europe à partir de 2035 et leur remplacement par des véhicules électriques entraîneront une demande annuelle d'environ 780 GWh de batteries et 25 kt d'aimants pour l'Europe, soit, selon le scénario « chimies variées BAU » de l'étude de l'IFRI [1], des besoins annuels de 71 kt de lithium, 380 kt de nickel, 48 kt de cobalt, 48 kt de manganèse et 740 kt de graphite. Les besoins annuels en terres rares pour les aimants seraient, quant à eux, de l'ordre de 5 kt de néodyme et 0,75 kt de dysprosium. Néanmoins, toutes ces batteries et tous ces aimants ne seront pas nécessairement fabriqués en Europe, et il faut bien différencier les matières

qui approvisionnent l'industrie européenne de celles alimentant les usages de consommation en Europe.

Ainsi, les chaînes de valeurs des terres rares, du lithium, du nickel, du manganèse, du cobalt et du graphite seront considérées dans la suite de cet article, qui se concentrera sur les défis des étapes intermédiaires, entre la mine et le produit fini, ainsi que sur le recyclage, qui pourrait jouer un rôle essentiel dans l'approvisionnement futur.

Les défis de la relocalisation en Europe d'une chaîne de valeur concentrée en Chine

De nombreuses étapes de transformation sont nécessaires pour fabriquer des batteries et aimants permanents pour véhicules électriques à partir des matériaux critiques extraits du sous-sol (ou des produits en fin de vie). Ces étapes décrivent une chaîne de valeur, d'abord par l'extraction et le raffinage de chaque matière séparément, puis par leur combinaison dans des composants qui sont ensuite assemblés dans les batteries et véhicules. Les traitements en fin de vie permettent de faire reboucler cette matière vers des étapes amont. La Figure 1 propose une représentation schématique de la chaîne de valeur des métaux critiques spécifiques aux batteries et aimants permanents pour la mobilité électrique, de la mine au véhicule puis à son recyclage.

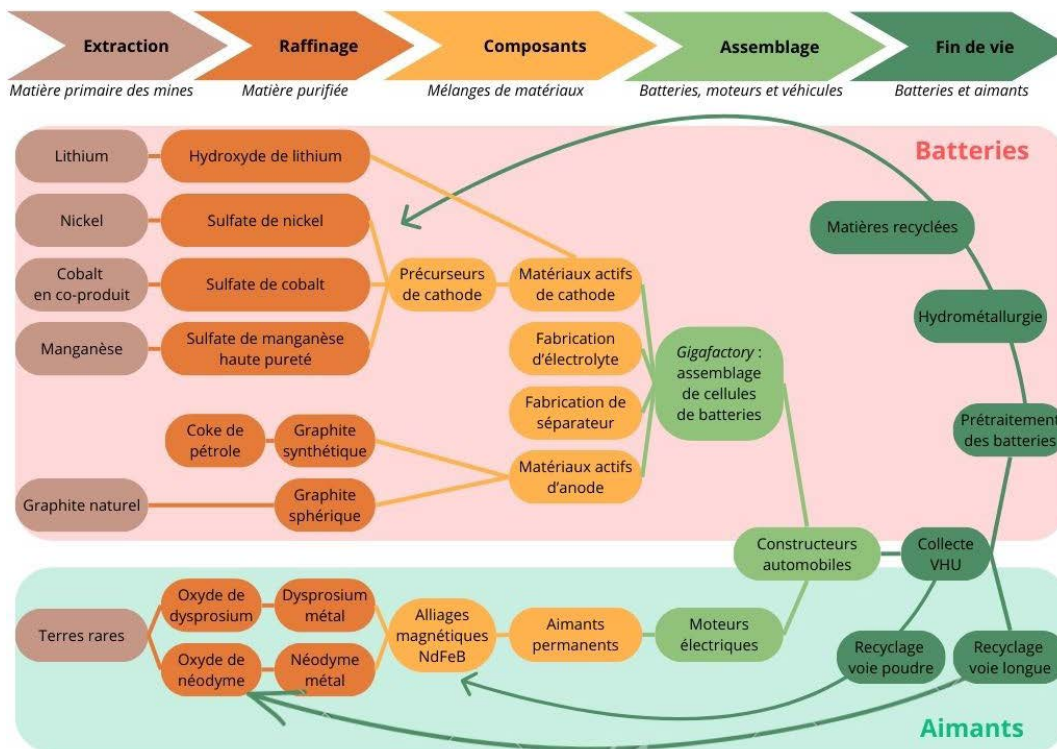


Figure 1 : Représentation de la chaîne de valeur des matériaux critiques spécifiques à la mobilité électrique (Source : Alice Marie avec « Matériaux critiques des batteries, décembre 2024 », OFREMI).

À chaque étape de cette chaîne de valeur, la production mondiale est dominée par un acteur majoritaire. Si le principal pays producteur est différent pour l'extraction minière de chaque matériau (Australie pour le lithium, Indonésie pour le nickel, République démocratique du Congo pour le cobalt, Afrique du Sud pour le manganèse, Chine pour le graphite naturel et les terres rares), pour l'aval de la chaîne de valeur en revanche, du raffinage à l'assemblage en passant par la fabrication des multiples composants, c'est la Chine qui domine la production mondiale, avec 70 % à 98 % des capacités mondiales (voir la Figure 2).

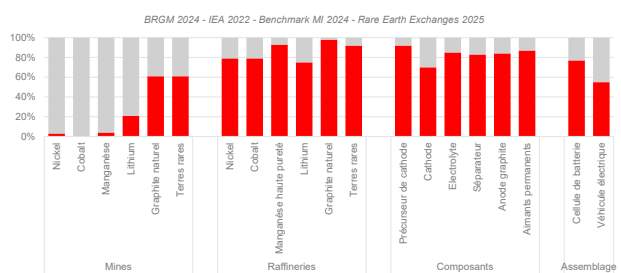


Figure 2 : Part de la Chine dans la production mondiale sur la chaîne de valeur des matériaux critiques spécifiques à la mobilité électrique (Source : Alice Marie avec « Matériaux critiques des batteries, décembre 2024 », OFREMI).

À l'échelle française et européenne, les pouvoirs publics et les industriels se positionnent pour bénéficier de l'essor de la mobilité électrique, favoriser le développement d'une industrie régionale, accélérer la décarbonation de la mobilité, et limiter leur dépendance (technologique et d'approvisionnement) à la Chine. Cependant, c'est bien toute la chaîne de valeur qu'il faut être capable de sécuriser. Ainsi, au niveau français

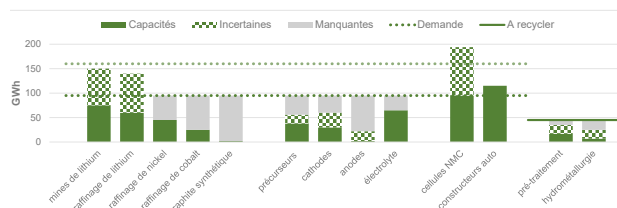


Figure 3 : Les capacités françaises à chaque étape de la chaîne de valeur des batteries, estimées pour l'horizon 2030 en l'état des annonces mi-2025 (Source : Alice Marie avec « Matériaux critiques des batteries, décembre 2024 », OFREMI).

(voir ci-haut la Figure 3) comme à l'échelle européenne [2], si les capacités de production annoncées semblent suffisantes en ce qui concerne l'assemblage de batteries et de véhicules électriques, et l'extraction et le raffinage de lithium, des sous-capacités sont en revanche à craindre sur les étapes de transformation de la matière (en fin de vie et à l'intermédiaire entre l'extraction et l'assemblage). Ces deux points critiques de la chaîne de valeur seront donc approfondis dans la suite.

Le raffinage et la fabrication de composants : maîtriser les étapes intermédiaires de transformation de la matière

Essentiellement réalisées en Chine, ces étapes intermédiaires doivent pourtant faire partie de la stratégie de développement d'une filière européenne aux approvisionnements sécurisés. En particulier, les étapes de fabrication d'anodes en graphite pour les batteries et

de métallisation des terres rares pour les aimants sont deux importants points de vulnérabilité de la chaîne de valeurs, avec très peu d'acteurs en Europe. Pour maîtriser la transformation de la matière et assurer l'approvisionnement de son industrie de la mobilité électrique, l'Europe doit faire face à trois défis : les tensions mondiales sur les capacités de production ; l'accès aux compétences techniques ; et la nécessité d'une compétitivité économique.

Pour approvisionner l'électrification de la mobilité, les capacités mondiales de transformation de la matière sont amenées à croître fortement dans la décennie. Les prévisions mondiales comme européennes identifient à moyen terme de potentielles surcapacités en cellules et sous-capacités en cathodes [2]. L'amont de la chaîne de valeur doit donc être renforcé, tandis que l'aval risque de subir des tensions d'approvisionnement et une concurrence féroce, avec les acteurs européens comme les acteurs mondiaux. Ces projections doivent également être remises dans le contexte actuel de surcapacité par anticipation de croissance du marché, par exemple à la fabrication de cathodes LFP [3] ou au raffinage de nickel [4], ce qui freine les investissements.

Les industries des batteries et des aimants reposent sur des savoir-faire de pointe couvrant de multiples domaines (hydrométallurgie, cristallographie, chimie des poudres, électronique, etc.) et mobilisant des équipements complexes. Le développement de ces compétences en Europe demande du temps. La montée en puissance de la production en est ralentie, ce qui représente un coût en capital, un risque pour les investisseurs, et un frein pour la souveraineté de la filière et l'électrification de la mobilité. De plus, l'accès à certaines technologies est devenu contraint par les licences d'exportation chinoises : en décembre 2023, pour la séparation et la métallisation des terres rares [5] ; en juillet 2025, pour le raffinage du lithium et la production de cathodes LFP [6-7]. Pour relever ce défi, on peut citer la stratégie de *joint-venture* avec un acteur asiatique compétent (par exemple Orano s'allie à XTC pour ses usines de précurseurs et de cathodes), et la stratégie d'innovation dans des procédés plus vertueux (par exemple la start-up strasbourgeoise Viridian Lithium collabore avec le CNRS pour un lithium raffiné de faible empreinte carbone).

Enfin, la compétitivité économique est un enjeu principal pour toute la filière européenne des batteries et des aimants, face à une concurrence chinoise ne jouant pas avec les mêmes coûts énergétiques, normes environnementales, normes de sécurité, droits du travail, etc. Les étapes de raffinage et de fabrication de composants sont plus particulièrement soumises à cette compétitivité, par leurs marges plus faibles qu'en aval [3-8] et leur forte dépendance aux fluctuations de prix des matières premières [3-9-10]. De plus, une incertitude plane quant aux objectifs réglementaires de réincorporation de matières recyclées, et à la répercussion des coûts du recyclage. Un acteur intégré sur une plus grande partie de la chaîne de valeur pourrait lever ces contraintes, s'affranchir des prix de marché des matières en s'auto-alimentant à coûts déterminés (par exemple Orano vise à couvrir les étapes de production de matière secondaire, de précurseurs et de cathodes).

La fin de vie et le recyclage : constituer une ressource secondaire souveraine

Le recyclage présente un fort intérêt pour contenir les besoins en métaux primaires, sécuriser les approvisionnements et limiter les impacts environnementaux. Mais c'est une solution de long terme : la durée de vie des batteries, moteurs à aimants permanents et véhicules électriques est de l'ordre de 15 ans, et tend à augmenter. Avec l'arrêt prévu des ventes de véhicules thermiques en 2035, l'économie du recyclage atteindra sa pleine capacité au plus tôt en 2050. Le scénario NZE de l'IEA estime ainsi qu'avec des taux de collecte et de récupération ambitieux, le recyclage des terres rares pourrait couvrir 40 % de la demande en 2050. Malgré cette inertie, il faut créer dès aujourd'hui les filières, qui font face à de nombreux défis.

Plusieurs voies de recyclage sont développées en France. La voie poudre, où un nouvel aimant est produit directement à partir de poudre d'anciens aimants broyés (exemple : MagREEsources, inscrit dans la liste des 47 projets stratégiques de l'Union européenne), est prometteuse en termes de coûts économique, énergétique et environnemental, mais contrainte par la qualité des aimants collectés. La voie fusion (Orano) et la voie longue, qui vise à reséparer les terres rares (Carester), nécessitent davantage de compétences en remontant plus en amont des étapes de production des aimants, mais atteignent de plus hautes performances d'aimants. Dans tous les cas, la rentabilité reste l'enjeu majeur face au faible coût des aimants primaires produits en Chine.

Le développement du recyclage des batteries est freiné par l'incertitude sur les chimies dominantes. Contrairement aux aimants permanents dominés par la technologie NdFeB (moyennant des évolutions de proportions et en particulier des réductions de terres rares lourdes), les chimies de batteries évoluent rapidement. L'Europe a pour le moment misé sur la technologie NMC alors que les batteries LFP représentent plus de 70 % des ventes en Chine. Or, si les prix actuels du nickel et du cobalt des batteries NMC rentabilisent leur recyclage, seul le lithium des batteries LFP peut être valorisé, et son cours est aujourd'hui trop bas. Le recyclage en voie directe, sans séparer les matériaux de la cathode, pourrait offrir une solution pour ces batteries. À cela s'ajoute l'émergence de nouvelles technologies en rupture, dont il est difficile à ce stade de prédire la place qu'elles prendront sur le marché.

En Europe et en France, une filière émerge avec une multitude de projets de petite capacité, souvent spécialisés dans le pré-traitement ou l'hydrométallurgie (qui mobilisent des compétences très différentes). Au-delà des aspects techniques, la collecte, le démontage et le tri des déchets sont des défis majeurs. La question de la sécurisation des intrants est également critique pour l'Europe, certains projets ayant déjà échoué faute de volumes suffisants ou de débouchés pour les matières recyclées.

Le surcoût lié au recyclage pourrait être pris en charge par le développement de mécanismes tels que les REP (responsabilité élargie du producteur) ou des incitations aux consommateurs à privilégier les produits intégrant des métaux recyclés. L'éco-conception est aussi clé pour réduire les coûts de récupération et de tri. Le graphite des anodes, absent des objectifs de recyclage des batteries de la réglementation européenne [11], pourrait devenir stratégique après les restrictions d'exportation annoncées par la Chine en décembre 2023, à condition d'atteindre les spécifications pour sa réutilisation (grade batterie) à un prix compétitif.

Enfin, l'Union européenne a récemment adopté deux textes structurants : le Critical Raw Material Act [12] et le Net Zero Industry Act [13], qui fixent des cibles ambitieuses d'extraction, de raffinage et de recyclage des métaux critiques ainsi que de fabrication de produits finis et semi-finis nécessaires à la transition énergétique, afin de bâtir un écosystème européen du recyclage.

Conclusion

Le développement d'une chaîne de valeur européenne des métaux de la mobilité électrique, des batteries et des aimants soulève de multiples défis. En particulier, la compétitivité économique et la sécurisation d'approvisionnement face à la domination des capacités chinoises restent un enjeu de taille, qui passe par la montée en puissance d'une filière complète.

Pour maîtriser le raffinage et la fabrication de composants, la France peut s'appuyer sur des acteurs pionniers dans le raffinage de lithium, la séparation des terres rares lourdes, la production de graphite synthétique, qui proposent des solutions techniques innovantes et d'impact environnemental réduit.

Pour soutenir la sécurisation d'une ressource secondaire, la France peut compter sur la responsabilité élargie des producteurs, des centres de gestion des véhicules hors d'usage (VHU) existants, les objectifs ambitieux et chiffrés du règlement européen sur les batteries, et sur l'image publique positive du recyclage.

Bibliographie

[1] EYL-MAZZEGA M.-A., GHERASIM D.P., VANNIER C. & CONTUA. (2023), « Comment gagner le pari industriel de la mobilité électrique en France et en Europe ? », Institut Français des Relations internationales.

[2] NEEF C. & THIELMANN A. (2023), "lithium-ion battery roadmap – industrialization perspectives Toward 2030", Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research.

[3] BENCHMARK Source (2024), "How LFP cathode competition has driven prices down", mars.

[4] BENCHMARK Source (2025), "Indonesian nickel smelters face soaring ore costs amid domestic supply crunch", juillet.

[5] LIU S. & PATTON D. (2023), "China bans export of rare earths processing tech over national security", Reuters, décembre.

[6] BENCHMARK Source (2025), "China implements export restrictions on cathode and lithium production technologies", juillet.

[7] BENCHMARK Source (2025), "How could China's proposed technology export restrictions impact cathode expansions overseas?", janvier.

[8] BENCHMARK Source (2025), "How do profit margins vary across key battery producers?", avril.

[9] BENCHMARK Source (2025), "Impact of DRC's cobalt export ban seen in cathode prices", mai.

[10] BENCHMARK Source (2024), "Chinese policy boosts rare earths spending, but effect could be short-lived", septembre.

[11] PARLEMENT EUROPEEN (2023), « Règlement (UE) 2023/1542 relatif aux batteries et aux déchets de batteries », *Journal officiel de l'Union européenne*, juillet.

[12] EUROPEAN COMMISSION (2023), "European Critical Raw Materials Act Factsheet", mars et son entrée en vigueur le 23 mai 2024, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401252

[13] PARLEMENT EUROPEEN (2024), « Règlement (UE) 2024/1735 relatif à l'établissement d'un cadre de mesures en vue de renforcer l'écosystème européen de la fabrication de produits de technologie "zéro net" », *Journal officiel de l'Union européenne*, juin.

The current state of the European Union's dependency and its policies

Par Peter HANDLEY

Senior fellow with the European Initiative for Energy Security Strategic advisor with the Hague Centre for Strategic Studies

“Europe’s strategic autonomy is about reducing dependence on others for things we need the most: critical materials and technologies, food, infrastructure, security, and other strategic areas”*.

* EUROPEAN COMMISSION (2020), *A New Industrial Strategy for Europe*.

Strategic dependencies

100 days after taking office in 2019, Ursula von der Leyen’s Commission unveiled an industrial strategy to spearhead Europe’s energy and digital transitions, emphasising “strategic autonomy” and reducing “strategic dependencies”. The 2020 Critical Raw Materials Action Plan¹ was an early deliverable, marking a shift from analysing dependency to taking measures to reduce it.

As far back as 2008, the EU had launched a 3-pronged Raw Materials Initiative covering external supply, domestic sourcing, and resource efficiency. In 2011,

the Commission issued its first triennial criticality assessment. In 2012, it launched the European Innovation Partnership on Raw Materials to guide a threefold R&I budget increase from €180 m (2007-2013) to €600 m (2014-2020) (€800 m + projected for 2021-2027).

Despite these measures, awareness rose but dependency did not fall. In fact, dependency increased for many critical raw materials. Materials deemed critical grew from 14 in 2011 to 34 under the 2024 Critical Raw Materials Act. Here are the EU’s major suppliers of critical raw materials according to the last assessment:

¹EUROPEAN COMMISSION (2020), *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*.

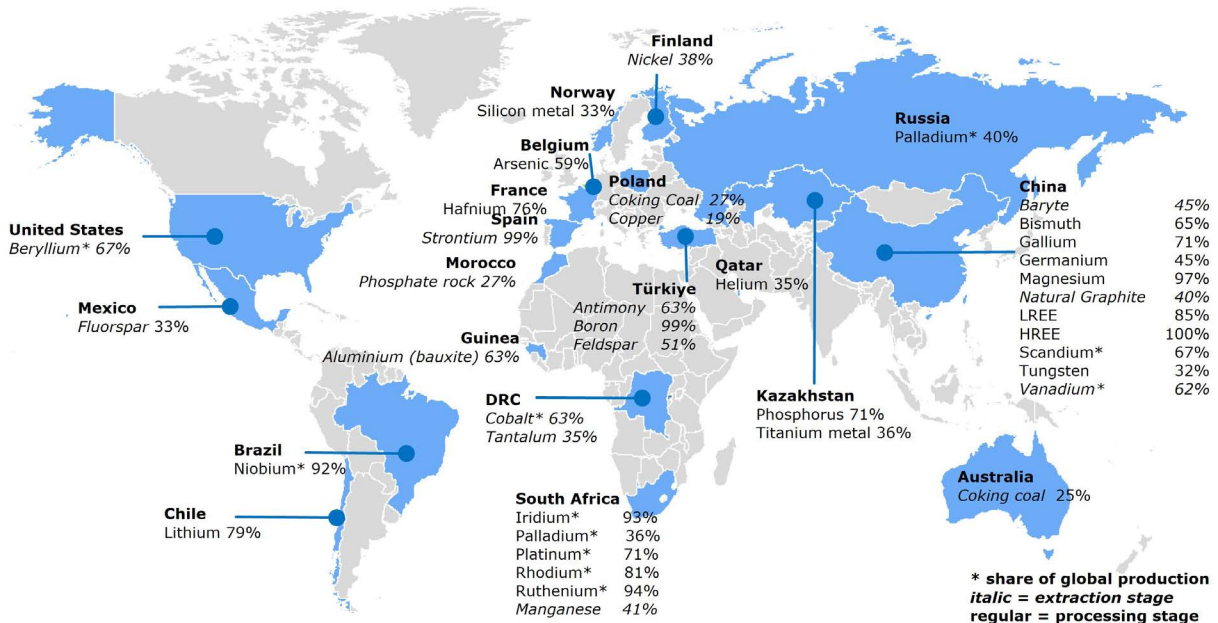


Figure 1: European Commission's map showing major suppliers (Source: European commission, Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report).

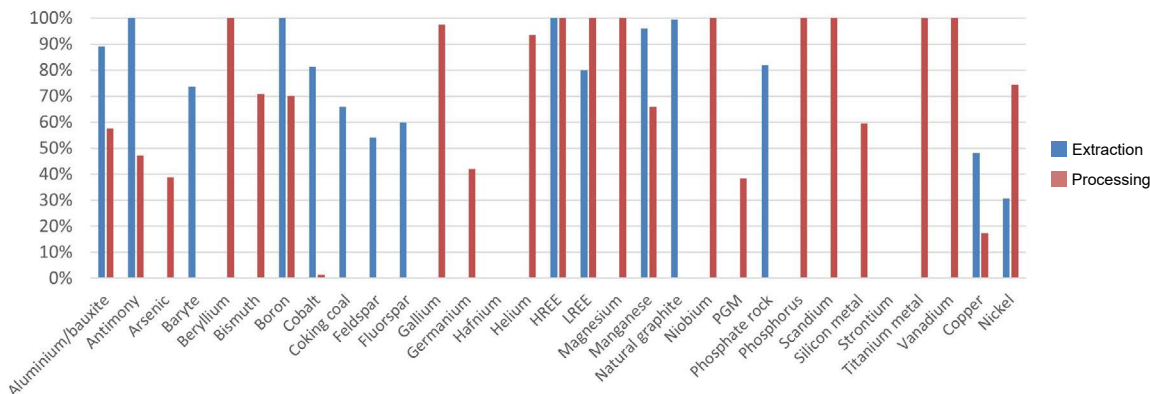


Figure 2: European Commission import reliance of CRMs (Source: European Commission, Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report).

European Commission²

Methodological changes in 2017 complicate direct comparison, but broadly average EU import dependency for critical raw materials rose between 2011 and 2023 from about 83% to 90%. The situation is acute for refined materials, as this graphic from the 2023 assessment shows:

Two factors explain the failure to reduce dependency:

- While the global trade system stayed open, integrated supply chains functioned smoothly and there was no market pressure to source raw materials sustainably, it made economic sense to commoditise raw material inputs. This resulted in a preference for outsourced, ‘just-in-time’ supply at prices that ignored environmental and social costs.
- China pursued its long-term strategy to dominate the global supply chain through massive, subsidised investment in extraction, refining, and manufacturing. This brought economies of scale, making it easier to produce cost-efficiently and absorb the cost of innovation. Additionally, China has not hesitated to use its dominant position to artificially depress prices. This creates dependency and obstructs the emergence of potential competitors. Other parts of the world like the EU and US have struggled to compete with this State-driven industrial strategy.

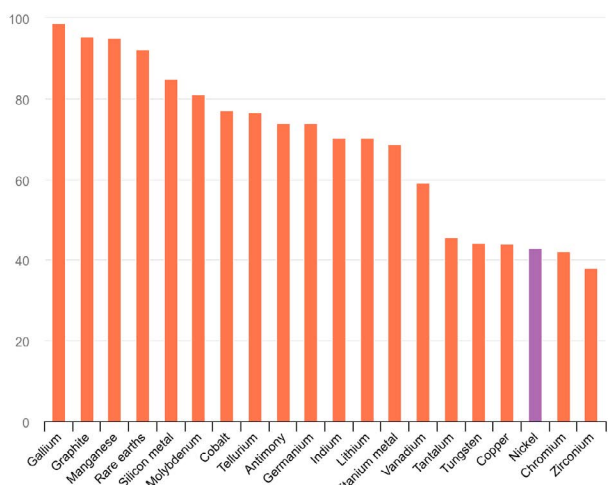


Figure 3: IEA share of top refining country for 20 energy-related minerals.

²DIRECTORATE-GENERAL FOR INTERNAL MARKET, INDUSTRY, ENTREPRENEURSHIP AND SMEs, GROHOL M., VEEH C. (2023), Study on the critical raw materials for the EU 2023 - Final report.

China has become the dominant refiner today for 19 out of 20 critical raw materials essential for the clean energy transition, with a 70% average market share, according to the International Energy Agency (IEA)³.

Licence: CC BY 4.0

The nature of the EU’s dependency has changed since the start of this decade. It has become real, not abstract, for many businesses.

Since 2023, European businesses have been hit by China’s export restrictions on gallium, germanium, graphite, and other metals. In April 2025, China introduced export controls on rare earths and permanent magnets in retaliation for President Trump’s so-called ‘reciprocal’ tariffs. These controls also hurt other countries as a warning against their siding with the US. That summer, several European automotive component manufacturers halted production as inventories ran dry, threatening both EV and combustion engine production. In a recent twist, China restricted technology exports for REE refining and manufacturing where they had a virtual monopoly.

The focus has also shifted from dependency being a problem for the energy and digital transitions. Today, security and defence are just as important. Geopolitical shifts are forcing Europe to take more responsibility for its own defence and to support Ukraine.

The EU is now reinforcing its defence industrial base. The Commission’s 2024 European Defence Industry Programme proposal (EDIP) foresees joint procurement of defence-critical inputs, targeted priority orders of materials for defence during emergencies, stockpiles, and funding for industrial ramp-up and cross-border cooperation in defence materials and components.

³INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2025), *Global Critical Minerals Outlook*.



Figure 4: Supply risk for critical raw materials in military applications.

In 2025, the EU launched its most ambitious defence overhaul yet, centred on the Readiness 2030 strategy, ReArm Europe, and the SAFE initiative. Part of the boost in defence sector spending will need to address critical raw materials supply, such is the defence sector's reliance on metals and minerals, as this overview by the Hague Centre for Strategic Studies shows⁴.

Systemic shocks

Between 2020 and 2022, three crises spurred a shift in EU raw materials policy.

- During Covid-19, the EU faced severe supply disruptions due to global lockdowns, mine closures, and a drop in EU manufacturing. Uneven global recovery led to surging energy and shipping costs, compounding the strain on EU mineral imports. EU aluminium and car-manufacturing came close to shutdown in 2021 when China suspended magnesium exports (EU is 95% dependent on China) citing domestic energy shortages and environmental pressures. On the positive side of Covid-19, the Commission jointly procured personal protective equipment (PPE) and vaccines, and launched an €800 billion economic-recovery package⁵.
- Russia's invasion of Ukraine on 24 February 2022 disrupted supplies of energy, fertilisers, and critical raw materials. The EU sanctioned steel, aluminium and copper goods but kept importing fertilisers,

nickel, titanium, and uranium to avoid crippling the aerospace, nuclear and food sectors. The March 2022 Versailles Declaration committed Member States to bolster defence, energy and economic sovereignty. It sought to reduce critical raw material dependencies through strategic partnerships, circular economy measures, and stockpiling.

- The EU initially welcomed the August 2022 US Inflation Reduction Act (IRA) as a long-awaited US commitment to the clean energy transition, but came to see the IRA as a threat. The IRA's production-based incentives, cheap US energy, and streamlined approvals soon drew battery and rare earth projects from Europe to the US. The US preference for domestic and FTA-sourced inputs and the EU's failure to strike a US minerals accord intensified competitive pressure.

In response, Ursula von der Leyen's September 2022 State of the Union set a six-month deadline for a European Green Deal Industrial Plan, anchored by the Critical Raw Materials Act and the Net-Zero Industry Act.

Momentum for decisive European action on critical raw materials had been building for some time. The European Parliament, Member States, and industry were already discussing what Europe needed to do. This was reflected in the 2021 Bentele Report⁶, the Varin Report⁷, the French-led Lens Competitiveness Council, the Versailles Declaration, and Member State position papers.

⁴GIRARDI B., PATRAHU I., CISCO G., RADEMAKER M. (2023), *Strategic Raw Materials for Defence: Mapping European Industry Needs*.

⁵EUROPEAN COMMISSION (2020), *EU recovery plan "NextGenerationEU"*.

⁶BENTELE H. (2021), *Report on a European Strategy for Critical Raw Materials*. European Parliament, Committee on Industry, Research and Energy.

⁷VARIN P. (2022), *Report on securing mineral raw material supplies for the French industry in the energy transition*.

The European Critical Raw Materials Act (CRMA)

The Commission proposed the CRMA on 16 March 2023. The package contained a draft regulation and its impact assessment, the 2023 criticality assessment and a foresight report projecting material needs to 2030 and 2050 across fifteen strategic technologies (energy, digital, mobility, defence, aerospace).

Interinstitutional talks wrapped up in under nine months, driven by broad political backing and Commissioner Thierry Breton's outstanding leadership. The Act entered into force on 23 May 2024, an occasion marked by the first Critical Raw Materials Board meeting and publication of the first call for strategic projects.

The Act's twin goals are supply security and sustainability. Security of supply underpins the entire framework, while circular economy measures, environmental safeguards, and ethical sourcing rules embed sustainability alongside resilience.

The Act designates 34 critical raw materials for the EU-wide economy and a subset of 17 strategic materials tied to specific green, digital, defence, and aerospace uses.

Non-binding *de minimis* 2030 benchmarks push the EU to domestically mine 10% of its strategic needs, process 40%, and recycle 25%, with no single third country supplying over 65% of any one strategic material.

The European non-ferrous metals association (Eurometaux) estimates the EU needs 10 new mines, 15 processing and 15 recycling facilities, plus 20 reopened aluminium, zinc and silicon sites to meet these benchmarks⁸.

Strategic projects in the EU that advance these targets and meet high social and environmental standards gain fast-track permitting. Strategic projects inside and outside the EU get enhanced financing and coordinated support to reduce red tape and boost investor confidence.

After evaluating 170 proposals, the Commission designated 47 EU strategic projects in March 2025 and 13 non-EU projects in June, spanning *inter alia* Canada, Ukraine, Zambia, Brazil, and New Caledonia.

In July 2025, the EU launched its Energy and Raw Materials Platform to pool demand and supply offers for energy-related products and critical materials, enabling joint procurement. The Hydrogen Mechanism is already live; the Raw Materials Mechanism is coming soon. This will underpin the business case for strategic projects, and could contribute to stockpiling.

Member States have rolled out national exploration programmes and waste-tailings recovery inventories. In 2025, each designated a single point of contact for fast-track permitting, and identified the major companies producing strategic technologies that are required to conduct supply-chain vulnerability mapping.

Looking ahead, the methodologies for assessing the environmental footprint of CRM-related activities are due by the end of 2025. Member States start their annual circularity reports in May 2026. Extractive waste operators report on the economic feasibility of CRM recovery by November 2026. By January 2027, the European Commission should adopt delegated acts on recycling benchmarks for specific waste streams. The next update of critical and strategic raw materials is due by May 2027, and a full evaluation of the Act is foreseen in May 2029.

Beyond the Critical Raw Materials Act

Has Europe done enough? In his report on European competitiveness, Professor Draghi⁹ argued that the CRMA was a strong foundation and should be implemented in full. However, he also urged more ambition on financing, permitting and competition policy, and to shift from advisory to operational mode.

A European JOGMEC

Draghi advised the EU to take inspiration from Japan, whose Japan Organisation for Metals and Energy Security (JOGMEC), created in 2004 with a €14 billion annual budget, has been effective in reducing Japan's critical raw material supply chain vulnerabilities.

The Commission intends to follow his advice. Under its March 2025 Clean Industrial Deal, the Commission will establish an EU Critical Raw Material Centre by end-2026 to jointly purchase raw materials, coordinate stockpiles, monitor supply chains, and develop upstream investment tools.

The Commission must get this right. It cannot afford to propose a low-ambition bureaucratic construct. The Centre must be independent, with clear objectives, powers, and finance in the billions of euros. Member States and industry should be fully involved. The Centre should pool public and private finance. European trading houses should be created to partner with the Centre, just as JOGMEC does with Sumitomo, Mitsui, Iwatani and others (Iwatani is an investment partner in France's CAREMAG project).

The European Competitiveness Fund

Critics noted the absence of a dedicated funding stream in the Critical Raw Materials Act. The Commission's July 2025 proposal for a Competitiveness Fund in the 2028-2034 Multiannual Financial Framework addresses this gap. If it survives the tough budgetary negotiations, the Competitiveness Fund's resilience chapter will finance exploration, extraction, processing, recycling, stockpiling, and CRMA strategic projects.

And yet...

While this is all something to look forward to, the harsh reality is that other parts of the world are not waiting for the EU to catch up.

⁸EUROMETAUX (2025), *2030 Resilience Manifesto: A Rallying Call for European Resilience*.

⁹DRAGHI M. (2024), *The future of European competitiveness: A competitiveness strategy for Europe*.

Since 2023, China has reminded the world that it can easily shut off supplies of critical minerals and related technologies, to maximise political and economic pain.

For its part, the second Trump Administration has positioned critical raw materials as a national security crisis needing exceptional measures.

The US has executed a series of bold moves to secure critical minerals, pursuing minerals for security deals (Ukraine, Pakistan, DRC...) and laying claim to resource-rich lands, such as Canada and Greenland. The US Development Finance Corporation and EXIM Bank are moving fast and at scale to finance mineral projects. Punishing import tariffs, e.g., 50% on copper under Section 232 national security measures, seek to force onshoring of critical raw material production in the US.

The July 2025 Department of Defense (DoD) - MP Materials partnership represents a watershed moment for US industrial and defence policy. This partnership aims to reshore rare earths and permanent magnets. The US government becomes a major shareholder in the company, provides loans for separation and magnet-making, guarantees 10-year price floor protection against market volatility/manipulation, and guarantees a 10-year Pentagon offtake for defence-grade magnets. This opened the door for large private sector offtakes. The administration is now planning other equity investments in critical mineral projects.

The lesson: The EU, Member States and industry must act now, with similar levels of boldness and creativity, to avoid being left behind in the brutal global race to secure critical minerals. The EU's strategic dependencies remain dangerously high, and others will exploit our weaknesses. The EU's strategic autonomy is at stake.

There is hope. The EU shows time after time that it can master major crises, when it is united and determined.

Le rôle clé de la Chine dans les chaînes de valeur des minerais critiques

Par John SEAMAN

Chercheur à l'Institut français des Relations internationales (Ifri)

La Chine occupe aujourd'hui une position dominante dans les chaînes de valeur des minerais critiques, de l'extraction à la transformation jusqu'aux technologies en aval. Cette suprématie repose sur des décennies de politiques industrielles et lui confère une influence stratégique considérable sur la sécurité d'approvisionnement mondiale, notamment pour l'Union européenne. Pékin a su capitaliser sur ses avantages en amont pour renforcer sa compétitivité industrielle, tout en demeurant vulnérable à une forte dépendance aux importations pour plusieurs minerais qu'il considère stratégiques. Depuis 2023, la Chine a introduit des restrictions à l'exportation de matières premières et de technologies, exploitant des effets de goulots d'étranglement afin de servir ses objectifs géopolitiques. Face à ces pratiques, l'Europe tente de diversifier ses approvisionnements, mais se heurte à la capacité de Pékin à influencer l'offre, les prix et les flux d'investissements.

Introduction

La Chine domine aujourd'hui des chaînes de valeur de nombreux minerais critiques, de l'extraction à la transformation jusqu'aux technologies en aval, suscitant de vives inquiétudes en matière de sécurité des chaînes d'approvisionnement pour la France, l'Union européenne et leurs partenaires mondiaux. Cette position repose sur des décennies de politiques industrielles, notamment la stratégie Made in China 2025, adoptée désormais il y a plus d'une décennie. Cet ensemble de stratégies visent à assurer une croissance économique et une prospérité durables pour le pays grâce au développement de positions de *leadership* dans des secteurs émergents ou nouvellement stratégiques, allant des technologies décarbonées pour la transition énergétique à la fabrication avancée, en passant par l'économie numérique et les technologies de santé.

Plus que tout, la stratégie chinoise portant sur l'amont des chaînes de valeur consiste à garantir la sécurité des chaînes d'approvisionnement et à renforcer la compétitivité des industries en aval (Seaman, 2025). Dans un contexte de méfiance stratégique vis-à-vis des puissances occidentales, notamment les États-Unis, et d'incertitude quant à la capacité de l'ordre économique libéral à continuer de servir les intérêts chinois (Economy et Levy, 2014), la question de la sécurité des ressources et de la dépendance technologique chinoise a été et reste toujours un moteur essentiel de la politique industrielle de Pékin, et informe sa stratégie globale. Elle s'inscrit également dans une volonté clairement affirmée de

dominer et maîtriser les marchés des technologies clés pour l'avenir pour conquérir le *leadership* géopolitique mondial. Une telle approche a historiquement contrasté avec les logiques plus libérales, guidées par le marché, ainsi que les pressions sociales et environnementales qui ont pesé sur les industries extractives en Occident, renforçant en fin de compte la position dominante de la Chine dans l'extraction et / ou la transformation (Humphreys, 2015).

Aujourd'hui, à mesure que les tensions géopolitiques s'exacerbent et que les grandes puissances mondiales, notamment les États-Unis, cherchent à utiliser la domination des chaînes d'approvisionnement à des fins politiques plus larges, y compris dans le cadre de la compétition stratégique avec la Chine, Pékin n'hésite plus à utiliser ses positions oligopolistiques ou monopolistiques dans les chaînes de valeur des minerais critiques comme armes géopolitiques. Ce mouvement a entraîné des efforts de diversification des chaînes d'approvisionnement, y compris de la part de la France et de l'Union européenne, mais l'ampleur de la domination chinoise et les outils dont Pékin dispose pour influencer l'offre et les prix compliquent considérablement ces initiatives.

Bilan des forces et faiblesses de la Chine dans les chaînes de valeur

Dans les chaînes de valeur des minerais considérés comme « critiques » ou « stratégiques » par la France et l'Union européenne, la domination actuelle de la

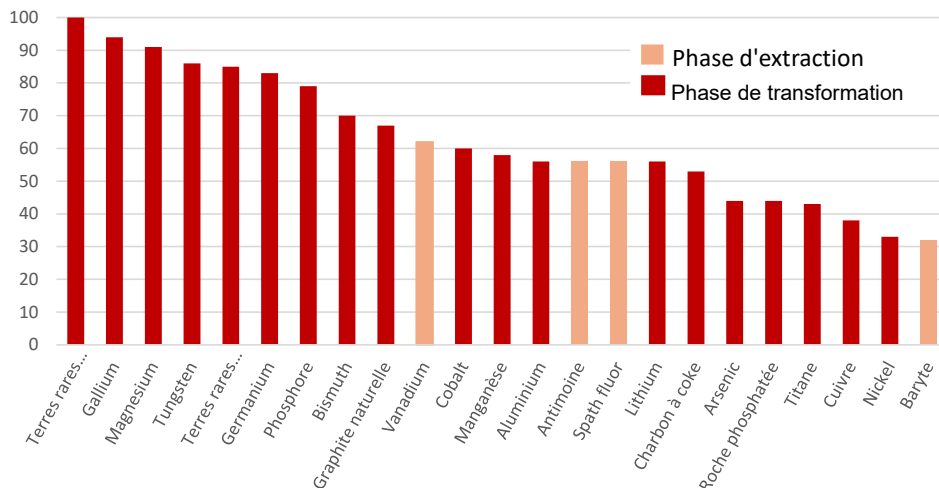


Figure 1 : Part de production mondiale de la Chine en minerais critiques :
(Source : Commission européenne, 2023).

Chine se manifeste dans trois domaines : l'extraction des minerais, la transformation des minerais et les technologies de transformation. La définition européenne de la criticité est souvent, mais pas exclusivement, liée aux risques d'approvisionnement associés au contrôle exercé par la Chine sur la chaîne de valeur.

Sur les 34 matières premières identifiées comme « critiques » par la Commission européenne en 2023, la Chine représente plus de 50 % de l'extraction et / ou de la transformation mondiale dans 19 cas. Parmi ceux-ci, la part de la Chine dépasse 60 % dans 13 cas et atteint même plus de 70 % dans 9 d'entre eux – à savoir les terres rares lourdes, les terres rares légères, le gallium, le germanium, le magnésium, le silicium métal, le phosphore, le tungstène et le bismuth (Commission européenne, 2023).

Dans certains cas, la part de la Chine dans l'extraction mondiale de minerais a diminué ces dernières années, mais son rôle en tant que centre névralgique du raffinage et de la transformation chimique ne fait que se renforcer. Les terres rares constituent un exemple particulièrement marquant. Alors que l'extraction minière a fortement augmenté au cours de la dernière décennie, principalement aux États-Unis, en Australie et au Myanmar, la part de la Chine est passée de plus de 95 % en 2010 à seulement 60 % aujourd'hui (USGS, 2025). Pourtant, la Chine a maintenu son rôle central dans la transformation des terres rares, notamment le long de la chaîne de valeur des aimants NdFeB – représentant environ 90 % de la séparation et du raffinage des minerais et des terres rares, et 92 % de la production d'aimants permanents (Smith *et al.*, 2022).

Dans d'autres cas, tels que le lithium, le cobalt ou le manganèse, la part de la Chine dans la production mondiale est minime et en recul, mais les entreprises chinoises ont réussi à se tailler des positions fortes dans la transformation en aval. Alors que la Chine ne représente que 21 % de la production primaire de lithium, par exemple, elle en assure 68 % de sa transformation chimique. Le contraste est encore plus marqué pour le cobalt et le manganèse : moins de 2 % de la production primaire a lieu en Chine en 2025, tandis que l'apport chinois atteint 79 % pour le raffinage du cobalt et 95 % pour la production chimique du manganèse (Benchmark Minerals, 2025).

Dans un certain nombre de cas, comme illustré par les aimants en terres rares, mais aussi dans les batteries et les technologies d'énergie propre, la domination des entreprises et technologies chinoises s'étend bien plus loin dans la chaîne de valeur. En 2023, la Chine représentait les trois quarts de la production mondiale de batteries, dont plus de 80 % des matériaux actifs de cathode et 90 % des matériaux actifs d'anode à l'échelle mondiale (IEA, 2024), tandis que sa domination sur les batteries au lithium-fer-phosphate (LFP) dépasse 98 % (Greitemeier *et al.*, 2025).

De même, la Chine représente 80 % de la fabrication mondiale tout au long de la chaîne de valeur du photovoltaïque solaire, y compris la production de polysilicium, de plaquettes, de cellules et de modules, où sa production est plus du double de sa part dans la demande mondiale (IEA, 2022). Ses entreprises occupent également des positions de premier plan dans les chaînes de valeur mondiales des éoliennes et des véhicules électriques. En 2024, les ventes et investissements chinois dans les technologies propres, notamment dans le solaire, les véhicules électriques et les batteries, se sont élevés à 1,9 milliard USD, représentant 10 % de la croissance économique du pays (Myllyvirta *et al.*, 2025). Cela reflète en partie les efforts de la Chine pour tirer parti de son positionnement en amont afin de renforcer sa compétitivité en aval, avec pour objectif ultime, d'une part, de faire entrer le pays dans une ère d'activité économique à plus forte valeur ajoutée, d'autre part, de dominer les technologies jugées clés pour l'avenir.

Pourtant, malgré ses atouts évidents dans les chaînes d'approvisionnement, la Chine est confrontée à un « paradoxe de vulnérabilité » dans lequel Pékin reste préoccupé par la question de la sécurité des ressources et par les vulnérabilités perçues dans l'accès aux ressources qu'il juge vitales ou stratégiques (Massot, 2024). En effet, conséquence de son rôle en tant que centre manufacturier mondial, la Chine est également le plus grand consommateur de la plupart des minerais. Dans de nombreux cas, y compris pour les métaux de base comme le minerai de fer, le cuivre et le chrome, ainsi que pour le cobalt et le nickel, la production minière domestique a atteint un pic tandis que la demande continue de croître, élargissant le fossé entre production primaire et consommation.

Chine						
Minerais non classés	Minerais avantageux (优势矿种)		Minerais en pénurie (短缺矿种)			
Méthane de houille	Indium	-	Césium	Sel de potassium		
Or	-	-	Chrome	Rhénium		
Molybdène	-	-	Fer	Uranium		
Sélénium	-	-	Gaz naturel	Zirconium		
Gaz de schiste	-	-	Pétrole	-		
Étain	-	-	-	-		
Bore	Antimoine	Terres rares	Aluminium (bauxite)	Manganèse	Arsenic	Scandium
Charbon	Bismuth	Tungstène	Béryllium	Nickel	Barytine	Silicium métallique
Phosphore	Fluorite (spath fluor)	Vanadium	Cobalt	Niobium	Feldspath	Strontium
Titane	Gallium	-	Cuivre	Groupe du platine	Hélium	-
-	Germanium	-	Hafnium	Tantale	Magnésium	-
-	Graphite	-	Lithium	-	Roche phosphatée	-

Union européenne

Tableau 1 : Matières premières critiques et stratégiques pour la Chine et l'Union européenne

(Sources : Seaman, Vidal & Danino-Perraud, 2024 ; Conseil d'État, 2015 ; Commission européenne, 2023 ; Li, 2023 ; Wang, 2022 ; Yan, 2021).

Pour ces minerais et d'autres, comme le lithium, le manganèse, le niobium et les métaux du groupe platine, la dépendance chinoise aux importations dépasse déjà 70 % (Zhai *et al.*, 2021)¹. La Chine dépend ainsi de plus en plus des approvisionnements des ressources étrangères dont les cours sont soumis à des contextes locaux, régionaux et mondiaux sur lesquels l'influence chinoise est limitée, et où elle peut rencontrer une hostilité croissante (Wang *et al.*, 2022). Une part importante de sa diplomatie d'influence "Belt and Road Initiative" (Nouvelles routes de la soie) a ainsi été focalisée sur la sécurisation des approvisionnements en ressources minérales *via* des prises de participation, des contrats de long terme et le développement des infrastructures.

Les penseurs chinois et les stratégies gouvernementales distinguent ainsi souvent les ressources que la Chine considère comme critiques pour le succès de ses objectifs politiques plus larges en deux catégories : les minerais « avantageux » (优势矿种) et les minerais « en pénurie » (短缺矿种).

La Chine cherche à tirer parti de ses avantages

Dans ce contexte mêlant force et vulnérabilité, le président chinois et secrétaire général du Parti communiste (PCC), Xi Jinping, a publié un article structurant en octobre 2020 dans la revue théorique du PCC, *Qiushi*, au plus fort de la pandémie mondiale de Covid-19, du renforcement de la compétition stratégique avec les États-Unis, et d'une prise de conscience plus large de la nécessité de repenser les dépendances, la sécurité économique et les chaînes d'approvisionnement mondiales.

¹ À l'exception du minerai de fer, dont la dépendance aux imports gravite autour de 60 %.

Xi expliquait que la Chine devait « renforcer la dépendance de la chaîne industrielle internationale à l'égard de la Chine et former une forte contre-mesure et une capacité de dissuasion contre les réductions artificielles de l'approvisionnement par des parties étrangères » (Xi, 2020)². En d'autres termes, établir et maintenir des positions dominantes dans les nœuds critiques des chaînes de valeur mondiales constitue un moyen de dissuasion contre les pressions exercées par des puissances étrangères.

En juillet 2023, neuf mois après que les États-Unis ont restreint l'accès de la Chine aux semi-conducteurs avancés et aux technologies associées dans le but d'entraver son développement de l'IA à des fins militaires, Pékin a commencé à mettre en œuvre son propre régime de contrôle des exportations à « usage dual », destiné à limiter la vente de diverses matières premières critiques et de leurs produits dérivés.

À partir des chaînes de valeur du gallium et du germanium, les restrictions imposées par le ministère du Commerce se sont ensuite étendues au graphite, à l'antimoine, au tungstène, au tellure, au bismuth, à l'indium, au molybdène et à sept terres rares, dont le néodyme, le dysprosium, le terbium et le samarium. En mai 2025, les exigences de licence d'exportation à usage dual de la Chine concernaient 240 lignes de produits, couvrant les matières premières, les produits chimiques et les biens intermédiaires tels que les aimants permanents en terres rares (Wubbeke et Catarata, 2025).

En plus des exportations de biens, la Chine a également imposé des restrictions à l'exportation de technologies de transformation – par exemple pour l'extraction du lithium, la production de batteries LFP et la production

² Citation originale : 拉紧国际产业链对我国的依存关系·形成对外方人为断供的强有力反制和威慑能力。

de matériaux « ultra-durs » – ainsi qu’une interdiction en décembre 2023 de l’exportation des technologies de transformation des terres rares (Anderson, 2025 ; Liu et Patton, 2023).

Le régime de licences d’exportation exploite deux caractéristiques importantes des chaînes d’approvisionnement complexes et interdépendantes : les effets de goulots d’étranglement (*chokepoint effects*) et les effets de panoptique (*panopticon effects*) (Ferrell et Newman, 2019).

D’abord, il permet à la Chine de limiter l’accès à des matériaux et technologies vitaux, afin d’atteindre des objectifs politiques, économiques et stratégiques plus larges. Déjà, les licences d’exportation ont été utilisées pour faire pression sur l’Union européenne concernant les droits compensateurs imposés par le bloc sur les véhicules électriques et autres produits chinois, ainsi que sur l’alignement européen aux mesures de contrôle des exportations américaines (Barkin 2025). Alors que l’Europe s’apprête à investir massivement dans son secteur de défense pour faire face aux menaces immédiates, notamment de la Russie, et qu’elle réfléchit à l’avenir de son alliance avec les États-Unis, la Chine peut exploiter sa position dans les chaînes d’approvisionnement pour obtenir des concessions. Elle pourrait également s’en servir pour limiter le soutien européen à Taiwan, en particulier en cas de conflit armé.

Les effets de goulots d’étranglement servent aussi à renforcer la compétitivité relative des produits chinois en aval, en assurant que les entreprises chinoises conservent des approvisionnements stables en matières premières et biens intermédiaires par rapport à leurs concurrents étrangers. En pratique, les entreprises non chinoises qui dépendent des matières premières, produits chimiques ou biens intermédiaires chinois seront confrontées à un risque supplémentaire, ce qui rendra les produits en aval chinois (moteurs électriques, batteries, véhicules électriques...) plus sûrs et plus attractifs.

Au-delà des effets de goulots d’étranglement, le régime de licences exige que les exportateurs potentiels fournissent des informations détaillées sur les chaînes de valeur et les marchés en aval. Le régime d’exportation à double usage chinois, comme aux États-Unis, en Europe ou ailleurs, vise à empêcher l’exportation de biens pouvant nuire à la sécurité nationale. Il impose ainsi aux exportateurs de préciser l’utilisation prévue des biens exportés, y compris les détails des produits, des acheteurs et des utilisateurs finaux (Interesse, 2024). Les autorités chinoises pourront dès lors établir une cartographie détaillée des chaînes de valeur en aval grâce au processus de licences, qui pourra être utilisée pour concevoir plus précisément de futures restrictions à l’exportation et leur permettre d’atteindre de manière plus efficace et ciblée leurs objectifs politiques.

Une réponse européenne compliquée par la Chine

Naturellement, les restrictions d’exportations chinoises ont accéléré les efforts de diversification étrangère. Toutefois, le succès de ces efforts dépend de la capacité à répondre à au moins deux avantages distincts découlant de la position de marché de la Chine.

Le premier est la capacité de la Chine à influencer l’offre et à affecter les prix, ce qui accroît la volatilité du marché et impacte finalement la solvabilité des acteurs non chinois, remettant en question leur capacité à obtenir des financements pour développer de nouvelles productions. La Chine a la réputation de produire et vendre à des prix bien inférieurs à ceux de ses concurrents mondiaux. Bien que les mesures de contrôle des exportations aient conduit à des pénuries aiguës, Pékin pourrait tout aussi bien inverser sa stratégie et inonder les marchés mondiaux si elle estime que les menaces à sa domination compromettent ses intérêts plus larges. La chute récente des cours de certains métaux critiques est ainsi tout autant liée à l’instabilité de la demande qu’à une action volontariste de la Chine pour rendre déficitaire les projets de diversification des pays occidentaux.

En raison de la position dominante de la Chine, et parce que les chaînes de valeur des minerais critiques associés servent en définitive les objectifs politiques de Pékin, les efforts de diversification doivent reconnaître que le libre fonctionnement des marchés pour les minerais considérés comme critiques ou stratégiques est voué à l’échec. Les pays du G7, l’UE et l’Australie commencent déjà à se pencher dans ce sens, en considérant par exemple l’adoption d’un prix plancher pour certaines terres rares afin de soutenir la production non chinoise (Payne et Rajagopal, 2025). Des mesures visant à maîtriser l’importation de produits chinois sont aussi à l’étude, comme des obligations d’achat avec des règles d’origine européenne, mais se heurtent aux règles proscrites par l’OMC et risquent des frictions avec d’autres pays producteurs et partenaires diplomatiques. L’adoption de mesures plus générales et indirectes, comme le respect de normes environnementales, visent aussi et en partie la diversification des approvisionnements, mais la capacité des entreprises chinoises à respecter ces critères risque de rendre les mesures moins efficaces sur le plan de la diversification à terme.

Deuxièmement, les vulnérabilités perçues par la Chine dans les chaînes d’approvisionnement en matières premières l’incitent à investir de manière proactive et massive dans les industries extractives à l’étranger. En effet, les investissements chinois dans les métaux et l’exploitation minière à l’étranger ont atteint un record national en 2024, avec plus de 20 milliards USD injectés dans l’exploration et la transformation à l’étranger. Rien qu’au premier semestre 2025, le montant était déjà supérieur, atteignant 24,9 milliards USD (Nedopil, 2025).

La disponibilité du crédit constitue un avantage notable pour les entreprises chinoises investissant dans le secteur minier à l’étranger, les banques politiques et commerciales chinoises ayant fourni plus de 57 milliards USD aux entreprises chinoises pour les « métaux de transition » au cours des dernières décennies (Escobar *et al.*, 2025).

En même temps, comme le soulignent Lapi *et al.* (2025), deux tiers des investissements étrangers chinois, mobilisés par exemple dans le cadre d’initiatives telles que les Nouvelles routes de la soie, et qui, selon certaines estimations, dépassent les 2 milliards USD depuis 2005, ciblent des infrastructures énergétiques et de transport en plus des secteurs des métaux et de l’exploitation minière. Pour de nombreux pays

producteurs de minerais, un tel engagement rend Pékin indispensable à leurs propres objectifs nationaux de développement.

En définitive, si l'Europe veut réussir à bâtir des partenariats mondiaux pour renforcer la résilience de ses chaînes d'approvisionnement, elle devra dépasser une politique qui reste largement déclaratoire, et s'engager de manière plus ciblée, mais conséquente, avec des partenaires selon leurs intérêts stratégiques propres (cf. "The current state of the European Union's dependency and its policies", pp. 42-46).

Bibliographie

- ANDERSON M. (2025), "China Tightens Grip on EV Battery Tech with New Export Controls", Battery Technology Online, 15 juillet.
- BARKIN N. (2025), "Watching China in Europe – June 2025", Insights, German Marshall Fund of the United States, juin.
- BENCHMARK MINERALS (2025), "The evolution of China's upstream supply chain dominance", Benchmark Source, 11 juillet.
- COMMISSION EUROPEENNE (2023), Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report.
- CONSEIL D'ÉTAT DE LA REPUBLIQUE POPULAIRE DE CHINE (2015), 全国矿产资源规划 (2016-2020 年) [Plan national des ressources minérales (2016-2020)].
- ECONOMY E. & LEVI M. (2014), *By All Means Necessary: How China's Resource Quest is Changing the World*, Oxford University Press.
- ESCOBAR B. *et al.* (2025), *Power Playbook: Beijing's Bid to Secure Overseas Transition Metals*, Williamsburg, VA: AidData at William & Mary.
- FARRELL H. & NEWMAN A. (2019), "Weaponized interdependence: How global economic networks shape state coercion", *International Security*, 44(1), pp. 42-79.
- GREITEMEIER T., KAMPKER A., TÜBEKE J. & LUX L. (2025), "China's hold on the lithium-ion battery supply chain: Prospects for competitive growth and sovereign control", *Journal of Power Sources Advances*, Vol. 32, avril.
- HUMPHREYS D. (2015), *The Remaking of the Mining Industry*, Palgrave Macmillan.
- IEA (2024), EV Battery Supply Chain Sustainability, IEA, Paris.
- INTERESSE G. (2024), "China issues new export control regulations: What businesses need to know?", China Briefing, 19 novembre.
- LI J., LI T., JIA H. & WANG A. (2023), "中国战略性关键矿产目录厘定" [« Détermination de la liste des minerais stratégiques et critiques pour la Chine »], *地球学报 Acta Geoscientica Sinica*, mars, 44(2), pp. 261-270.
- LIU S. & PATTON D. (2023), "China bans export of rare earths processing tech over national security", Reuters, 22 décembre.
- MASSOT, P. (2024), *China's Vulnerability Paradox: How the World's Largest Consumer Transformed Global Commodity Markets*, Oxford University Press.
- MYLLYVIRTA L., QIN Q. & QIU C. (2025), "Analysis: Clean energy contributed a record 10% of China's GDP in 2024", Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA), 19 février.
- NEDOPILOVIC C. (2025), China Belt and Road Initiative (BRI) Investment Report 2025, Griffith Asia Institute and Green Finance & Development Center, FISF, juillet.
- PAYNE J. & RAJAGOPAL D. (2025), "G7 weighs price floors for rare earths to counter China's dominance, sources say", Reuters, 25 septembre.
- SEAMAN J., VIDAL F., & DANINO-PERRAUD R. (2024), "Critical Raw Materials: What Chinese Dependencies, What European Strengths?", in RÜHLIG T.(éd.), *Reverse Dependency: Making Europe's Digital Technological Strengths Indispensable to China*, Digital Power China, mai.
- SEAMAN J. (2025), "Critical raw materials, economic statecraft and Europe's dependence on China", *International Spectator*, 60(2), juin, pp. 20-37.
- SMITH B. J. *et al.* (2022), "Rare earth permanent magnets: Supply chain deep dive assessment", Technical Report, U.S. Department of Energy, 23 février.
- USGS (2025), Mineral Commodity Summaries, United States Geological Survey.
- WANG J., YANG L., LIN J. & BENTLEY Y. (2020), "The availability of critical minerals for China's renewable energy development: An analysis of physical supply", *Natural Resources Research*, 29(4), août.
- WANG A. & YUAN X. (2022), "大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考 [« Réflexions sur la sécurité des ressources minérales stratégiques clés de la Chine dans le contexte de la concurrence entre grandes puissances »]", China Development Portal, 2 décembre.
- WÜBBEKE J. & CATARATA M. (2025), "Chokepoint politics: China's export controls in the era of great power rivalry", Sinolytics.
- XI J. (2020), « 国家中长期经济社会发展战略若干重大问题 » [« Plusieurs enjeux majeurs concernant la stratégie nationale de développement économique et social à moyen et long terme »], Qiushi, 21 octobre.
- YAN W., WANG Z., CAO H., ZHANG Y. & SUN Z. (2021), "Criticality assessment of metal resources in China", *iScience*, 24, juin.
- ZHAI M. *et al.* (2021), "Mineral resource science in China: Review and perspective", *Geography and Sustainability*, 2, pp. 107-114.

Le rôle de la course aux métaux stratégiques dans les conflits actuels

Marc-Antoine EYL-MAZZEGA

Directeur du Centre énergie et climat de l'Ifri

Les métaux critiques font l'objet de rivalités telles qu'il faut se préparer à ce que les rapports de force pour leur contrôle se transforment en conflits armés, déstabilisant potentiellement des régions, voire États. Les cas de la République démocratique du Congo, ou de la Birmanie, sont symptomatiques de ces évolutions. À terme, les risques pèsent aussi sur les chaînes de valeur plus larges liées aux métaux, et notamment le segment de la logistique, qui est essentiel et représente un point de vulnérabilité majeur potentiellement exploitable par le crime organisé, des organisations armées et / ou des États.

Le rapport entre les métaux et les conflits a jusqu'à présent été largement dominé par la problématique de la gestion des métaux provenant de zones de conflit, c'est-à-dire de la gouvernance des chaînes de valeur pour éviter que ces métaux qui alimentent généralement financièrement ces conflits et sont produits dans des conditions souvent inhumaines ne se retrouvent dans les chaînes de valeur occidentales, transformant l'acheteur ou consommateur occidental en complice indirect de crimes de guerre par exemple. À l'image des diamants de sang, des règles de traçabilité, certification et de bonne conduite ont été établies au début des années 2000 sous l'égide du processus de Kimberley, rassemblant, notamment, De Beers, des gouvernements et ONG, à la suite des scandales liés à la Sierra Leone ou à l'Angola. L'OCDE joue aussi un rôle clé dans l'élaboration et la mise en œuvre de bonnes pratiques qui sont devenues des standards pour les industries occidentales (Guide OCDE sur le devoir de diligence pour des chaînes d'approvisionnement responsables en minerais provenant de zones de conflit ou à haut risque¹).

Les métaux ont déjà joué un rôle majeur dans l'histoire des conflits passés, car sans métaux, pas de canons, pas de financements, et pas de technologies avancées. On peut rappeler ici les efforts allemands pour sécuriser des approvisionnements en minerais de fer norvégiens ou suédois pendant la Seconde Guerre mondiale ; l'effort britannique sans précédent de recyclage pour tenir lors de la bataille de l'Atlantique ; la création de la Communauté européenne du charbon et de l'acier en 1951 ; les relations étroites entre les pays occidentaux et l'Afrique du sud, la Guinée-Conakry ou le Zaïre

pendant la guerre froide ; ou encore les efforts occidentaux pour sécuriser des ressources en uranium dans des pays africains.

Si la géopolitique des matières premières a été largement dominée depuis la Seconde Guerre mondiale par les rivalités autour du contrôle, de l'exploitation et du commerce des hydrocarbures, une géopolitique des métaux s'esquisse et s'aiguise désormais, avec des rapports de force de plus en plus explicites et la mise en œuvre d'outils de puissance. La Chine arsenalise à nouveau depuis 2022, à une échelle sans précédent, la dépendance de nombreux pays et entreprises à ses fournitures de métaux et produits raffinés, en particulier pour les industries de défense américaines, mais aussi les métaux utiles aux technologies numériques ou décarbonées. En réaction, à l'instar du Japon et de la Corée du sud qui ont développé des politiques de sécurité minérale depuis plus de quinze ans (stocks stratégiques, investissements miniers à l'étranger), l'Union européenne et les États-Unis déploient des stratégies pour diversifier leurs approvisionnements et sécuriser leurs chaînes de valeur minérales, et le G7 s'est aussi emparé du sujet. L'enjeu est triple : développer la production minière intérieure partout où c'est possible, les administrations américaines allant jusqu'à mettre en place des tarifs d'importation sur le cuivre ou le graphite pour encourager la production intérieure, ou jusqu'à soutenir financièrement des acteurs miniers ; soutenir des chaînes de production et raffinage diversifiées et responsables, notamment via des normes communes ; renforcer le recyclage et les sources d'approvisionnement secondaires, car, à la différence des hydrocarbures, les métaux peuvent être recyclés et réutilisés dans de larges proportions ; et promouvoir des chimies alternatives pour réduire les vulnérabilités trop concentrées.

¹ https://www.oecd.org/fr/publications/guide-ocde-sur-le-devoir-de-diligence-pour-des-chaines-d-approvisionnement-responsables-en-minerais-provenant-de-zones-de-conflit-ou-a-haut-risque_9789264253520-fr.html

Le constat général est celui d'une montée des confrontations autour des métaux stratégiques :

- avec les transitions énergétique et digitale, le réarmement mondial et la croissance économique, les besoins augmentent souvent plus rapidement que la production ;
- la Chine a construit au cours des vingt dernières années des positions oligopolistiques, voire monopolistiques, dans la fourniture de différents métaux clés et est en mesure non seulement d'impacter les volumes disponibles pour les marchés mais aussi les prix ;
- de nombreux États dans le monde détenteurs de ressources cherchent à ne pas être de simples extracteurs de ressources, mais à localiser une part croissante de la valeur ajoutée pour soutenir le développement industriel et économique local, et n'hésitent pas à susciter des convoitises pour maximiser leurs gains ;
- certains pays détenteurs de ressources ont des systèmes politiques non démocratiques, ou un environnement institutionnel et réglementaire faible et instable propice à la prédation des ressources ;
- les conditions d'investissement dans le secteur des métaux se dégradent, avec des taux d'intérêt élevés, les restrictions liées à la taxonomie verte, les incertitudes sur les rythmes de développement de la demande, les risques économiques et politiques, et l'attrait pour des métaux non stratégiques², comme l'or, entre autres ;
- de nouveaux acteurs prennent rapidement des positions majeures et disruptives dans les marchés des métaux, comme les pays du Golfe et leurs différents véhicules d'action, les maisons de négoce, ou des entreprises publiques liées à des États comme la Chine ;
- enfin, le monde semble progressivement tourner la page des règles multilatérales sur le commerce libre et ouvert, sur le respect des frontières et souverainetés et règles de la Charte des Nations unies. Ce monde multipolaire comporte des éléments de retour aux sphères d'influence, au droit du plus fort, aux subventions généralisées, aux barrières protectionnistes directes et indirectes, et à la confrontation géopolitique et géoéconomique.

Les métaux sont désormais un élément central de ce nouvel environnement extrêmement dégradé et incertain, où la confrontation, plutôt que la coopération, prend le dessus. Dans cet article, nous entendons évaluer le rôle des métaux dans certains conflits actuels, évaluer la politique américaine et déterminer quelles perspectives de conflits l'on pourrait envisager à l'avenir.

Au-delà des confrontations géoéconomiques, les conflits actuels comportent tous une dimension liée aux métaux

L'invasion par la Russie de l'Ukraine a non seulement marqué le retour de la guerre de haute intensité au cœur de l'Europe, provoqué une crise énergétique majeure en Europe, mais a aussi comporté une dimension majeure liée aux métaux : la Russie est non seulement un des plus grands exportateurs de pétrole et de gaz au monde, mais aussi, et dans une moindre mesure, de charbon pour les centrales électriques et certains fours industriels, d'aluminium pour l'industrie et l'industrie agro-alimentaire, d'éponges de titane pour l'aviation, de combustibles nucléaires, notamment, pour les centrales de technologie soviétique, d'or, de diamants, de platinoïdes pour l'industrie automobile, de nickel pour l'industrie de l'acier ou des batteries, de minerais de fer pour l'acier, et de cobalt, qui a des applications civiles et militaires. L'Ukraine envahie était un producteur significatif de gaz, mais aussi de charbon, de minerais de fer, de titane, et détient, notamment, des réserves de gaz, lithium et uranium. L'invasion russe a bouleversé les chaînes de valeur des métaux, nourrissant une grande volatilité sur les prix, les matières premières et métaux russes exportés vers l'Europe étant progressivement réorientés vers la Chine, sous l'œil préoccupé de l'Inde, qui voit d'un mauvais œil l'approfondissement de ce partenariat économique au profit de son grand rival chinois, qui bénéficie de prix avantageux.

Autre conflit majeur actuel qui comporte une dimension liée aux métaux : la guerre du Kivu, où s'affrontent *de facto* depuis trente ans le Rwanda et la République démocratique du Congo (RDC), à travers différents groupes armés, principalement le M23. Le Rwanda est devenu ces dernières années un grand exportateur de coltan et d'or, alors que le pays dispose de faibles réserves, la production du Kivu étant exportée par le Rwanda, *via* des intermédiaires de ce pays, vers les marchés mondiaux, en particulier vers le Qatar, qui est devenu le premier partenaire commercial du Rwanda. Les autorités de Kinshasa ont dénoncé l'agression rwandaise pour piller les ressources du pays. Le conflit a fait des centaines de milliers de morts et de déplacés, et a été permis par la faiblesse de l'État congolais et des infrastructures quasi inexistantes dans le pays.

Moins médiatisée, la rébellion qui a lieu en Birmanie comporte aussi une dimension majeure liée aux métaux. La Chine y a largement développé, dans des conditions environnementales déplorables, l'extraction de terres rares lourdes au cours des dernières années, jusqu'à ce que la junte birmane soit affaiblie au point de ne pas pouvoir contrer un mouvement rebelle autonomiste (Kachin Independence Army - KIA) qui s'est emparé des zones de production, forçant temporairement l'arrêt de la production et des exportations vers la Chine. Celles-ci ont finalement repris, les rebelles ayant besoin de revenus. La Chine cherche manifestement à endiguer le conflit et fait pression sur les deux camps pour préserver ses intérêts, et soutiendrait aussi

²L'UE a défini une liste de matières premières stratégiques et critiques dans son règlement du 11 avril 2024 (annexes I et II du règlement : https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401252).

d'autres factions, comme la United Wa State Army, pour développer de nouveaux gisements dans l'Est du pays. La Chine est aussi très impliquée dans des projets miniers dans deux autres pays en conflit, l'Afghanistan et la RDC, et déploie déjà des compagnies de sécurité privée mais liées aux organes sécuritaires chinois pour protéger ses actifs, notamment miniers, en Asie centrale, Birmanie ou RDC.

Notons enfin que non seulement des acteurs français (Orano), mais aussi étrangers, notamment chinois, canadiens ou américains, ont été victimes des putschs au Sahel qui ont vu l'arrivée de gouvernements militaires isolés remettant en cause les règles et accords miniers pour s'accaparer les gisements, quitte à remettre en cause l'avenir de leurs pays à moyen terme. Les actifs d'Orano ont été expropriés au Niger, provoquant l'ouverture d'un contentieux arbitral, et d'autres acteurs comme Barrick Gold subissent des graves entraves comme au Mali. Dans tous ces pays planent aussi l'ombre d'acteurs russes, notamment les structures anciennement liées au groupe Wagner, spécialisé dans l'extraction d'or.

Les chaînes de valeur des métaux sont aussi exposées aux enjeux du commerce maritime, et des vulnérabilités liées aux détroits. Ainsi, la quasi-fermeture par les Houthis du Canal de Suez a provoqué des complications logistiques majeures pour cette industrie, qui dépend beaucoup du transport maritime. Auparavant, le blocage du canal de Suez par le cargo échoué Evergreen avait aussi fortement impacté certains flux logistiques.

Au-delà des conflits ouverts, c'est aussi la faiblesse institutionnelle et économique des pays qui impacte les chaînes de valeur des métaux. Ainsi, les crises électriques à répétition en Afrique du Sud liées à la faible gouvernance, à l'emprise du crime organisé et de la corruption, ont impacté à la baisse la production minière de ce pays et augmentent les coûts logistiques pour évacuer les productions vers les marchés. La faiblesse des réseaux et infrastructures en RDC y complique considérablement l'extraction du cuivre et son transport.

Un nouveau paradigme interventionniste américain ?

La première administration Trump avait amorcé une politique de sécurité minérale aux États-Unis visant à réduire la dépendance à la Chine. Cette stratégie avait été poursuivie sous la présidence Biden, et a été réaffirmée par la nouvelle administration Trump. Les principaux vecteurs sont les suivants : réglementation sur les entités étrangères à risque (*foreign entities of concern*), qui limite les subventions et activités de tels acteurs aux États-Unis ; crédits pour l'ouverture de mines ; tarifs de rachat garantis à des niveaux supérieurs aux prix de marché ; facilitation des permis et autorisations ; et, à l'extérieur, soutien diplomatique à des acteurs non chinois (pas forcément américains), soutien financier via l'US Development Finance Corporation ou des fonds spécialisés comme TechMet qui peuvent faire des prêts,

octroyer des garanties ou prendre des participations. Cet arsenal est déjà largement mobilisé, mais trois positionnements du président Trump ont défrayé la chronique, car ils marquent une rupture complète avec le jeu traditionnel des intérêts et alliances des États-Unis, et posent de sérieuses questions sur le respect du droit international : la volonté exprimée d'annexer le Canada et le Groenland, et l'accord sur les minerais avec l'Ukraine. Il faut tenter de démêler ce qui relève de la communication politique, de l'hubris individuel, et de l'action stratégique.

Il est clair que la sécurité énergétique et minérale des États-Unis dépend en partie du Canada, grand producteur, notamment, d'aluminium, de pétrole, de gaz, et d'uranium. Mais le Canada est un pays voisin, allié et ami, où pratiquement aucune barrière n'existe à l'investissement et au commerce pour des acteurs américains. On voit mal comment une telle annexion pourrait améliorer la sécurité minérale américaine. Au contraire, ces velléités ont entraîné un sursaut nationaliste au Canada, une sanction dans les urnes des conservateurs populistes, et provoqué un mouvement de rapprochement entre le Canada et les Européens, notamment.

Avec le Groenland, la lubie de l'administration Trump n'est pas nouvelle au sens où ce territoire a, pendant la guerre froide et jusqu'à nos jours, toujours joué un rôle militaire stratégique, à la fois dans la lutte anti-sous-marine, anti-missile (radars avancés notamment), et pour contrôler les activités russes ou chinoises dans le Grand Nord. Donald Trump avait déjà porté son attention sur ce territoire lors de son premier mandat. Riche en minerais et terres rares et ayant une population très faible, ce territoire sous souveraineté danoise est une proie facile. Mais si l'armée américaine annexait ce territoire, quel serait le gain escompté ? Les États-Unis y disposent déjà d'emprises militaires majeures. Des acteurs miniers qui voudraient y développer des activités seraient confrontés à l'hostilité des populations locales et potentiellement à des sanctions européennes. Enfin, si les États-Unis pourraient éventuellement dans plusieurs années y extraire des matières, dans des conditions climatiques difficiles, il leur faudra acquérir la pleine maîtrise industrielle du raffinage de ces matières, qui n'est à ce stade pas systématiquement acquise.

Avec l'Ukraine, la situation est sans doute la plus sérieuse et problématique. L'administration Trump a plusieurs fois remanié ses demandes, voulant de toute évidence montrer à son électorat que le temps où les États-Unis paient et donnent sans rien recevoir est révolu. Il y a une intention de certains décideurs américains d'imposer des investissements à des conditions déséquilibrées dans le secteur minier et d'imposer un cede de prédation de l'économie ukrainienne. Mais tous ces éventuels projets prendront des années à être développés, et il n'y a pas encore de clarté sur quels métaux sont privilégiés, par quels acteurs, avec quels moyens et dans quelles conditions.

L'administration américaine a été bien plus stratégique dans son action en RDC. Elle y a joué un rôle majeur pour forcer les parties en conflit à élaborer un processus mettant fin aux hostilités et ouvrant un chemin vers un

accord de paix, évinçant les Européens et surplânt les efforts largement salués de médiation de l'Angola. La RDC a opéré ces dernières années un repositionnement pour réduire sa dépendance à la Chine et tenter d'attirer des capitaux et un soutien politique américain et européen. Elle a même renforcé sa stratégie de pression contre les acteurs chinois, forcés de renoncer à une acquisition minière majeure (les actifs de Chemaf convoités par Norin Mining), de renégocier un contrat minier, et privés de cobalt à la suite de la mise en œuvre de restrictions fermes aux exportations pour faire remonter les prix.

Reste à voir comment les États-Unis vont gérer les enjeux miniers en Amérique latine, sachant que l'administration Trump a déjà mis à mal les relations avec le Brésil, grand producteur de la région, mais entretient de bonnes relations avec l'Argentine ou le Panama.

En Afrique, l'administration semble vouloir poursuivre son soutien au corridor ferroviaire de Lobito, traversant l'Angola. Dans un contexte de confrontation géoéconomique et géopolitique maximale entre les États-Unis et la Chine, il est intéressant de noter qu'il y a quand-même des coopérations majeures entre industriels. Ainsi, en Afrique, deux grands projets miniers sont menés par des consortiums rassemblant des acteurs chinois et occidentaux. En Guinée-Conakry, Rio Tinto, le conglomérat australien très lié aux capitaux américains, développe un projet de minerais de fer de plus de 30 milliards de \$ d'investissements avec des partenaires chinois. En RDC, la société Ivanhoe Mining, dont le siège est à Vancouver et dont le charismatique PDG Robert Friedland est proche de Donald Trump, développe l'un des plus importants gisements de cuivre du monde avec un partenaire chinois, Zijin Mining Group Co, sachant que Ivanhoe est détenue à plus de 30 % par des acteurs chinois. Autre paradoxe de cette confrontation, le champion américain des terres rares MP Materials, fer de lance de la stratégie américaine de réduction de la dépendance à la Chine en exploitant la mine de Mountain Pass (Californie), est détenu à 8,4 % par le chinois Shenghe Resources. Cela montre bien qu'au-delà de la grande géopolitique minière, les intérêts industriels et financiers sont parfois entremêlés.

Perspectives

La conflictualité autour du contrôle des chaînes de valeur des métaux se renforce. On ne peut exclure d'assister à terme à des interventions militaires extérieures, le cas échéant sous drapeau tiers, dans des pays pour y contrôler l'accès aux métaux, ou défaire des positions occupées par d'autres, ou encore encourager des scissions territoriales. Il est difficile de faire une liste exhaustive tant les situations évoluent rapidement, mais on compte, notamment, parmi les pays potentiellement concernés la Mongolie, le Kazakhstan et ses voisins, la RDC, la Namibie ou certains pays d'Amérique latine. Le cas spécifique du Groenland doit être également pris au sérieux.

À l'avenir, les conflits liés aux métaux pourraient s'élargir aux fonds marins, en posant la question de la délimitation des frontières maritimes et des dommages

environnementaux potentiellement liés à l'extraction minière en eau profonde telle que l'envisagent certains pays et acteurs, dont les États-Unis. Les conflits pourront aussi porter sur les chaînes logistiques de l'industrie minière (chemins de fer, ports et sites de stockage et raffinage) et l'accès aux infrastructures de production électrique qui alimentent les mines, ainsi qu'à l'eau, qui est indispensable pour de nombreux processus industriels.

Enfin, l'explosion des cours de l'or devrait susciter aussi beaucoup d'instabilité ces prochaines années, notamment en Afrique subsaharienne et en Amérique latine.

L'intelligence minérale au service d'une meilleure connaissance des chaînes de valeur

Par Stéphane BOURG

Directeur de l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI)

Dans la course mondiale aux métaux critiques, indispensables à l'énergie, au numérique, à l'aéronautique ou encore à la défense, les chaînes de valeur apparaissent comme un maillon fragile de notre souveraineté. Fragmentées, mondialisées et interconnectées, elles exposent l'Europe à des dépendances multiples, qu'il s'agisse de ressources minières, de technologies de transformation ou de marchés opaques. Face à ces vulnérabilités, les observatoires nationaux et européens émergent comme de véritables vigies. Leur rôle : analyser les risques, identifier les maillons faibles et proposer des leviers d'action. En France, l'OFREMI (pour l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles) incarne ce nouveau modèle de coopération public-privé, où industriels et pouvoirs publics croisent données, expertises et méthodes innovantes pour anticiper les chocs. Dans un contexte géopolitique tendu, cette intelligence collective devient un outil de résilience incontournable.

Introduction

Énergie, communication, aéronautique, défense reposent sur des métaux critiques, parfois en quantité infime, mais indispensables, dépendant de chaînes de valeur complexes, mondialisées et interconnectées. Résilience et souveraineté reposent sur une maîtrise des risques pesant sur ces chaînes de valeur, et l'identification des risques et des possibilités d'atténuation ou de remédiation à court, moyen ou long termes.

Cette maîtrise repose, quant à elle, sur une combinaison de compétences techniques (géologie, minéralurgie, métallurgie extractive, raffinage et transformation des métaux, recyclage, économie, organisation des marchés, géopolitique) et méthodologiques (analyses de filières, analyses de criticité et de risques). Elle requiert de constantes interactions entre les acteurs publics et privés. C'est là que les observatoires comme l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI) en France, le DERA en Allemagne, le NMO aux Pays-Bas ou le JOGMEC au Japon prennent toutes leurs dimensions.

La globalisation des chaînes de valeur demande aussi une collaboration accrue entre États et entre observatoires afin de faire émerger des solutions transverses où synergie fait plus sens que concurrence.

Après avoir remis en perspective le contexte auquel nous faisons face pour nos approvisionnements, et pointé les enjeux des marchés, nous reviendrons sur le rôle prépondérant des observatoires pour mettre l'ensemble des parties prenantes en capacité de prendre les meilleures décisions.

Contexte et enjeux

Des chaînes de valeur souvent globalisées et imbriquées

Hors Chine qui domine ce concept, l'intégration verticale des chaînes de valeur est très rare, vu qu'il est difficile de concentrer au sein d'un même territoire ressources minérales, compétences humaines, moyens techniques et conditions économiques nécessaires.

Les ressources minérales ne sont pas réparties aléatoirement autour du globe et la situation spécifique à chaque pays ne rend pas leur extraction toujours viable. Le traitement des concentrés miniers est en effet très énergivore, consomme beaucoup d'eau, nécessite une expertise spécifique et une main-d'œuvre qualifiée. Tous les pays ne sont pas égaux sur l'accès à l'énergie, à l'eau, à une main-d'œuvre bon marché, et malheureusement sur le respect des standards environnementaux, sociaux ou de gouvernance (ESG). Bien que la situation évolue, il est toujours plus rentable d'installer une usine dans des pays peu regardants sur les critères ESG, au bénéfice de leur économie locale.

Les étapes de milieu de chaîne, permettant d'aboutir à des produits semi-finis de plus forte valeur ajoutée, nécessitent la maîtrise d'outils et de compétences spécifiques qu'on ne trouve pas dans les pays miniers. Japon, Corée du Sud, Asie du Sud-Est, États-Unis et, dans une moindre mesure, Europe, sont positionnés tout en restant souvent minoritaires par rapport à la Chine. Il est toutefois capital que ces pays développent tous les maillons d'une chaîne de valeur permettant de disposer

d'un produit¹. Dans le cas des semi-conducteurs par exemple, Taïwan supplante la Chine, tout en dépendant d'elle pour le gallium et de l'Europe pour les machines de gravure micro-lithographique, et la Chine dépend de Taiwan pour la fourniture de semi-conducteurs...

Enfin, les industries aval n'ont pas forcément une bonne perception des risques et des dépendances réelles. Une diversification des approvisionnements aux niveaux N-1, N-2, N-3 peut donner l'illusion d'une résilience, souvent réelle en milieu de chaîne, alors que les premiers maillons seront les mêmes.

Des risques multiples à chaque étape de transformation

Si les risques liés aux approvisionnements sont bien identifiés par les industriels et traités à bon niveau par les États, ceux inhérents aux outils de transformation sont souvent mal (re)connus. La transformation des matières premières requiert des technologies évoluées, dont la propriété intellectuelle est souvent en Chine. Les dernières décisions du ministère du Commerce chinois le montrent : les contrôles à l'export ne ciblent plus les matières premières, mais aussi les technologies permettant de raffiner et transformer les matières en matériaux avancés comme pour le lithium ou les terres rares.

Ces risques croisés se manifestent aujourd'hui dans les deux sens. Quand ASML refuse de vendre à la Chine sa dernière génération de machine micro-lithographique pour semi-conducteurs, la Chine nous prive de gallium (Mining Review Africa, 2023), et quand nous développons des productions alternatives de terres rares ou de lithium, la Chine menace de nous priver des technologies qui nous permettraient de les valoriser dans les batteries ou les aimants (SMM, 2025).

Ainsi, la maîtrise des technologies et les dépendances qui en découlent forment aujourd'hui l'éléphant dans la pièce qu'il est beaucoup plus difficile de bouger que les sites de production ou de raffinage des matières premières.

Le rôle des marchés

Certaines matières premières se négocient sur des marchés organisés (bourses). Leur prix est fixé par le marché mondial, en principe sur la base de l'offre et de la demande. C'est le cas du cuivre ou de l'aluminium. Les marchés sont gérés par des courtiers et des *traders*. Le London Market Exchange à Londres, le CME à Chicago ou le SHFE à Shanghai sont là pour apporter une stabilité (parfois relative) aux prix de ces matières grâce à la gestion de stocks physiques.

Mais nombre de matières, notamment critiques, ne sont pas assez « liquides » pour ce type de gestion (en d'autres termes, il n'y a pas suffisamment d'acteurs et d'opérations pour permettre à la concurrence de jouer son rôle). Les achats se font alors en direct entre producteurs et consommateurs sur des bases

confidentielles. Des consultants se risquent toutefois à publier des cours donnant les orientations des marchés, cours qui peuvent être fortement déconnectés de la réalité des prix pratiqués lors des échanges commerciaux, conduisant à des incompréhensions des clients finaux, voire à des sur-réactions en cas de perturbation.

Pour analyser les chaînes de valeur, il est donc indispensable d'échanger avec les bourses, les *traders* et les consultants, mais aussi d'avoir accès à un réseau plus large d'acteurs à même de fournir une image complète des marchés.

Le rôle des observatoires

Devant les complexités des chaînes de valeur, rappelées ci-dessus, il est capital de bâtir une expertise spécifique en soutien aux décisions des industriels et des États sur la sécurisation des approvisionnements.

Si historiquement l'USGS (US Geological Survey) aux États-Unis et le JOGMEC (Japan Oil, Gas and Metals National Corporation) au Japon ont inclus dans leur stratégie d'analyse des approvisionnements, ce fut pendant longtemps limité aux premières étapes d'extraction et de raffinage. L'USGS publie le "Mineral Yearbook" depuis 1933, les "Historical Global Statistics for Mineral and Material Commodities" depuis 1990 et les «Mineral Commodity Summaries» sous leur forme actuelle depuis 1996. Le JOGMEC, créé en 2004 sur les bases de la Metal Mining Agency of Japan (MMAJ), a peu vocation à publier. Il alimente le gouvernement japonais et l'industrie en analyses confidentielles autour de la criticité des matières premières. Il a aussi un rôle unique d'investisseur dans des projets d'exploration minière, et est en charge de la gestion d'un stock stratégique de matières premières pour l'industrie japonaise depuis 1983 (alors MMAJ).

À la suite de la crise des terres rares de 2010, l'Allemagne a créé le DERA au sein du service géologique fédéral allemand (BGR). Il a pour mission de surveiller les marchés mondiaux des matières premières, d'analyser les risques d'approvisionnement et de conseiller le gouvernement allemand sur les questions liées aux ressources naturelles. Il joue un rôle clé dans la stratégie énergétique et industrielle de l'Allemagne, en particulier en ce qui concerne les matières premières critiques. Il interagit pour cela avec l'industrie allemande qui l'alimente en informations clés indispensables pour produire des analyses précises et ciblées.

C'est sur la base de ces expériences que l'OFREMI a été créé fin 2022, sur les préconisations du rapport Varin. Sa particularité est d'intégrer le double aspect offre / demande, aligné avec les spécificités de l'économie et de l'industrie françaises. Partenariat public-privé, il réunit et engage dans ses travaux les services de l'État et les entreprises en lien avec les transitions énergétique et numérique, la mobilité, l'aéronautique et la défense, afin de coproduire des analyses ciblées. Il repose sur les expertises uniques du BRGM, du CEA,

¹ Voir par exemple article « La petite histoire de ma carte graphique » in https://annales-des-mines.org/wp-content/uploads/2025/09/EN-31_2025-09-web.pdf

de l'IFPEN, de l'ADEME, de l'IFRI et du CNAM, ce qui lui permet de couvrir toutes les dimensions des chaînes de valeur.

En Europe, début 2025, les Pays-Bas se sont aussi dotés d'un observatoire, le NMO, fortement inspiré du DERA et de l'OFREMI.

Aujourd'hui, les observatoires européens travaillent main dans la main dans le cadre du Critical Raw Materials Act (CRM Act, 2024), en partageant leurs développements méthodologiques, rendant plus homogènes les analyses produites.

Données et méthodologies

Données et méthodologies sont indispensables aux analyses de chaînes de valeur. L'OFREMI, comme le DERA ou le NMO, n'est pas un producteur de données et se repose sur les publications de l'USGS, de World Mining Data, du BGS anglais, mais aussi sur des publications plus confidentielles générées par les groupes de Lisbonne sur le cuivre, le zinc ou le nickel. Les observatoires utilisent aussi les données du commerce extérieur publiées par les Nations unies (UN-COMTRADE), la Commission européenne (EUROSTAT) ou les différents États, comme le Kiosque de Bercy pour la France.

La combinaison des données de production / raffinage au niveau mondial, des imports et des exports de produits bruts, semi-finis ou parfois finis, permet d'identifier au niveau macroscopique les principaux pays dont nous dépendons pour nos approvisionnements. Malheureusement, la granularité et la complétude des données ne permettent pas d'avoir une image spécifique des risques pour notre industrie.

La méthodologie de la criticité européenne est générale, et si elle permet de porter à la connaissance du grand public les risques et enjeux clés de nos approvisionnements, elle ne permet pas de prendre des décisions stratégiques, car elle ne fait pas la part entre les besoins en matières premières et ceux en produits contenant ces matières. Par exemple, la criticité européenne laisse entendre qu'il y a un fort risque d'approvisionnement en terres rares en Europe, alors qu'il n'y a en fait aucune industrie transformant les terres rares. Ce sont les aimants à base de terres rares sur lesquels il y a des risques, et ce, tant que nous n'avons pas développé la chaîne de valeur terres rares-aimant... La France mène ainsi une action coordonnée pour disposer de chacune des briques, avec les projets de Solvay, Caremag, Less Common Metals, Oloron-PM, Daimantel, MagReesources, ORANO-CEA...

Donc, chaque pays a développé sa méthodologie pour la criticité, intégrant ses spécificités, avec une liste qui est, selon les cas, publique ou confidentielle.

Le deuxième axe est lié aux analyses de risques, ou stress-tests. Si ce genre d'outil est très utilisé dans le monde économique, il n'a pas d'équivalent pour les chaînes d'approvisionnement. L'OFREMI a été un des premiers à développer une telle méthodologie, aujourd'hui partagée au niveau européen dans le cadre du CRM Act, et en permanente évolution grâce aux échanges entre observatoires.

Avec ces deux méthodologies, reposant sur des outils complémentaires comme le coût de l'inaction ou les jeux sérieux, il est possible d'apporter de vraies réponses aux risques d'approvisionnement.

Engager le monde industriel

Ce travail ne peut reposer uniquement sur des données statistiques et des méthodes. Il doit être adapté aux spécificités industrielles et économiques de chaque pays. Pour cela, il faut engager les acteurs privés en établissant des relations de confiance fortes permettant un partage d'informations parfois hautement confidentielles. Le partenariat public-privé, au cœur de l'OFREMI, renforcé par le rôle de la Délégation interministérielle aux Approvisionnements en minerais et métaux stratégiques, apporte ce cadre. La grande majorité des industries stratégiques des secteurs de l'énergie, de la mobilité, de l'aéronautique et de la défense participe quotidiennement aux travaux, en partageant et recueillant de l'information.

Pour préserver cette confiance, il est capital que le partage des données sous-jacentes soit très contrôlé et limité. Ainsi, s'il est possible de partager les résultats d'un stress-test et les leviers d'atténuation ou remédiation, il n'est pas possible de partager l'ensemble des données ayant conduit aux résultats.

Sensibiliser l'ensemble des parties prenantes

Les chaînes de valeur sont complexes, imbriquées, mondialisées. Un observatoire, dans la limite des informations qui lui sont partagées, n'est pas toujours en mesure d'apporter une réponse spécifique à un industriel. Par contre, au travers d'échanges et d'exercices, il permet à l'ensemble de l'écosystème d'avoir une meilleure connaissance des complexités, et à chaque acteur de personnaliser ses réponses et d'alerter le plus tôt possible. En ce sens, les jeux sérieux sont des outils très puissants où l'on peut réunir acteurs publics et privés autour d'un scénario fictif conduisant à des actions et réactions multiples, qu'il est possible d'analyser pour faire passer des messages clés. Cette sensibilisation est aujourd'hui un des plus grands enjeux des observatoires.

Conclusions

Devant la complexité, la multiplicité et la spécificité des chaînes de valeur, il est impossible d'atteindre l'exhaustivité. Une approche partenariale publique-privée est indispensable.

Il faut aussi développer des méthodologies permettant non seulement d'apporter des informations à même de conduire à des prises de décision, mais aussi de sensibiliser l'ensemble des acteurs.

La France est positionnée dans l'Europe, et nombre de solutions impliquent cette dimension européenne. Il est donc indispensable que les observatoires travaillent ensemble, dans le respect des limites de confidentialité inhérentes aux spécificités de chaque pays. Cela permet un effet de levier sur l'analyse des écosystèmes.

Les premiers niveaux des chaînes de valeur (mines, premières transformations, raffinages...) ne revêtent pas de confidentialité particulière, et un partage des tâches à ce niveau ne peut être que bénéfique.

Enfin, toujours au niveau européen, le CRM Act donne un cadre permettant un échange renforcé. Tous les États membres n'ont pas d'observatoires. Ceux qui en ont sont prêts à apporter leur aide afin de renforcer globalement la résilience européenne.

Le travail d'analyse permettant d'appréhender toute la complexité des chaînes de valeur repose sur une large gamme d'expertise allant de la géologie à la géopolitique, de la prise en compte des contraintes du secteur public et du secteur privé. Les solutions reposent sur l'engagement croisé des secteurs public et privé. Seules des entités agissant en tiers de confiance peuvent mener cela. C'est en cela qu'un observatoire comme l'OFREMI peut se démarquer des cabinets de conseil.

Bibliographie

CRM ACT (2024), Règlement (UE) 2024/1252 du Parlement européen et du Conseil du 11 avril 2024 établissant un cadre visant à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques et modifiant les règlements (UE) n° 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1724 et (UE) 2019/1020 Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401252

MINING REVIEW AFRICA (2023), "Chip wars: China restricts exports of gallium and germanium", <https://www.miningreview.com/battery-metals/chip-wars-china-restricts-exports-of-gallium-and-germanium/>

SMM (2025), « La Chine propose une interdiction d'exportation sur la technologie des batteries et la technologie de traitement du lithium — voici les détails », Shanghai Metal Market, <https://www.metal.com/fr/newscontent/103121013>

État des lieux du recyclage des métaux stratégiques et projets industriels français

Par Olga KERGARAVAT

Référente Métaux et Batteries chez ADEME

Avec la transition énergétique, la France est amenée à mobiliser davantage de métaux, dont certains sont critiques et stratégiques, pour les éoliennes, les panneaux photovoltaïques ou les batteries des véhicules électriques.

Pour répondre à cette hausse de la demande, l'optimisation du recyclage sur le territoire français et européen est un levier incontournable pour participer à la souveraineté en ressources métalliques. Le développement du recyclage concerne toutes les étapes de traitement, dont la collecte et le tri, avec, notamment, l'automatisation croissante des opérations de tri, comme le tri alliage par alliage.

Le recyclage des métaux stratégiques à partir de produits en fin de vie reste encore peu développé au niveau européen, en raison de nombreux facteurs, dont l'hétérogénéité et l'évolution permanente du gisement, la complexité des produits, le mélange d'alliages et les connaissances lacunaires de leur composition.

La dynamique de développement du recyclage portée par les industriels et illustrée dans cet article est encourageante, mais face aux enjeux et aux contraintes à lever, le soutien de l'État visant le recyclage vertueux et l'incorporation de la matière première de recyclage (MPR) apparaît indispensable pour réduire la dépendance en métaux primaires et favoriser la compétitivité de l'industrie nationale au sein de la concurrence mondiale.

Enfin, l'entreprise ne saurait être complète en l'absence d'actions pour diversifier l'approvisionnement à partir de sources primaires et secondaires, pour travailler sur l'allongement de durée de vie des produits contenant les métaux, sur l'éco-conception des produits mais aussi d'activer des leviers de sobriété, en se questionnant continuellement sur les besoins essentiels, pour réduire la consommation de matière.

Le recyclage au sein de la stratégie de souveraineté

Le recyclage et les enjeux d'approvisionnement

Les métaux sont des matériaux indispensables, au cœur de notre vie quotidienne : construction, transport, emballages, câbles, etc.

Les ressources métalliques sont inégalement réparties sur la planète. La France, et plus globalement l'Europe, est très dépendante d'autres pays (en particulier la Chine) pour son approvisionnement en métaux critiques et stratégiques.

La prise de conscience récente de l'Europe pour renforcer son autonomie stratégique dans le domaine des ressources métalliques se traduit par plusieurs textes réglementaires structurants :

- Règlement européen batteries (juillet 2023), imposant de nouveaux objectifs de recyclage et de récupération

des métaux ainsi que des objectifs d'incorporation des métaux dans la fabrication de nouvelles batteries.

- European Critical Raw Materials Act (mars 2024), fixant les objectifs permettant de renforcer l'autonomie de l'Europe. Ce règlement prévoit qu'en 2030, au moins 25 % de la consommation annuelle de l'UE en métaux doit provenir du recyclage européen.
- Règlement NZIA (Net-Zero Industry Act, mai 2024), ayant pour objectif d'accroître le développement des technologies bas-carbone en Europe pour atteindre les objectifs de neutralité carbone en 2050. Ce règlement vise la relocalisation de certaines étapes de la chaîne de valeur, par exemple, pour les batteries. D'ici 2030, une augmentation de la demande en métaux est attendue en France et en Europe. Par exemple, les demandes européennes de cuivre et d'aluminium augmenteront annuellement de 1,0 % et de 1,4 % respectivement entre 2018 et 2030 (Eurométaux, 2022¹),

¹ EUROMÉTAUX & LIESBET G. (2022), Metals for Clean Energy. Pathway to solving Europe's raw materials challenge.

en raison de l'utilisation grandissante de ces métaux dans les technologies de la transition énergétique.

Pour répondre à cette demande en forte croissance, l'ouverture de nouvelles mines dans le monde, notamment en France et en Europe, apparaît indispensable, mais le recyclage n'en reste pas moins essentiel pour réduire la tension entre l'offre et la demande. De plus, récupérer les matières premières à partir du recyclage, pour peu que cela soit réalisé de manière environnementalement responsable, permet d'économiser des ressources naturelles et de les préserver ainsi pour les générations futures.

En amont du recyclage, sobriété et écoconception

Fort du constat que le recyclage ne pourra suffire à répondre à la demande croissante en métaux stratégiques² (cf. « L'intelligence minérale au service d'une meilleure connaissance des chaînes de valeur », pp. 56-59), il convient de diversifier les actions en mettant, notamment, en œuvre différents leviers de sobriété. Ces mesures permettraient non seulement de continuer à répondre aux besoins de la transition énergétique mais également de rendre plus efficace et durable la consommation des matières premières.

La sobriété est une démarche consistant à questionner les besoins individuels et collectifs pour y répondre en respectant le vivant et en réduisant les consommations d'énergie, de matière et les émissions de gaz à effet de serre, tout en gardant un objectif d'équité et d'intérêt général.

L'éco-conception des produits rendant les produits plus légers, moins gourmands en multiples métaux, plus réparables, mieux démontables pour le recyclage, pourrait aussi grandement contribuer à une meilleure utilisation des ressources métalliques. La substitution de certains métaux critiques par d'autres métaux de plus faible criticité est également envisageable, même si le potentiel de substitution reste limité, et peut conduire à faire émerger de nouvelles criticités.

L'allongement de la durée de vie des équipements permet, enfin, de réduire la demande en matières premières vierges, avec, comme levier, la possibilité d'une seconde vie des produits (réutilisation, réparation, remanufacturation...).

Ces différents leviers apparaissent tous aussi importants que l'ouverture de nouvelles mines ou le développement du recyclage, pour réduire la dépendance de notre économie aux importations.

Le recyclage des métaux stratégiques : une situation contrastée

Le recyclage traite les produits en fin de vie pour récupérer les matériaux, et s'organise autour des étapes de collecte, de pré-traitement (démantèlement, broyage, tri...) et de traitement (permettant l'extraction des matériaux –

métallurgie, raffinage...). L'efficacité de chacune de ces étapes influence la réussite du recyclage.

Le recyclage pré-consommation (chutes internes, déchets d'usinage) est plutôt bien développé, car il est simple à mettre en œuvre (recyclage interne), tandis que le recyclage des produits en fin de vie (recyclage « post-consommation ») apparaît plus complexe en raison de la diversité et de la dissémination du gisement, notamment issu des mines urbaines³ :

- Les produits en fin de vie sont de plus en plus complexes : nombre important de matériaux constituant les produits, composition inconnue des produits, présence de substances dangereuses et d'impuretés, mélanges d'alliages...
- La plupart du temps, les métaux ne sont pas utilisés sous leur forme pure mais sous forme d'alliages. Par exemple, plus de 400 alliages de cuivre sont utilisés sur le marché.

Ainsi, à l'échelle internationale, les taux de recyclage « post-consommation » sont plutôt faibles (voir la Figure 1). Les métaux ferreux et non ferreux présentent des taux de recyclage moyens, et la plupart des métaux de spécialité ne sont que très peu recyclés. En revanche, les métaux précieux sont très bien recyclés.

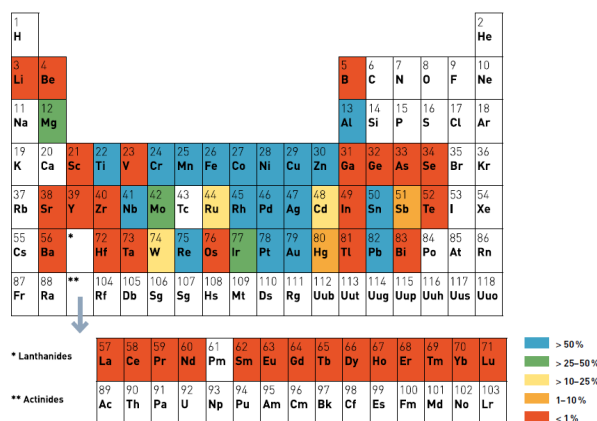


Figure 1 : Taux de recyclage des produits en fin de vie (EOL-RR) pour 60 métaux en 2011 (Source : UNEP, 2011 "Recycling rates of metals", https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8702/Recycling_Metals.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Les taux de recyclage en fin de vie pour certains métaux ont été réactualisés dans RMIS (Raw Materials Information System) par Joint Research Centre (JRC), service scientifique interne de la Commission européenne (<https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp/>).

Les réactualisations sont toutefois basées sur des années et des sources variables, selon la disponibilité des données pour différents métaux.

Ces faibles taux de recyclage sont aggravés par la longue durée d'utilisation d'un métal dans l'économie.

²GROSSE F. (2023), *Croissance soutenable ? La société au défi de l'économie circulaire*, Presses universitaires de Grenoble.

³Le terme « mine urbaine » apparaît à la fin des années 2000, et est associé au concept d'économie circulaire. Dans une mine urbaine, les déchets sont désormais perçus comme de nouveaux gisements de matières premières, mais c'est un gisement très disparate dont la composition évolue rapidement, <https://www.annales.org/re/2016/re82/RE-82-Article-GELDRON.pdf>

Certains, comme ceux immobilisés dans les infrastructures, peuvent y rester plusieurs décennies, ce qui accroît le stock installé et retarde leur disponibilité pour le recyclage.

Enfin, la fermeture complète de la boucle de recyclage sur le plan massif n'est pas possible en raison de pertes de matière ou de qualité inhérente aux limites physiques des procédés de récupération (cf. *ibid.*, pp. 52-59).

Ces constats confirment que le secteur industriel est le plus à même à développer des solutions de recyclage adaptés à ses besoins, afin de relever les défis technologiques, logistiques, stratégiques et économiques de sa chaîne de valeur.

Les projets industriels de recyclage : illustration de la dynamique française

Bien que les métaux appartiennent tous à la même famille de matériaux, ils présentent une grande diversité d'enjeux, de disponibilité, de comportements et d'usages.

Ainsi, certaines filières de recyclage, comme celle des métaux ferreux, présentent des taux de recyclage déjà significatifs, tandis que d'autres ne sont encore qu'au début de la démarche.

Il est donc difficile d'avoir une stratégie commune pour le recyclage de l'ensemble des métaux.

Analysons plus en détails deux catégories de métaux : grands métaux et métaux de batteries des véhicules électriques (VE).

Catégorie « grands métaux » : les freins à la réincorporation des matières premières de recyclage (MPR) persistent

En France aujourd'hui, la quasi-totalité des déchets métalliques de grands métaux (acier, aluminium, cuivre) sont recyclés, c'est-à-dire collectés, préparés et réincorporés dans un nouveau cycle de production. Cependant, force est de constater que la réincorporation des MPR post-consommation est encore insuffisante sur le territoire français.

Plusieurs freins majeurs à cette réincorporation sont identifiés :

- les technologies de tri ne permettent pas toujours d'atteindre le niveau d'exigence attendu par les industriels dans les conditions actuelles du marché (par exemple, tri alliage par alliage, niveau de pureté...);
- les normes techniques ou environnementales peuvent imposer des exigences difficiles à satisfaire pour les MPR (par exemple, teneur maximale en plomb, caractéristiques intrinsèques de matières), favorisant indirectement les matières vierges;
- l'hétérogénéité du gisement des MPR métalliques (typologie d'alliages, volumes collectables) complexifie le recyclage des déchets.

Aujourd'hui, en effet, l'offre des MPR métalliques françaises est nettement supérieure à la demande, et les MPR post-consommation françaises sont en grande partie recyclées en boucle ouverte en France ou exportées vers des pays frontaliers ayant des tissus industriels plus favorables à l'incorporation de MPR métalliques, et indirectement vers des pays tiers. Néanmoins, la demande croissante de MPR en France devrait engendrer une diminution des exportations et l'augmentation de la réincorporation, avec, comme conséquence directe, la possibilité d'améliorer la décarbonation de la chaîne de valeur, pour peu que le recyclage soit décarboné.

La mise en œuvre de boucles de recyclage sur le territoire français répond par ailleurs à l'enjeu de criticité des matières premières vierges, en particulier le cuivre. Les métallurgistes pourront s'appuyer sur l'amélioration continue des technologies de tri entre métaux et de tri alliage par alliage pour incorporer des volumes plus élevés de MPR issus de déchets post-consommation. À noter qu'il sera essentiel de poursuivre l'amélioration du recyclage de certains gisements d'intérêt (DEEE, VHU et emballages), qui sont aujourd'hui soit partiellement collectés, soit exportés sous forme de produits d'occasion.

Dans les prochaines années, afin de poursuivre l'amélioration du recyclage des métaux en France, il sera nécessaire d'agir à la fois :

- sur l'offre des MPR : en apportant un soutien à la préparation des MPR métalliques à faible taux de résiduels, et en favorisant le développement de procédés de tri et de recyclage plus performants (par exemple, la séparation des alliages complexes) ;
- sur la demande des MPR : en incitant les fabricants de produits finis à incorporer des MPR métalliques, voire en simplifiant les normes pour faciliter l'incorporation des MPR sans compromettre la qualité.

Le développement du recyclage en boucle fermée de l'aluminium

L'extraction et la transformation de l'aluminium nécessitent une grande quantité d'énergie, et contribuent, dans de nombreux pays où la production d'électricité est carbonée, aux émissions de CO₂ ; c'est moins le cas en France où l'électricité est très fortement décarbonée (à 95 % en 2024 selon RTE).

Aujourd'hui, la majorité des MPR d'aluminium post-consommation sont réincorporées par l'affinage, avec une perte de valeur par rapport aux applications initiales. Les technologies de tri des déchets d'aluminium sont en développement – XRF (X-Ray fluorescence) et LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)⁴ –, mais à ce jour, leur productivité et leur rentabilité doivent être améliorées pour le déploiement à une échelle industrielle.

Certains projets industriels cherchent à mettre au point des procédés de tri adaptés permettant de récupérer la matière recyclée d'une façon optimisée. L'objectif est

⁴ Technique d'analyse combinant le laser et la spectroscopie pour caractériser la composition chimique d'une pièce.

Projet “Close the Loop” (France 2030, AAP RRR) - Recyclage de l’aluminium de fin de vie automobile, porté par Constellium

L’objectif du projet est de définir une séquence de démontage, broyage et tri (dont les technologies de tri innovantes) pour récupérer de manière séparée les alliages corroyés, permettant leur recyclage et réincorporation en boucle fermée. Ne pas mélanger les alliages à haute valeur ajoutée pourrait permettre de les utiliser à autre chose que la fabrication des pièces moulées automobiles, en évitant le décyclage.

Il est également prévu de mener une réflexion sur de nouveaux alliages plus tolérants, afin de faciliter l’incorporation de contenu recyclé tout en conservant les propriétés requises par le secteur automobile.

de réduire le mélange des alliages afin d’en faciliter la récupération et l’utilisation en boucle fermée.

L’amélioration du recyclage du cuivre au cœur de plusieurs projets français

Le cuivre est un métal indispensable pour les transitions énergétique et numérique, en lien avec ses propriétés de conducteur électrique. La majorité du cuivre collecté en France est exporté, car les capacités de recyclage par fusion ne sont pas suffisantes. Toutefois, le fabricant des câbles Nexans a annoncé en 2024 un investissement stratégique pour augmenter sa capacité de production et de recyclage du cuivre en France.

En outre, l’Europe dispose de plusieurs sites de raffinage. La construction d’un site de raffinage du cuivre n’est pour le moment pas envisagée en France.

Plusieurs projets français visent le développement et l’amélioration des technologies de tri du cuivre ainsi que l’étude de la faisabilité d’incorporation de cuivre recyclé dans différentes filières.

Le recyclage des batteries Li-ion des véhicules électriques pour renforcer la souveraineté de l’Europe en métaux

Les matériaux critiques composant les batteries Li-ion (Li, Ni, Co, Mn, graphite) sont au cœur des batteries des véhicules électriques (VE). Les batteries Li-ion actuelles se répartissent entre deux principales chimies : NMC (nickel, manganèse, cobalt), riches en matériaux critiques et denses en énergie ; et LFP (lithium, fer, phosphate), chimie de moindre densité qui ne contient que le lithium comme matériau critique.

Le recyclage au sein de la chaîne de valeur

Parmi les facteurs qui vont influencer le développement du recyclage, on peut citer :

L’état et l’évolution du marché

Le marché européen des batteries est très marqué par la faillite de Northvolt (Suède) en mars 2025, provoquée par la non-atteinte de cadences industrielles de production suffisantes. Depuis 2024, la montée en puissance de la chimie LFP entraîne une baisse relative des volumes de NMC. En France, pour l’instant,

Voici quelques exemples de projets de l’AAP RRR « Solutions innovantes pour l’amélioration de la recyclabilité, du recyclage et de la réincorporation des matériaux » (volet métaux), France 2030 opéré par l’ADEME

- **Projet VIALIBS** (France 2030, AAP RRR)^a - Développement d’une solution LIBS intelligente assistée par la vision 3D pour un recyclage plus performant des câbles métalliques en fin de vie, porté par MTB Manufacturing (coordination) ; Ablatom ; InnoDura TB ; Université Claude Bernard Lyon1 ; et l’Institut Lumière Matière (ILM). Le projet VIALIBS vise à développer une solution de contrôle qualité en ligne basée sur l’analyse chimique LIBS assistée par la vision 3D, avec le pilotage par une intelligence artificielle (IA) dans le but d’optimiser les procédés de recyclage mécanique des câbles métalliques en fin de vie. Les enjeux de VIALIBS sont de moderniser et de réduire les coûts de l’industrie du recyclage à travers les leviers suivants :
 - l’amélioration de la qualité des matières premières recyclées par le contrôle en ligne ;
 - la maintenance prédictive des équipements de recyclage, basée sur l’IA ;
 - l’optimisation du tri, grâce à un pilotage automatique.
- **Projet CAT-FIC** (France 2030, AAP RRR)^b – Recyclage et réemploi des éléments cuivreux de l’infrastructure, porté par SNCF Réseau (coordination) ; MTB Recycling ; CIMES ; et LaMcube – Centrale Lille. Les cahiers des charges de réseaux de transport d’électricité et de transport ferroviaire sont très exigeants, et souvent ne permettent pas d’utiliser des MPR, à cause des normes de sécurité. Cela pourrait constituer un frein

à l’incorporation de MPR. La compatibilité de matières recyclées avec les exigences des cahiers des charges des utilisateurs mérite d’être étudiée.

Aujourd’hui, 100 % du cuivre utilisé par SNCF Réseau pour la rénovation de ses caténaires et l’équipement de nouvelles lignes est du cuivre électrolytique issu de fonderie. Le projet CAT-FIC vise le recyclage et le réemploi des éléments cuivrés des caténaires en fin de vie.

Le projet prévoit la mise au point d’outils pour la valorisation du cuivre : démontage, tri, nettoyage, broyage, fusion répondant aux conditions d’exploitation ferroviaire. Il ambitionne également la réalisation des prototypes de produits à base de cuivre recyclé ainsi que leurs tests.

- D’autres projets industriels sont soutenus dans le cadre de l’AAP ORMAT (Fonds économie circulaire de l’ADEME) pour améliorer et optimiser les technologies de tri (projet Zéro Waste Cuivre, projet Galloo France...)^c.

^a <https://bibliothèque.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/6489-vialibs-contrôle-en-ligne-pour-un-recyclage-optimisé.html>

^b <https://bibliothèque.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/7927-cat-fic-recyclage-reemploi-des-elements-cuivreux-de-l-infrastructure.html>

^c <https://bibliothèque.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/8103-bilan-de-l-appel-a-projet-oramat-objectif-recyclage-matieres-en-2023-et-2024.html>

la montée en puissance du LFP ne modifie pas les projets français, mais les porteurs de projets restent vigilants sur les modifications des proportions de la chimie des batteries.

La performance de la collecte et du pré-traitement

Préalablement à leur traitement, les batteries en fin de vie doivent être collectées et transportées. Ces étapes sont délicates vis-à-vis du risque incendie. Le désassemblage des modules et des cellules des batteries sur le site de pré-traitement est un défi majeur, car le manque de standardisation rend complexe une approche automatique et demande une main-d'œuvre qualifiée. Une désactivation sécurisée et efficace est extrêmement importante pour le traitement des batteries Li-ion.

Le pré-traitement mécanique des batteries Li-ion (souvent par broyage, tri) permet de produire de la *black mass* (poudre de métaux) ensuite traitée par deux procédés employés à l'échelle industrielle (pyrométallurgie et hydrométallurgie). Le traitement par recyclage direct est encore en cours de développement en laboratoire. Ces deux principaux procédés traitent la *black mass* de la batterie en fin de vie ou des rebuts de production.

L'approvisionnement nécessaire au recyclage : gisements et composants du process

La majorité des batteries Li-ion actuellement en circulation ne sont pas encore arrivées en fin de vie. La durée de vie des batteries VE est estimée à 15 ans, voire 18 ans. Donc, en Europe, les rebuts de production des *gigafactories* resteront le gisement principal à recycler, *a minima* jusqu'en 2030-2033, ce qui représente une formidable opportunité de développement du recyclage des batteries en France et en Europe. Ce développement est conditionné à l'implantation de *gigafactories* européennes, confrontées dès aujourd'hui à des choix stratégiques comme leur choix de chimie des batteries, leur rythme de montée en capacité et celui de réduction des taux de rebuts. À noter que les *gigafactories* ne s'approvisionnent pas directement en matériau raffiné, mais assemblent leurs cellules à partir de nombreux composants, dont l'anode (généralement en graphite, mais potentiellement aussi en silicium), l'électrolyte, le séparateur, les collecteurs, et le matériau actif de cathode (CAM), lui-même issu d'un précurseur (mélange d'hydroxydes, p-CAM). Tous ces composants sont actuellement fabriqués à plus de 70 % en Chine, mais des projets visent à doter la France et l'Europe de capacités de production.

En effet, le marché de la fabrication de CAM et de pCAM est très peu mature en Europe : une dizaine de projets européens ont été annoncés, mais la plupart reste à un niveau de développement peu avancé. Ainsi, le développement du recyclage doit inclure les acteurs européens de pCAM et CAM. C'est une condition nécessaire pour le développement des procédés avancés de récupération des sels des métaux et d'affinage en Europe.

Le recyclage aujourd'hui et demain en France et en Europe

En France, pour le moment, il n'y a pas de solution de recyclage industriel fonctionnelle proposant une extraction de l'ensemble des métaux critiques de la batterie (Co, Ni, Li).

En Europe et en France, plusieurs projets de recyclage de batteries annoncés ne se sont pas concrétisés. Les capacités réelles de traitement en Europe ne sont pas connues, et cela rend difficile l'analyse de l'état du marché.

Les interrogations majeures des recycleurs de batteries / rebuts de production concernent :

- Le rythme de croissance des gisements à traiter et la nécessité de sécuriser les gisements. En effet, il y a des incertitudes sur la montée en puissance des VE, la durée de vie des batteries, le développement plus lent qu'initialement prévu des *gigafactories* européennes, la compétition d'autres chimies de batteries.
- Le coût de traitement et la taille des usines permettant d'assurer une rentabilité. Il est communément admis que les usines hydrométallurgiques de grande capacité demandent proportionnellement moins d'investissement en capitaux (CAPEX), d'où la probable nécessité de mutualisation des investissements entre plusieurs acteurs. Pour être économiquement viable, le procédé de recyclage doit atteindre sa capacité optimale (avec un gisement à traiter assuré) et son fonctionnement nominal pour les performances de traitement. En France, les projets de recyclage, notamment ceux en hydrométallurgie, sont encore en phase de recherche industrielle et d'amélioration des performances. Ils n'ont pas encore atteint leur « vitesse de croisière ».
- La volatilité des cours des métaux, donc, la nécessité de réfléchir sur un modèle de contrat de traitement (*tolling* ou recyclage avec transfert de propriété des matières).
- L'incertitude entourant les prix de l'énergie, qui a un impact très fort sur l'industrie européenne.
- La politique agressive des acteurs asiatiques pour attirer la *black mass* en Asie.

Finalement, les projets européens de pré-traitement (démantèlement, désactivation, broyage, tri) se développent plus vite que les projets de séparation des métaux qui, pour les procédés hydrométallurgiques, exigent des surfaces industrielles importantes, des investissements conséquents et sont encore en cours de rodage pour la séparation des métaux (notamment pour le lithium).

Pour un recyclage efficace, il faut un procédé qui fonctionne mais qui, très souvent, nécessite de faire de l'innovation industrielle, et même probablement d'élaborer un procédé en rupture pour se différencier des concurrents.

Les innovations industrielles suivantes illustrent le dynamisme du secteur

- **Projet RE-VISION** (France 2030, AAP RRR)^a - Extraction et valorisation des métaux stratégiques des batteries de VE, porté par SARPI (Véolia).
Ce projet, basé en Lorraine, vise la construction d'une unité de démonstration industrielle d'extraction et de valorisation des métaux stratégiques (Co, Ni, Li, Cu, Al) des batteries Li-ion de VE (pré-traitement et traitement) et des rebuts de production des batteries.
- **Projet SCRAPCO2MET** (France 2030, AAP RRR)^b - Recyclage des scraps de *gigafactories*, porté par MECAWARE (coordination) ; MTB Manufacturing; VERKOR; ICBMS Lyon; LEPMI. L'objectif est de développer et de mettre en service une unité industrielle de recyclage en boucle fermée des rebuts de production des batteries et d'optimisation de l'usage de la matière première stratégique, grâce à une chaîne complète du cycle de recyclage mobilisant une innovation CO2 sourcée de la chimie supramoléculaire permettant l'extraction des métaux. La localisation de l'unité industrielle est prévue à Béthune (62).
- **Projet CIRCULI** (France 2030, AAP RRR)^c - Recyclage du lithium issu de batteries LFP, porté par ORANO (coordination) ; EDF ; VERKOR.
L'objectif est de développer une technologie de pré-traitement et de traitement du lithium issu de batteries LFP. Ce projet a le mérite de s'intéresser à la chimie LFP, qui est nettement moins « rentable » pour les recycleurs. La localisation de la phase de pré-traitement est prévue en Nouvelle Aquitaine et celle de traitement en AURA.

^a <https://bibliographie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/6484-re-vision-recyclage-des-batteries-de-vehicules-electriques.html>

^b <https://bibliographie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/6500-scrap-co2met-recyclage-on-site-des-scraps-de-gigafactory.html>

^c <https://bibliographie.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/7928-circuli-recyclage-de-lithium-issu-de-batteries-lfp.html>

Conclusion

Le développement du recyclage des métaux critiques est largement porté par le secteur industriel, soutenu par les politiques publiques vigilantes face aux enjeux de souveraineté.

Face aux contraintes et freins identifiés, plusieurs opportunités peuvent être saisies :

- Le soutien des politiques publiques, notamment économique (subventions, mécanismes incitatifs...), permet le développement de nouvelles technologies et l'implantation d'opérateurs locaux, qui participent aux enjeux de maintien du savoir-faire et de la compétitivité de l'industrie en plus de contribuer à la diminution de la dépendance aux ressources étrangères.
- L'évolution réglementaire (harmonisation, simplification ...), qui prévoit l'incorporation de matières recyclées dans la fabrication de nouveaux produits (avec des proportions de matières recyclées imposées), pourrait être un levier efficace d'accélération du recyclage.
- Le soutien du marché : la hausse de la demande et de l'utilisation de métaux en France et en Europe associée à de fortes importations de matières premières neuves milite pour le développement de toutes les étapes de la chaîne de valeur en local.

Néanmoins, le succès du déploiement du recyclage dépendra fortement de la capacité de l'Europe à préserver un écosystème économique et réglementaire qui lui soit favorable face aux politiques commerciales agressives des producteurs primaires.

Références bibliographiques

AVIS DE l'ADEME (2025), Transition énergétique et matériaux stratégiques : dépendances, sobriété et recyclage.

ADEME (2024), Étude du potentiel d'amélioration du recyclage des métaux en France.

ADEME (2024), Louis OLLION (Deloitte), Pierrick DRAPEAU (Deloitte), Lena BOZTEPE (Deloitte), Solène DE VILLERS (Deloitte), Guillaume BOUYER (Deloitte), Luca VERGARI (Deloitte), Erwann FANGEAT (ADEME), Olga KERGARAVAT – Étude des besoins en métaux dans le secteur numérique.

ADEME (2025), Bilan de l'appel à projet ORMAT (Objectif Recyclage MATières) en 2023 et 2024.

GROSSE F. (2023), *Croissance soutenable ? La société au défi de l'économie circulaire*, Presses universitaires de Grenoble.

L'innovation au service du recyclage de la mine urbaine

Par Stéphane PELLET-ROSTAING

Directeur de l'Institut de Chimie séparative de Marcoule (ICSM)

Yannick MÉNARD

Directeur adjoint de la direction des Ressources minérales au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

Dr. Jean-Christophe P. GABRIEL

Directeur de recherche et senior fellow du Commissariat à l'Énergie atomique et aux Énergies alternatives (CEA)

Et Solène TOUZÉ

Chercheuse en échantillonnage et procédés de traitement de déchets au Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

L'exploitation minière urbaine offre une alternative durable à l'exploitation minière traditionnelle, donnant accès à des ressources sans droits miniers ni risques environnementaux majeurs. Si le recyclage des métaux de base comme le cuivre, le zinc et l'aluminium est efficace, les métaux critiques restent difficiles à récupérer en raison de l'hétérogénéité des déchets et de leur composition inconnue, faute de méthodes d'échantillonnage adaptées. Une caractérisation précise des déchets est essentielle, mais les erreurs d'échantillonnage et l'insuffisance des normes entravent les progrès. La recherche favorise le développement de prétraitements innovants (démantèlement basé sur l'IA, tri sélectif) et de procédés de récupération avancés (hydro-, pyro-, solvo-, iono-, électro- et biométallurgie), dans le but d'améliorer les rendements, de réduire les déchets et de permettre un recyclage modulaire et éco-efficace. Aucune méthode ne suffit à elle seule ; un recyclage robuste nécessite des approches combinées et sur mesure, intégrant des technologies matures et émergentes.

La mine urbaine représente un complément stratégique indispensable aux mines traditionnelles, offrant un accès facilité à des ressources déjà extraites du sous-sol. Toutefois, malgré une collecte déjà bien établie, le recyclage des équipements en fin de vie reste un défi majeur, notamment pour les métaux critiques comme les terres rares, les platinoïdes, ou les métaux réfractaires. Les technologies actuelles sont performantes pour des métaux industriels comme le cuivre, le zinc ou l'aluminium (Raabe, 2023), mais mal adaptées à la complexité et à la variabilité d'une grande partie des déchets anthropogéniques dits « technologiques », éloignés des minerais classiques pour lesquels la métallurgie extractive a été conçue. Dans ce contexte, la recherche avancée, soutenue par une volonté politique et sociétale forte, peut permettre le développement de procédés physico-chimiques, pyro-, hydro-, solvo-, iono-, électro- ou bio-métallurgiques innovants et adaptables, limitant les déchets secondaires tout en valorisant des produits à haute valeur ajoutée (Binnemans *et al.*, 2013 ; Vuppaladadiyam *et al.*, 2024, Gkika *et al.*, 2024). L'émergence d'une nouvelle industrie du recyclage, fondée sur des procédés écoconçus, sûrs,

sobres en énergie et en ressources, devient cruciale. L'intensification des procédés doit viser une performance technique accrue tout en optimisant le bilan environnemental et économique, notamment *via* la modélisation et l'établissement de modèles prédictifs. Le recyclage des métaux stratégiques repose aujourd'hui sur un nombre restreint de procédés, chacun étant adapté à des flux spécifiques comme les aimants permanents, les batteries, ou les cartes électroniques. Ce recyclage repose ainsi sur trois étapes clés : le prétraitement incluant le démantèlement et le tri physique pour concentrer les flux valorisables ; l'enrichissement des métaux par voie thermique ou chimique ; et la mise en forme finale des substances chimiques triées.

L'enjeu initial de la caractérisation des déchets

Avant de développer ou d'améliorer les procédés de récupération des métaux critiques (MC) à partir des déchets, une question préalable essentielle se pose : celle de la détermination de la teneur en métaux de

ces déchets, ainsi que de l'incertitude associée à cette mesure. Si, pour de nombreux acteurs, l'obtention de données sur les teneurs semble aller de soi, il n'en va pas de même pour l'évaluation des incertitudes, souvent négligée ou mal comprise.

La première étape de la caractérisation d'une ressource consiste à réaliser un échantillonnage du gisement, c'est-à-dire à prélever un sous-échantillon représentatif d'un lot plus important. L'objectif est que ce sous-échantillon reflète fidèlement la composition du gisement d'origine, en contenant tous les constituants dans les mêmes proportions. Or, cette opération, par nature imparfaite, introduit ce que l'on appelle une « erreur d'échantillonnage ». Contrairement aux minerais, les déchets issus de la mine urbaine présentent une complexité intrinsèque : diversité des matériaux (métaux, plastiques, céramiques, etc.), des formes (pures, en mélange, oxydées, etc.), ainsi que des modes d'imbrication (mécanique, chimique, etc.). Cette hétérogénéité rend particulièrement difficile l'obtention d'un sous-échantillon véritablement représentatif, ce qui tend à accroître significativement l'erreur d'échantillonnage. De plus, la complexité structurelle des déchets empêche souvent de les modéliser selon les approches traditionnelles utilisées dans l'industrie minière (Gy, 1979), rendant inapplicables les modèles d'échantillonnage classiques.

À ce jour, il n'existe pas de méthodologie d'échantillonnage spécifiquement adaptée aux déchets complexes de la mine urbaine. Les normes existantes (ISO, IEC, etc.) sont trop générales ou insuffisamment adaptées pour permettre l'élaboration de protocoles d'échantillonnage rigoureux. Certaines entreprises, notamment les affineurs en bout de chaîne, ont mis au point leurs propres procédures internes. Celles-ci restent cependant rarement accessibles, et se concentrent généralement sur une gamme restreinte de métaux. Cette expertise leur confère un avantage stratégique, leur permettant, entre autres, de fixer les prix d'achat des déchets.

Depuis quelques années, des acteurs situés en amont de la chaîne de recyclage, tels que les éco-organismes ou les recycleurs, manifestent un intérêt croissant pour l'acquisition de connaissances précises sur le contenu en métaux de leurs déchets. Cette demande a stimulé le développement de recherches sur les méthodologies d'échantillonnage des déchets, en particulier pour les DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques). Des projets tels que MetroCycleEU (20IND01), ainsi que les travaux récents de Barthelet *et al.* (2024), Touzé *et al.* (2024) et Hubau *et al.* (2022), illustrent cette dynamique. Les approches proposées par Touzé et Hubau reposent, notamment, sur des méthodes empiriques fondées sur la répétition des analyses. Ces études révèlent que l'écart-type imputable à l'échantillonnage peut varier considérablement selon le métal considéré, allant de 4 à 40 %.

Le pré-traitement des déchets

Pour ce qui est de l'exploitation de la mine urbaine, cette première étape est clef, car elle conditionne les rendements et la viabilité économique du recyclage. Un démantèlement et / ou tri trop grossier, où seuls

certains métaux seront récupérés, amène des rendements souvent sous-nominaux et une perte de ressources. C'est par exemple le cas dans le recyclage des circuits imprimés, qui représentent l'une des sources secondaires les plus riches et les plus prometteuses pour ces éléments stratégiques. Malgré cela, la pratique actuelle la plus utilisée consiste à immédiatement broyer les cartes et à ne viser qu'une poignée de métaux tels que le cuivre, l'aluminium, l'or, l'argent, et le plomb (Charpentier *et al.*, 2024). Ceci amène à la perte d'une majorité des MS (pour métaux stratégiques) dans les cendres des procédés pyrométallurgiques utilisés. Or, il a été montré que la manière de pré-traiter ces cartes de circuits imprimés peut profondément améliorer la récupération des éléments précieux et critiques. Ainsi, un changement de paradigme, maintenant incluant dans le pré-traitement le démontage systématique des composants électroniques et leur tri à l'aide de l'imagerie, de la spectroscopie et de l'intelligence artificielle, permet de créer des flux de déchets enrichis et de compositions chimiques simplifiées et plus stables. Cette approche rend alors possibles des post-traitements chimiques ou hydrométallurgiques adaptés, qui réduisent l'impact environnemental par rapport à la pyrométallurgie, et donnent accès, d'une façon viable économiquement, à des éléments critiques jusqu'ici inaccessibles comme le tantale, le ruthénium, les terres rares ou des métaux du groupe du platine (Xia *et al.*, 2022 ; Charpentier *et al.*, 2023). Cette approche a aussi l'avantage de ne pas nécessiter une massification intense des déchets, et peut donc se décliner de façon modulaire, décentralisée et adaptative, selon les besoins du recycleur et son positionnement dans la chaîne de valeur.

Le recyclage par voie courte

Une fois les objets démantelés et les composants riches en métaux ciblés accessibles, deux technologies coexistent : la « voie courte », qui prévoit la refabrication du composant après traitement mécanique, physique ou thermique ; et la « voie longue », voie hybride qui associe le plus souvent pyro- puis hydro-, solvo-, iono- ou bio-métallurgie afin d'isoler sélectivement les métaux.

La stratégie de recyclage « d'aimant à aimant » est un exemple emblématique de recyclage par « voie courte ». Cette approche repose sur une réaction de décrépitation par hydrogène, entraînant l'expansion volumique des aimants NdFeB et engendrant des fissures qui fragmentent entièrement l'aimant. La poudre obtenue, partiellement désaimantée, est tamisée et broyée pour permettre la refabrication d'aimants avec une conversion d'environ 90 % de leurs propriétés magnétiques initiales (Habibzadeh *et al.*, 2023).

Le recyclage par voie longue

La pyrométallurgie, incluant chloruration, distillation, extraction par métal liquide, fusion en sels fondus ou méthode « *glass slag* » (Deng *et al.*, 2025), peut être considérée également comme une voie courte de recyclage, mais elle peut être identifiée comme étape de pré-traitement dans le développement de voies

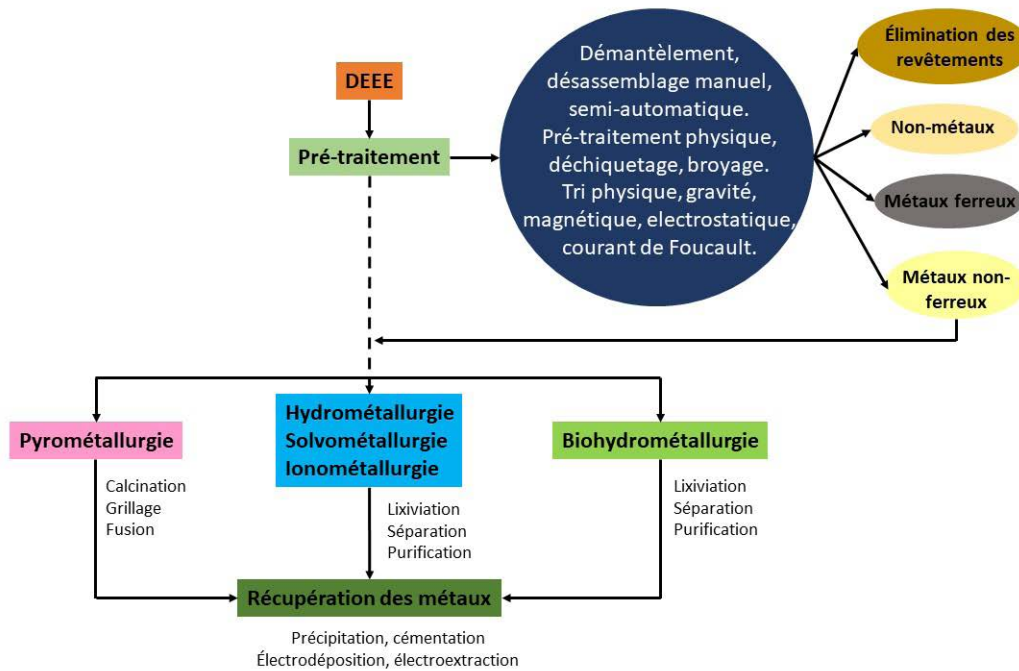


Figure 1 : Les différentes étapes et procédés du recyclage (Source : d'après VUPPALADADIYAM S. S. V *et al.*, 2024).

plus longues de recyclage. Elle permet la récupération de métaux sous forme d'alliages ou de composés intermédiaires, souvent sans générer d'effluents mais avec une consommation énergétique souvent élevée. Ces techniques conviennent aux flux riches, et nécessitent un post-traitement pour une séparation plus poussée.

La voie hydrométallurgique, plus répandue, répond à cette ambition et repose sur la lixiviation acide ou basique suivie de techniques d'extraction liquide-liquide, solide-liquide ou par précipitation sélective, mais elle reste sensible aux éléments interférents.

Les promesses des procédés innovants

Des procédés innovants tels que l'activation mécanique (Shukla *et al.*, 2022), les traitements thermiques oxydants ou l'activation par ultrasons (Tanaka *et al.*, 2002) ou par micro-ondes (Yang *et al.*, 2023) permettent d'optimiser la réactivité des phases réfractaires et de réduire la consommation d'acide, voire la possibilité de substituer les acides minéraux, toxiques et corrosifs, par des acides organiques plus doux (Belfqueh *et al.*, 2023). L'intensification des pré-traitements, par des ajustements de concentration, de granulométrie ou de temps de contact, s'impose ici comme un levier crucial pour la sélectivité en lixiviation (Ni'am *et al.*, 2019). L'extraction liquide-liquide reste une méthode industrielle de référence pour la séparation des cations métalliques, mais elle souffre de contraintes liées à la pureté, au coût des solvants et à leur toxicité. La distinction entre les métaux est exploitée *via* des extractants spécifiques, mais la variabilité chimique des entrants de la mine urbaine, les phénomènes d'émulsion, les limites de rendement et la

nécessité de plusieurs cycles incitent à explorer d'autres solutions. Une des méthodes proposées consiste à remplacer les acides classiquement utilisés dans les processus de lixiviation par des formulations ternaires à base d'hydrotropes, qui permettent, d'une part, une lixiviation sélective, et, d'autre part, rendent superflue l'étape d'extraction liquide-liquide (El Maangar *et al.*, 2025). Comme les métaux cibles sont dissous sélectivement à partir des matériaux solides, leur précipitation est alors possible, rendant inutile le processus d'extraction liquide-liquide, et ouvrant ainsi la voie à des procédés plus compacts et éco-compatibles, réduisant drastiquement les déchets chimiques secondaires.

Les technologies membranaires offrent également une alternative douce et modulaire, bien qu'encore limitées par le colmatage ou la stabilité à long terme (Borini *et al.*, 2010), ou encore dans le cas de technologies membranaires composites à base de nanomatériaux, l'absence de structures en France permettant leurs montées en échelle et l'établissement de pilotes de validation.

Les stratégies d'adsorption solide-liquide permettent la récupération sélective à faible concentration, notamment à l'aide de matériaux hiérarchisés, fonctionnalisés ou biosourcés, ajustés pour discriminer les métaux ciblés même en milieu acide.

Les procédés électrochimiques, bien qu'encore marginaux, combinent plusieurs fonctions dans une même cellule, et permettent de récupérer les métaux avec un fort potentiel d'intégration dans des procédés compacts. Il faut noter qu'aucune technologie ne répond seule à l'ensemble des contraintes techniques, économiques et environnementales : seule une combinaison raisonnée des étapes (pré-traitement, lixiviation optimisée, séparation, valorisation des co-produits) permettrait

un recyclage industriel robuste et durable. Cependant, ceci peut amener à une augmentation du nombre de briques de procédés d'hydrométallurgie à développer ou à adapter par rapport à l'existant, ce qui nécessite des méthodes de développement de procédés accélérées. Dans ce but, des dispositifs microfluidiques instrumentés (Maurice *et al.*, 2020), avec par exemple de l'ICP-MS (Hellé *et al.*, 2015) ou de la fluorescence X en ligne, ont été développés, qui permettent d'étudier en temps réel des étapes d'extraction liquide-liquide (Olivier *et al.*, 2023), solide liquide (Olivier *et al.*, 2023) ou membranaire (Theisen *et al.*, 2019). Ils permettent de faire en quelques jours ou semaines l'équivalent de mois d'études.

Les procédés non conventionnels comme l'ionométallurgie, la solvométallurgie ou les fluides supercritiques offrent de nouvelles perspectives en matière de sélectivité et de circularité. Les liquides ioniques, solvants eutectiques profonds, voire les saumures sont modulables, régénérables et recyclables, combinent sélectivité et durabilité, à condition d'en maîtriser la physicochimie dans des systèmes complexes (Micheau *et al.*, 2020 ; Binnemans *et al.*, 2017 ; Xu *et al.*, 2022, Zante *et al.* 2023). Les technologies au CO₂ supercritique promettent efficacité et compatibilité avec les principes de l'économie circulaire, bien qu'elles nécessitent encore des optimisations (Reisdorfer *et al.*, 2020, Deng *et al.*, 2024). Les procédés électrochimiques par électro-lixiviation, électrodialyse, électro-sorption, ou électrodéposition constituent une voie de plus en plus étudiée pour la récupération des métaux stratégiques (Rai *et al.*, 2021 ; Akca Guler *et al.*, 2025).

Ainsi, qu'il s'agisse d'oxydation anodique, de dissolution directe ou de précipitation sélective, toutes ces approches électrochimiques offrent une grande souplesse, et permettent de s'affranchir en partie de la complexité des voies pyrométallurgiques ou hydrométallurgiques conventionnelles. Enfin, les biotechnologies telles que la biolixiviation, la biosorption ou la biominéralisation offrent des voies écologiques et sélectives pour extraire les cations métalliques de matrices complexes (Rasoulnia *et al.*, 2021), en mobilisant des mécanismes biologiques variés (acidolyse, complexolyse, redoxolyse, interactions ioniques ou précipitations microbiennes). Bien que leur déploiement à l'échelle industrielle reste encore limité à quelques cas dans les secteurs miniers ou de la mine urbaine, leur potentiel en matière de durabilité et de réduction d'impact environnemental est considérable, à condition de lever les verrous liés à la lenteur des cinétiques de dissolution, à la variabilité des substrats, ou à l'encaînement réglementaire des organismes utilisés.

Conclusion

L'avenir du recyclage des métaux stratégiques réside dans une connaissance qualitative et maîtrisée des flux et une approche systémique combinant technologies matures et émergentes, où chaque brique technologique est choisie en fonction du flux traité, des contraintes spécifiques et des exigences économiques et environnementales.

Références

- AKCA-GULER T., YUKSEKDAG A., KOSE-MUTLU B. & KOYUNCU I. (2025), "Advances in electrochemical methods for rare earth elements recovery: A comprehensive review", *Process Safety and Environmental Protection*, 196, 106897.
- BARTHET A. *et al.* (2024), "Advanced granulometric characterization of shredded waste printed circuit boards for sampling", *Waste Management Journal*.
- BELFQUEH S., SERON A., CHAPRON S., ARRACHART G. & MENAD M. (2023), "Evaluating organic acids as alternative leaching reagents for rare earth elements recovery from NdFeB magnets" *Journal of Rare Earths*, 41, pp. 621-631.
- BINNEMANS K. & JONES P. T. (2017), "Solvometallurgy: An emerging branch of extractive metallurgy", *J. Sustain. Metall.*, 3, pp. 570-600.
- BINNEMANS K., JONES P. T., BLANPAIN B., VAN GERVEN T., YANG Y., WALTON A. & BUCHERT M. (2013), "Recycling of rare earths: A critical review", *Journal of Cleaner Production*, 51, pp. 1-22.
- BORRINI J., BERNIER G., PELLET-ROSTAING S., FAVRE-RÉGUILLON A. & LEMAIRE M. (2010), "Separation of Lanthanides(III) by inorganic nanofiltration membranes using a water soluble complexing agent", *Journal of Membrane Science*, 348, pp. 41-46.
- CHARPENTIER N. M., MAURICE A. A., XIA D., LI W. J., CHUA C. S., BRAMBILLA A. & GABRIEL J. C. P. (2023), "Urban mining of unexploited spent critical metals from e-waste made possible using advanced sorting", *Resour. Conserv. Recycl.*, 196, 107033.
- CHARPENTIER N. M., XIA D. & GABRIEL J. C. P. (2024), "Printed circuit board recycling: Focus on a novel efficient and sustainable process for spent critical metals recovery", *Comptes Rendus Chim.*, 27(S4), pp. 5-15.
- DENG C., ZHANG X., GUO F., WANG S. & WANG X. (2025), "The current status of recycling technology for waste NdFeB resources", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 27, pp. 796-811.
- DENG Y., XIA D., BOURGEOIS D., MEYER D., CAMPIDELLI S., ISNARD H., FRANCOIS V., RONCERAY ROBIN, REYGNER B. & GABRIEL, J. C. P. (2024), "Maximised lanthanide extraction by supercritical CO₂ extraction using fluorinated organophosphate extractants", *ACS Sustainable Resource Management*, 1(8) pp. 1780-1790.
- EL MAANGAR A., FLEURY C., PELLET-ROSTAING S. & ZEM T. (2024), "Leaching and recycling of NdFeB permanent magnets using ionic non-toxic hydrotropes instead of extractants", *Frontiers in Chemical Engineering*, 6:1420008.
- GKIKI J. K., CHALARIS M. & KYZAS G. Z. (2024), "Review of methods for obtaining rare earth elements from recycling and their impact on the environment and human health", *Processes*, 12, 1235.
- GY P. (1992), *Sampling of Heterogeneous and Dynamic Material Systems*, Amsterdam, Elsevier.

- HABIBZADEH A., ALIKUCUKER M. & GÖKELMA M. (2023), "Review on the parameters of recycling NdFeB magnets via a hydrogenation process", *ACS Omega*, 8, pp. 17431–17445.
- HAN B., CHEVRIER S. M., YAN Q. & GABRIEL J. C. P. (2023), "Tailorable metal-organic framework based thin film nanocomposite membrane for lithium recovery from wasted batteries", *Sep. Purif. Techno.*, 334, 125943.
- HAN B., LIU Z., XIA D., ZANTE G., YAN Q. & GABRIEL J. C. P. (2025), "Enhanced silver recovery from electronic wastes using ionic liquid-integrated nanocomposite membrane", *Sep. Purif. Techno.*, 366, 132689.
- HELLÉ G., MARIET C. & COTE G. (2015), "Liquid-liquid extraction of uranium (VI) with Aliquat® 336 from HCl media in microfluidic devices: Combination of micro-unit operations and online ICP-MS determination", *Talanta*, 139, pp. 123-131.
- HUBAU A. *et al.* (2022), "Estimation of uncertainty for measuring metals content in waste printed circuit boards", *Proceedings of the 10th World Conference on Sampling and Blending*.
- MAURICE A., THEISEN J. & GABRIEL J. C. P. (2020), "Microfluidic lab-on-chip advances for liquid-liquid extraction process studies", *Current Opinion In Colloid & Interface Science*, 46, pp. 20-35.
- MICHEAU C., ARRACHART G., TURGIS R., LEJEUNE M., DRAYE M., MICHEL S., LEGEAI S. & PELLET-ROSTAIN S. (2020), "Ionic liquids as extraction media in a two-steps eco-friendly process for selective Tantalum recovery", *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8, pp. 1954-1963.
- NI'AM A. C., WANG Y.-F., CHEN, SHENG S.-W. & YOU J. (2019), "Recovery of rare earth elements from waste permanent magnet (WPMs) via selective leaching using the Taguchi method", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 97, pp. 137-145.
- OLIVIER F. L., CHEVRIER S. M., KELLER B. & GABRIEL J. C. P. (2023), "On-line quantification of solid-phase metal extraction efficiencies using instrumented millifluidics platform", *Chem. Eng. J.*, 454(3), 140306.
- OLIVIER F., MAURICE A. A. & GABRIEL J. C. P. (2022), "Liquid-liquid extraction: Thermodynamics-kinetics driven processes explored by microfluidics", *Comptes Rendus Chim.*, 25, pp. 137-148.
- RAABE D. (2023), "The materials science behind sustainable metals and alloys", *Chem. Rev.*, 123, pp. 2436-2608.
- RAI V., LIU D., XIA D., JAYARAMAN Y. & GABRIEL J. C. P. (2021), "Electrochemical approaches for the recovery of metals from electronic waste, a critical review", *Recycling*, 6(3), 53.
- RASOULNIA P., BARTHEN R. & LAKANIEMI A.-M. (2021), "A critical review of bioleaching of rare earth elements: The mechanisms and effect of process parameters", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(4), pp. 378-427.
- REISDÖRFER G., BERTUOL D. A., HIROMITSU E. & TANABE (2019), "Extraction of neodymium from hard disk drives using supercritical CO₂ with organic acids solutions acting as cosolvents", *Journal of CO₂ Utilization*, <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.10.008>
- SHUKLA N. & DHAWAN N. (2022), "Comparison of processing routes for recovery of rare earth elements from discarded fluorescent lamp phosphors", *Minerals Engineering*, 187, 107759.
- TANAKA Y., ZHANG Q.W. & SAITO F. (2002), "Sonochemical recovery of metals from recording media", *J. Chem. Eng. Jpn.*, 35, pp. 173-177.
- THEISEN J., PENISSON C., REY J., ZEMB T., DUHAMET J. & GABRIEL J. C. P. (2019), "Effects of porous media on extraction kinetics: Is the membrane really a limiting factor?", *J. Memb. Sc.*, 486, pp. 318-325.
- TOUZÉ S. *et al.* (2024), "Estimation of the uncertainty of metal content in a batch of waste printed circuit boards from computer motherboards", *Waste Management journal*.
- VUPPALADADIYAM S. S. V., THOMAS B. S., KUNDU C., VUPPALADADIYAM A. K., DUAN H. & BHATTACHARY S. (2024), "Can e-waste recycling provide a solution to the scarcity of rare earth metals? An overview of e-waste recycling methods", *Science of the Total Environment*, 924, 171453.
- XIA D., CHARPENTIER N. M., MAURICE A. A., BRAMBILLA A., YAN Q. & GABRIEL J. C. P. (2022), "Sustainable route for Nd recycling from waste electronic components featured with unique element-specific sorting enabling simplified hydrometallurgy", *Chem. Eng. J.*, 441, 135886.
- XU J., LIU D., LEE C., FEYDI P., CHAPUIS M., YU J., BILLY E., YAN Q. & GABRIEL J. C. P. (2022), "Efficient electrocatalyst nanoparticles from upcycled Class II capacitors", *Nanomaterials*, 12(15), 2697.
- YANG D., YU M., ZHAO Y., CHENG M. & MEI G. (2023), "Leaching kinetics of Y and Eu from waste phosphors under microwave irradiation", *Processes*, 11, 1939.
- ZANTE G., ELGAR C. E., GEORGE K., ABBOTT A. P. & HARTLEY J. M. (2023), "Concentrated ionic fluids: Is there a difference between chloride-based brines and deep eutectic solvents?", *Angew. Chemie Int. Ed.*, 62(46), e202311140.

Le recyclage, une contribution indispensable mais forcément limitée à la sécurisation des approvisionnements

Par Yannick MÉNARD

Directeur adjoint de la direction des Ressources minérales au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)

Et Stéphane BOURG

Directeur de l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI)

Les métaux stratégiques (lithium, cobalt, nickel, gallium, germanium, terres rares) sont essentiels à la double transition énergétique et numérique. Ils interviennent dans la fabrication de batteries, aimants, semi-conducteurs, fibres optiques, mais leur extraction pose des enjeux géopolitiques, environnementaux et sociaux majeurs. Le recyclage est souvent présenté comme une solution pour réduire la pression sur les ressources primaires, limiter les impacts et renforcer l'autonomie stratégique (UNEP, 2011). Pourtant, la disponibilité des métaux recyclés demeure faible à cause de contraintes techniques, économiques et structurelles. Dans cet article, nous analysons ces limites freinant une filière de recyclage viable, et proposons des pistes pour une gestion plus durable et souveraine des ressources critiques (IEA, 2024).

Introduction

Les transitions énergétique et numérique reposent sur des métaux stratégiques indispensables aux technologies innovantes même si les quantités peuvent être faibles : par exemple, lithium, cobalt et nickel pour les batteries, terres rares pour les aimants, gallium pour les semi-conducteurs, indium pour les pour écrans tactiles, germanium pour les fibres optiques. Leur production s'appuie sur des chaînes complexes, souvent concentrées dans des pays à gouvernance instable ou, lorsqu'elle est stable, avec des stratégies de conquête. Le recyclage apparaît comme une solution d'avenir pour diminuer la dépendance aux importations, réduire les impacts environnementaux et sécuriser l'approvisionnement. Pourtant, les taux de recyclage restent très bas (moins de 1 % pour plusieurs métaux (Talens Peiro *et al.*, 2018)). Cette situation s'explique par des freins techniques (absence d'usage historique, dispersion, complexité des déchets), économiques (coût élevé, marchés instables), géopolitiques (concentration industrielle) et systémiques (absence d'écoconception, obsolescence rapide, effet rebond). Dans cet article, nous proposons une analyse critique des limites actuelles du recyclage de ces métaux.

Limites techniques du recyclage des métaux stratégiques

Connaissance des gisements, performances technique et économique des opérations de traitement

Contrairement aux gisements miniers primaires, les gisements urbains que sont les produits en fin de vie comme les déchets électroniques et batteries usagées sont très hétérogènes et évolutifs, ce qui complique leur caractérisation (Kumari, 2022). L'obsolescence rapide des équipements rend les flux de matières difficiles à anticiper : un smartphone de 2020 ne contient pas les mêmes matériaux, ni dans les mêmes proportions, qu'un modèle de 2025.

La chaîne de recyclage repose sur plusieurs étapes clés : collecte, tri, préparation mécanique et métallurgie extractive. Même si chacune de ces étapes a une performance de 90 % (ce qui serait déjà très performant), la performance combinée ne dépassera pas 65 %, ce qui est relativement faible. Une étape défectueuse compromet l'efficacité de l'ensemble du processus. Ainsi, le tri s'avère particulièrement complexe dans le cas des équipements composites miniaturisés. De son côté, la métallurgie doit gérer des matériaux de compositions variables et des volumes souvent trop faibles pour justifier des procédés

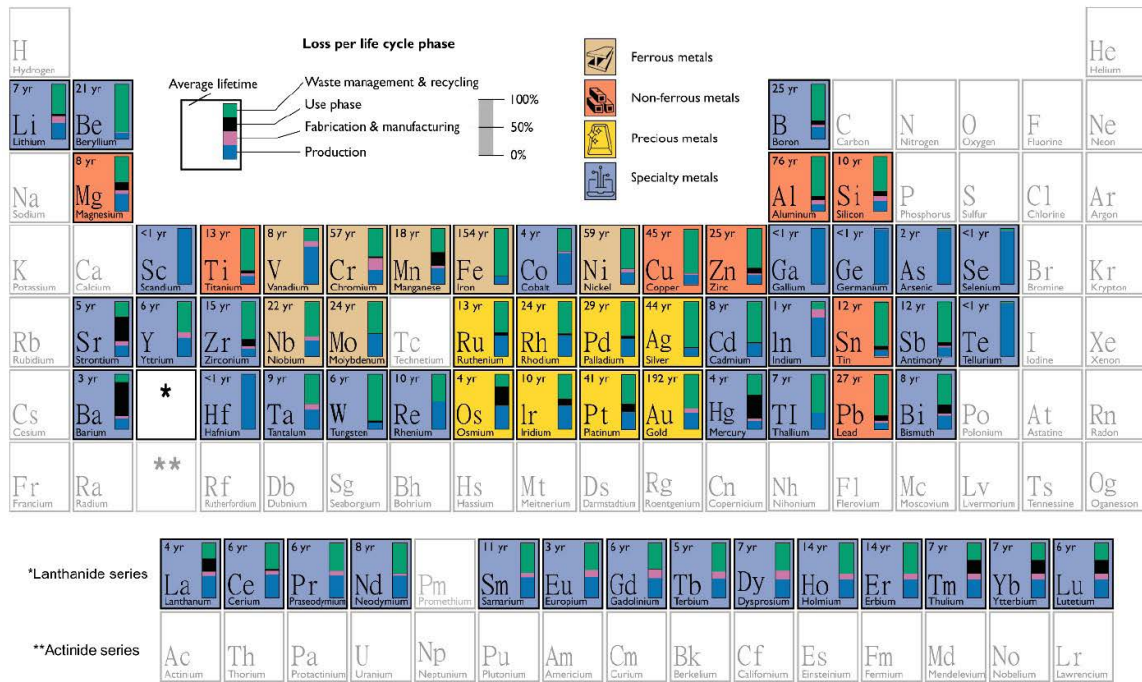


Figure 1 : Répartition des pertes de métaux au cours des phases de cycle de vie et durée de vie des métaux dans l'économie (Source : Charpentier Poncelet, 2021). Ce tableau périodique modifié intègre pour chaque métal une couleur désignant la famille (métaux ferreux, non-ferreux, précieux, de spécialité), une barre verticale multicolore indiquant les contributions à la perte en métal à chaque étape du cycle de vie (production, fabrication d'objets manufacturés, utilisation des objets et gestion des déchets post-consommation) et une durée de vie moyenne dans l'anthroposphère au terme de laquelle le métal est considéré comme totalement dissipé.

coûteux. Enfin, même les technologies de recyclage les plus avancées n'atteignent jamais un taux de récupération de 100 % (limitation physique intrinsèque liée à l'entropie), entraînant inévitablement des pertes de matière. À cela s'ajoutent des usages « dispersifs », qui accentuent la dissémination des métaux dans la technosphère, selon des temporalités propres à chaque usage (cf. Figure 1).

Certaines technologies comme l'hydrométallurgie sont performantes, mais restent chères, faute d'économies d'échelle. Si l'aluminium ou le cuivre bénéficient de filières matures, ce n'est pas le cas du lithium ou des terres rares, pour lesquels le recyclage peine à être compétitif face aux matières premières primaires (Hamzat, 2025).

Dispersion et mélanges métalliques

Les métaux stratégiques sont souvent présents en très faibles quantités dans des produits miniaturisés et composites, rendant leur récupération complexe et coûteuse. Une voiture thermique contient moins de 150 g de terres rares, dispersés dans plusieurs centaines d'aimants intégrés dans autant de composants. Pour recycler les terres rares de ces aimants, il faut récupérer chaque composant, le démonter pour extraire l'aimant pesant souvent moins de 500 mg, avant de le recycler par hydrométallurgie pour produire des oxydes de néodyme, praséodyme et dysprosium. Ainsi, la miniaturisation, bien qu'elle contribue à améliorer la performance, le confort d'usage et la sécurité des produits, complique considérablement les opérations de récupération des métaux critiques.

Les technologies modernes (aéronautique, électronique, automobile) utilisent des alliages aux compositions élaborées pour répondre à des exigences de performance extrême (résistance, légèreté, conductivité). Ces alliages

contiennent souvent plusieurs métaux stratégiques intimement liés dans des concentrations souvent inférieures à celles qu'ils peuvent avoir dans les minerais de départ, ce qui rend leur séparation extrêmement difficile (Alcoceba-Pascual, 2025). Ainsi, le recyclage d'un alliage peut nécessiter davantage d'énergie et de traitements chimiques que l'extraction primaire de ces métaux à partir de minerais naturels.

Les données actuelles montrent que les taux de recyclage en fin de vie restent dramatiquement faibles pour de nombreux métaux critiques : moins de 1 % pour les terres rares et le lithium, autour de 30 % pour le cobalt (cf. Figure 2). Ces chiffres traduisent autant des limites technologiques que des lacunes dans la collecte, le tri, ou encore dans la conception des produits.

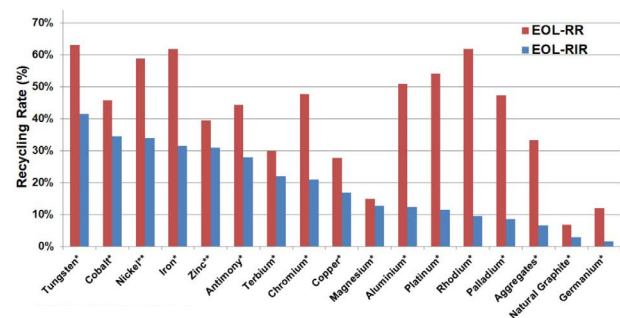


Figure 2 : Taux de recyclage (Recycling Rate – RR) et contribution du recyclage à la consommation (Recycling Input Rate – RIR) pour 17 substances minérales (Source : Talens Peiro, 2018).

Absence d'éco-conception

La plupart des produits contenant des métaux stratégiques ne sont pas conçus pour faciliter leur recyclage (Ciacci, 2015). Les smartphones, très compacts et fonctionnels,

sont difficiles à démonter, avec des composants soudés ou collés. Les technologies nécessaires au démantèlement (robots, solvants, traitements thermiques) restent coûteuses à déployer à grande échelle.

Paradoxalement, certaines stratégies d'éco-conception, telles que la réduction du nombre de pièces, l'intégration fonctionnelle, ou l'économie d'atomes peuvent nuire à la recyclabilité. La diminution des teneurs de certaines espèces métalliques (par exemple, dysprosium dans les aimants permanents Nd₂Fe₁₄B) rend les procédés de recyclage de ces aimants économiquement non rentables. Il existe donc des conflits entre les objectifs de sobriété matérielle, de performance fonctionnelle, et de circularité.

Contraintes économiques, industrielles et géopolitiques

Recyclage versus extraction primaire

Contrairement à une idée reçue, le recyclage d'un métal n'est pas toujours moins coûteux que sa production primaire, ni forcément plus vertueux d'un point de vue environnemental. Il implique des coûts importants liés à la collecte, au tri, au démantèlement, au traitement des déchets toxiques et à l'investissement dans des technologies non amorties. Les acteurs historiques disposant d'infrastructures consolidées (Umicore, Boliden) sont les mieux placés pour rendre le recyclage compétitif, surtout lorsqu'ils se concentrent sur la récupération des matières qui sont dans leur cœur de métier de miniers, et lorsqu'ils peuvent mutualiser les installations (Söderholm, 2020).

Par ailleurs, la baisse des coûts logistiques liée à des énergies fossiles bon marché renforce l'avantage économique de l'extraction primaire dans certains pays. Le recyclage dépend aussi de la qualité et disponibilité locale des déchets, ainsi que des prix mondiaux, le rendant souvent marginal économiquement.

La forte volatilité des prix des métaux stratégiques complique les décisions d'investissement dans le recyclage, dont la rentabilité repose souvent sur des seuils de prix élevés. En période de prix bas, les filières émergentes ne sont pas viables, décourageant les industriels d'investir à long terme. Cette incertitude est un frein majeur à la sécurisation d'approvisionnements circulaires (Righetti, 2023).

Dépendance aux chaînes mondialisées

Alors que l'Europe souhaite relocaliser certaines étapes pour renforcer son autonomie, le recyclage s'insère dans des chaînes globales. Collecter et trier localement ne suffit pas si les étapes critiques de traitement, raffinage et re-fabrication restent à l'étranger.

La Chine, et plus largement l'Asie, occupent une position dominante dans les étapes de transformation et de raffinage des métaux stratégiques, y compris ceux issus du recyclage. Ce monopole structurel limite les capacités des pays européens à valoriser localement les ressources secondaires collectées sur leur territoire. Les déchets doivent parfois être exportés vers l'Asie pour y être traités, ce qui accentue la dépendance

et réduit la résilience du système. C'est par exemple toujours le cas de la *black mass*, produit intermédiaire du recyclage des batteries tel qu'il est mis en œuvre en Europe aujourd'hui, qui, bien que contenant la totalité des métaux stratégiques, est envoyée en Chine pour être traitée, en raison de l'absence d'installations adaptées en Europe.

Le savoir-faire est concentré chez peu d'acteurs, et sa duplication nécessite des investissements lourds et des politiques industrielles coordonnées. En l'absence de stratégie, l'Europe risque ainsi de rester cantonnée à des activités de collecte et de pré-traitement, sans réelle valeur ajoutée.

Cadres réglementaires et modèles économiques inadaptés

La collecte des produits en fin de vie reste insuffisante faute d'incitations économiques adaptées, et de nombreux objets stratégiques échappent aux filières officielles, alimentant exportations illégales ou stockage domestique prolongé (qui n'a pas chez soi un vieux téléphone obsolète au fond d'un tiroir... ?).

L'absence de normes internationales sur la qualité des matériaux recyclés et le manque de traçabilité des flux de matières limitent la confiance des industriels dans les matériaux secondaires. Cela freine l'intégration de ces matériaux dans des chaînes de production exigeantes, comme l'automobile ou l'aéronautique. Une meilleure structuration réglementaire est donc nécessaire pour garantir la qualité, l'origine et la conformité environnementale des matériaux recyclés.

Par ailleurs, certaines réglementations européennes ont paradoxalement favorisé l'importation de matériaux recyclés à bas prix d'Asie, fragilisant les filières locales, comme pour les plastiques recyclés où les projets de recyclage en France, portés par des acteurs comme PAPREC ou SUEZ, ont été mis à mal. Cette situation pourrait se reproduire pour les batteries si des exigences réglementaires (cf. CRM Act, au moins 25 % de la consommation domestique européenne provenant du recyclage à l'horizon 2030, European Commission, 2023) ne s'accompagnent pas de mécanismes de contrôle sur la performance environnementale et la traçabilité des matières recyclées. En particulier, une vigilance spécifique sera à apporter sur les contrôles et critères d'importation en Europe, si on souhaite favoriser le développement d'industries européennes de recyclage.

Limites systémiques et leviers d'action

Le recyclage seul ne suffit pas

Les besoins en métaux critiques explosent avec la transition énergétique (batteries, aimants, composants électroniques). Or, le recyclage dépend de la disponibilité des produits arrivant en fin de vie aujourd'hui, qui ont, eux-mêmes, été produits plusieurs années auparavant (5 ans pour un téléphone, 20 ans pour une batterie...), créant un décalage temporel entre les besoins et la consommation actuelle et les flux recyclables disponibles. Dans un monde où la technologie évolue rapidement

comme aujourd'hui, et dans un marché en croissance, il est donc impossible de répondre aux besoins uniquement par le recyclage.

Vers une économie circulaire

Allonger la durée de vie des produits par réparabilité, modularité, mises à jour, réutilisation est la première voie pour limiter l'extraction. Mais cela exige aussi que nous ayons une consommation responsable face à la pression commerciale pour des modèles neufs, et retarde d'autant l'arrivée des produits en fin de vie disponibles pour le recyclage.

L'éco-conception doit faciliter le démontage par une architecture simplifiée, des matériaux compatibles, une meilleure accessibilité des composants critiques, une standardisation (batteries, connectiques...). Par exemple, privilégier le vissage au collage ou éviter la dispersion dans des mélanges métalliques irréversibles.

Un changement de paradigme est nécessaire : passer d'une logique centrée sur l'offre de déchets à une approche partant du besoin final du produit à fabriquer, avec un *"design from recycled"*, impliquant une collaboration étroite entre concepteurs, recycleurs et industriels (Martinez Leal, 2020).

Mutualiser les capacités de traitement au niveau régional ou européen pourrait créer des économies d'échelle, stabiliser l'offre et réduire les coûts, dépassant les logiques concurrentielles.

Diversifier les sources d'approvisionnement (déchets post-consommation, industriels, concentrés minéralurgiques) est aussi indispensable pour assurer une continuité et une meilleure composition des flux.

Nécessité d'une gouvernance stratégique des métaux critiques

L'Union européenne a mis en place la Réglementation sur les matières premières critiques (Critical Raw Materials Act) pour favoriser un accès sûr, durable et circulaire aux matières critiques, axée sur une relocalisation et un développement de l'extraction, de la transformation et du recyclage, mais aussi l'innovation et la substitution. Ce cadre doit encore être renforcé par des incitations concrètes, normes techniques, financements et partenariats industriels pour transformer les chaînes de valeur.

Les stratégies nationales comme France 2030 misent aussi sur le développement des filières de recyclage avancé et la R&D pour dépasser les verrous technologiques (hydrométallurgie, bio-métallurgie). Mais ces stratégies gagneraient à être mieux articulées entre elles, à l'échelon européen, pour éviter les redondances, mutualiser les ressources et bâtir une vision industrielle commune.

Conclusion

Le recyclage des métaux stratégiques est une pièce essentielle de la transition vers une économie durable et souveraine. Cependant, il est confronté à des limites

techniques majeures (complexité des déchets, faible teneur), des contraintes économiques fortes (coûts élevés, marchés volatils) et des enjeux géopolitiques liés à la concentration industrielle mondiale. Sans une éco-conception généralisée, une meilleure collecte, un soutien public fort et une coordination européenne renforcée, le recyclage ne pourra pas prendre toute sa place. Son développement ne pourra se faire qu'en développant une approche systémique intégrant durabilité, sobriété, innovation technologique et coopération industrielle et politique. De plus, quelle que soit sa performance, le recyclage ne pourra jamais couvrir plus qu'une part limitée des besoins futurs à partir du moment où les technologies évoluent et les besoins augmentent. Cela ne doit pas être un frein à son développement, mais doit permettre un juste dimensionnement des attentes sociétales et économiques exprimées vis-à-vis du recyclage.

Bibliographie

- ALCOCEBA PASCUAL S. *et al.* (2025), "Evaluating the recyclability of electronic car parts through disassembly, thermodynamic and metallurgical analyses", *J. of Cleaner Prod.*, vol. 513.
- CHARPENTIER PONCELET A. (2021), *Addressing the dissipation of mineral resources in life cycle assessment*, Université de Bordeaux.
- CIACCI L. *et al.* (2015), "Lost by design", *Env. Science & Technology*, 49(16).
- EUROPEAN COMMISSION (2023), "European Critical Raw Materials Act", https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661, accessed 11 Jul 2023.
- HAMZAT A.K. *et al.* (2025), "Rare earth element recycling: A review on sustainable solutions and impacts on semiconductor and chip industries", *J Mater Cycles Waste Manag.*
- KUMARI R. *et al.* (2022), "A critical review of the pre-processing and metals recovery methods from e-wastes", *J. of Env. Management*, vol. 320.
- MARTINEZ LEAL, J. *et al.* (2020), "Design for and from recycling: A circular ecodesign approach to improve the circular economy", *Sustainability*, 12(123).
- RIGHETTI E. *et al.* (2023), "The EU's quest for strategic raw materials: What role for mining and recycling?" *Intereconomics*, vol. 58(2).
- SÖDERHOLM P. *et al.* (2020) "Metal markets and recycling policies: Impacts and challenges", *Mineral Economics*, vol. 33.
- TALENS PEIRO L. *et al.* (2018), "Towards recycling indicators based on EU flows and raw materials system analysis data", EUR 29435 EN, Publications Office of the European Union.
- UNEP (2013), "Metal recycling: Opportunities, limits, infrastructure, a report of the working group on the global metal flows to the international".

Ressources minérales : un nouvel inventaire pour renforcer la souveraineté de la France

Par Dr. Blandine GOURCEROL

Cheffe de projet et experte scientifique au Bureau de Recherches géologiques et minières (BRGM)

Et Karim BEN SLIMANE

Directeur du projet d'inventaire national des ressources minérales et préfigurateur de la filiale BRGM Explore

Face aux tensions internationales sur les matières premières et à la demande croissante, liées aux transitions énergétique et numérique, la sécurisation des approvisionnements en ressources minérales est devenue une priorité nationale. Un demi-siècle après le premier inventaire du sous-sol français, la France engage, sous l'impulsion de l'État et avec l'appui du BRGM, un programme ambitieux d'actualisation de la connaissance géologique nationale. L'objectif étant d'identifier, de cartographier et de caractériser les zones favorables à la présence de substances minérales, en s'appuyant sur les méthodes d'investigation et d'analyse les plus innovantes.

Introduction

À l'heure où les transitions énergétique et numérique transforment en profondeur nos économies, l'accès aux ressources minérales critiques et stratégiques est devenu un enjeu central de souveraineté. Le lithium, le graphite, le tungstène ou encore l'antimoine sont désormais indispensables à la fabrication des batteries, d'éoliennes ou de composants électroniques. Or, ces chaînes d'approvisionnement, souvent concentrées dans quelques pays, sont vulnérables aux tensions géopolitiques et aux fluctuations de marché. Pour réduire cette dépendance, la France et l'Union européenne ont engagé une série d'actions stratégiques au travers, notamment, du CRM Act (cf. "The current state of the European Union's dependency and its policies", pp. 42-46), dont l'actualisation de l'inventaire national des ressources minérales (IRM) constitue une étape clé.

Un héritage précieux, mais incomplet

Notre connaissance actuelle des ressources minérales s'appuie sur un socle de travaux réalisés il y a plusieurs décennies. Entre 1975 et 1995, le BRGM, sur mandat de l'État, avait mené une vaste campagne d'évaluation du potentiel métallifère du territoire. Cette initiative s'inscrivait dans un contexte de tensions fortes sur l'énergie et les matières premières, marqué notamment par le choc pétrolier de 1973. Cet événement avait mis en évidence la dépendance de la France aux approvisionnements

étrangers, et la vulnérabilité des économies industrialisées aux variations des marchés mondiaux. Face à ce constat, les pouvoirs publics avaient engagé une stratégie visant à mieux connaître les ressources présentes sur le sol national, afin de limiter la dépendance à l'égard de métaux indispensables à l'industrie et à la défense, tels que le tungstène, l'or ou le cuivre.

L'inventaire de l'époque avait porté sur environ 125 000 km² en Hexagone, principalement dans les grands massifs anciens – Massif central, Massif armoricain, et socle des Pyrénées et des Alpes – ainsi qu'en Guyane. Les campagnes de terrain et analyses de laboratoire avaient abouti à l'examen de plus de 345 000 échantillons en Hexagone, permettant d'identifier plus d'une centaine de sites prometteurs sur le territoire hexagonal et près d'une vingtaine en Guyane. Ces résultats avaient marqué une avancée considérable pour la compréhension du potentiel minier national mais aussi sur l'actualisation de la connaissance géologique de la France.

Cependant, les moyens techniques disponibles à la fin du XX^e siècle limitaient la portée de ces travaux. Tout d'abord, les analyses chimiques courantes ne couvraient qu'une vingtaine d'éléments (bien en deçà des 34 métaux stratégiques européens actuels par exemple) à la fin des années 1990 (contre 10 seulement dans les années 1970), et leurs seuils de détection ne permettaient pas d'identifier des concentrations faibles, ce qui pouvait limiter les interprétations.

Aujourd'hui, les techniques permettent d'analyser simultanément plus d'une soixantaine d'éléments, dont de nombreux métaux dits critiques, offrant une vision beaucoup plus fine et pertinente des gisements.

En outre, les méthodes employées à l'époque reposaient essentiellement sur des observations et échantillonnages de surface. Les outils géophysiques, aujourd'hui incontournables pour détecter des structures ou minéralisations localisées en profondeur, n'étaient pas suffisamment performants et n'avaient pas été intégrés. Cette absence a conduit à une couverture inégale et à une méconnaissance des ressources potentiellement présentes en profondeur.

Néanmoins, ce corpus de connaissances a constitué le socle de données sur lequel a pu être conçu un nouveau programme d'exploration stratégique, la synthèse et la réinterprétation des données historiques constituant la première phase du projet.

Un outil réinventé pour le XXI^e siècle

Depuis, le paysage géopolitique et les besoins technologiques ont radicalement évolué. Les besoins en métaux se sont diversifiés, avec une exigence croissante de pureté et de spécificité, portés par les transitions énergétique et numérique, tandis que les tensions internationales (guerre en Ukraine et tensions géostratégiques, rivalités commerciales, sécurisation des chaînes d'approvisionnement) renforcent la nécessité de disposer d'informations fiables sur le potentiel minéral du sous-sol national.

Ce nouvel inventaire élargit considérablement son champ d'étude : il couvre environ soixante éléments chimiques, incluant les 34 métaux critiques et stratégiques identifiés par l'Union européenne, et prend en compte des zones géologiques jusqu'ici peu explorées, comme certains bassins sédimentaires peu profonds jouant un rôle de

réceptacle pour certaines minéralisations. Les méthodes mobilisées sont à la pointe : géophysique aéroportée et terrestre ; géochimie multi-élément à haute sensibilité ; modélisation 3D du sous-sol ; et intelligence artificielle pour la détection de cibles et l'analyse intégrée des données historiques. L'objectif est de fournir une lecture précise et prédictive des systèmes minéralisés, tout en réduisant l'impact environnemental des investigations, puisque aucun creusement ou sondage n'est programmé.

Des zones prioritaires définies selon leur potentiel

Un premier programme sur cinq années (2024-2029) a été lancé pour évaluer le potentiel minéral de cinq zones jugées prioritaires pour leurs perspectives de découvertes : l'Ouest du Massif central, le secteur Morvan-Brévenne, les Vosges, l'Occitanie-Cévennes et le Nord de la Guyane (voir la Figure 1 ci-dessous).

Ces zones couvrent des contextes géologiques contrastés : massifs cristallins magmatiques (Massif central, Vosges) et ensembles sédimentaires (Pyrénées), offrant un large spectre de substances métalliques. Les terrains magmatiques du Nord du Massif central et des Vosges sont particulièrement prometteurs pour le lithium, exploitable à la fois en roche dure et par les systèmes géothermiques. Le Morvan-Brévenne conserve un fort potentiel en fluorine, antimoine, uranium et gisements cuprifères polymétalliques.

Le choix du périmètre résulte d'un arbitrage visant à combiner pertinence scientifique, enveloppe budgétaire et efficacité opérationnelle, en s'appuyant sur les particularités géologiques propres à chaque secteur. Plusieurs de ces zones abritent déjà des indices minéralisés répertoriés lors du précédent inventaire minier, mais dont les prolongements latéraux et profonds restent largement inexplorés. Elles pourraient receler

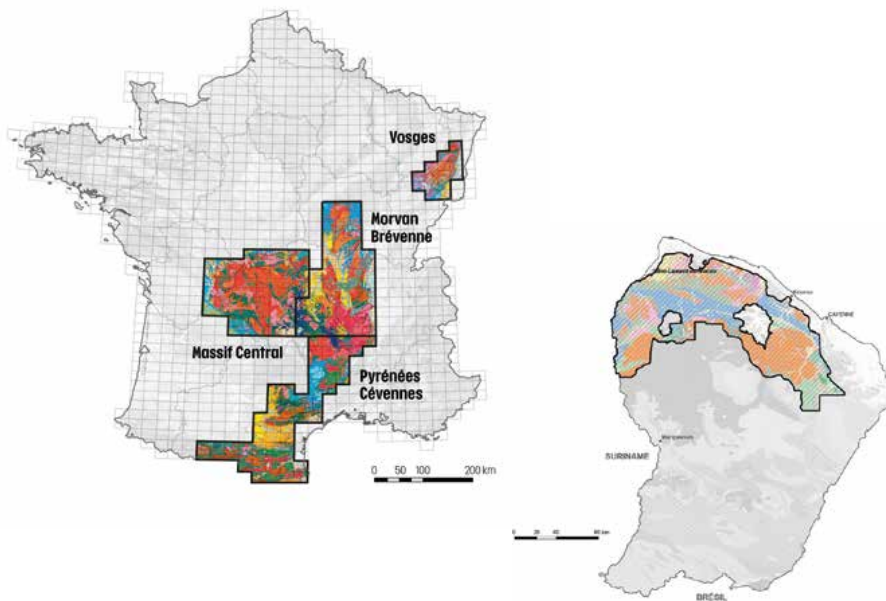


Figure 1 : Répartition géographique des secteurs investigués dans l'inventaire des ressources minérales 2024-2029 (Source : BRGM).



Figure 2 : Campagne géochimique dans le Massif central (© : F. Romain - BRGM Explore).

des métaux critiques et stratégiques, parfois non identifiés analytiquement par le passé.

Dans les contextes sédimentaires, les Pyrénées orientales et la Montagne Noire sont réputées pour leurs minéralisations en tungstène, et présentent un fort potentiel en germanium. Les Cévennes se distinguent par leurs gisements plomb-zinc, souvent associés à l'antimoine, l'étain ou le cuivre. En Guyane, le Sillon Nord représente des bassins géologiques anciens d'âge précambrien, structurés par de grands accidents tectoniques et associés à des minéralisations variées : or, cuivre, plomb, zinc, lithium, niobium, tantale. La combinaison de l'ancienneté des terrains et de la complexité tectonique confère à ce secteur un potentiel remarquable pour la découverte de métaux critiques.

Campagnes géochimiques

L'exploitation du patrimoine, constitué par les échantillons historiques du précédent inventaire, a été la première phase de ce travail. Les échantillons ont été repositionnés dans les systèmes géoréférencés et réanalysés par les nouvelles techniques modernes multi-élémentaires.

Les premières opérations de terrain ont débuté dans les zones prioritaires, en concertation avec les détenteurs de permis miniers lorsque nécessaire. Ces campagnes consistent exclusivement en des prélèvements de sédiments fins de ruisseau (voir la Figure 2) analysés à l'aide de techniques à haute sensibilité permettant de détecter un large spectre d'éléments (type LA

ICP MS), dont la majorité des métaux critiques et stratégiques. L'objectif est d'identifier la distribution et la concentration des éléments d'intérêt, tout en améliorant la précision des cartes géochimiques existantes.

Campagnes géophysiques

En parallèle, des levés magnétiques (étude des variations du champ magnétique terrestre) et spectrométriques (étude du rayonnement gamma qui se dégage de la surface) aéroportés sont en cours dans plusieurs massifs : Vosges, Morvan, Brévenne et Cévennes. Dans les Vosges, des mesures gravimétriques (détection des variations locales du champ de pesanteur, reflétant les contrastes de densité dans le sous-sol) complémentaires ont déjà été réalisées. Ces opérations permettent d'imager les contrastes de propriétés du sous-sol sur plus d'un kilomètre de profondeur. Elles sont menées avec l'accord et l'appui des pouvoirs publics, en lien étroit avec les mairies concernées afin de garantir transparence et bonne information aux populations locales.

De plus, des secteurs plus ciblés et à enjeux géologiques seront dès 2026 investigués à partir de méthodes électromagnétiques. Celles-ci permettent d'imager les variations de conductivité électrique du sous-sol, depuis la surface jusqu'à quelques centaines de mètres de profondeur, selon le matériel utilisé (cf. Figure 3, page 78).

Au-delà de l'aspect technique, avec des mesures géochimiques et géophysiques éprouvées, le BRGM s'appuie sur sa filiale BRGM Explore pour le volet



Figure 3 : Campagne aéroportée électromagnétique réalisée en Auvergne–Rhône-Alpes en 2023
(Source : © A. Magnan - BRGM).

opérationnel, et sur des sous-traitants français et européens.

Approche intégrée et partenariale

Le croisement des données géophysiques et géochimiques, notamment *via* des modélisations 3D, permet d'optimiser le ciblage des zones à fort potentiel et de réduire les incertitudes sur la structure du sous-sol. Au-delà des campagnes d'acquisition, le programme s'inscrit dans une démarche de responsabilité sociétale : mise en place de formations diplômantes pour renforcer les compétences nationales en exploration minière, collaboration avec les acteurs du secteur (collectivités, entreprises, établissements académiques) et intégration des retours du terrain dans les stratégies d'exploration.

Cette combinaison de technologies modernes, d'expertise scientifique et de concertation territoriale fait de l'IRM un outil stratégique pour identifier de nouvelles ressources tout en veillant à minimiser l'impact environnemental et à maximiser la valeur créée pour la société.

Conclusion

L'actualisation de l'inventaire des ressources minérales marque une étape déterminante dans la connaissance et la valorisation du potentiel minéral national. En combinant des techniques d'exploration modernes, une approche intégrée des données et une concertation étroite avec les acteurs publics et privés, le programme

apporte des informations inédites sur les zones à fort intérêt géologique, tout en respectant des standards élevés de responsabilité environnementale et sociétale.

Les premières campagnes de terrain et levés géophysiques montrent déjà la pertinence de la méthodologie adoptée, confirmant que le sous-sol français recèle encore de ressources stratégiques susceptibles de contribuer à la transition énergétique et numérique, ainsi qu'à la résilience industrielle et la souveraineté du pays.

Au-delà de la production de données scientifiques, ce programme contribue à structurer un véritable écosystème national et européen de compétences autour des métiers de l'exploration et de la mine, grâce à la formation de nouveaux professionnels et au renforcement des collaborations entre institutions, recherche et industrie. Cette dynamique, inscrite dans la durée, permettra d'accompagner un futur renouveau minier en France et en Europe pour répondre aux besoins futurs en métaux critiques, mais aussi de positionner la France comme un acteur proactif dans la sécurisation et la gestion durable de ses ressources minérales.

Les demandes de permis minier : de l'exploration à l'exploitation

Par Jean-François GAILLAUD

Chef du bureau de la politique des ressources minérales - Ministère de la Transition écologique

Au regard des enjeux d'approvisionnement, la question de la valorisation du domaine minier national est au cœur des préoccupations de l'État, qui cherche à optimiser l'exploitation des ressources minérales stratégiques, tout en préservant les intérêts à long terme du pays.

Le code minier lui permet d'administrer les gisements de substances minières, qui appartiennent à la Nation. L'État peut attribuer à une entreprise l'exclusivité de rechercher ou d'extraire une substance demandée, après un processus de sélection reposant sur des critères techniques, financiers et environnementaux.

Le code minier a été modernisé à la suite de la loi climat et résilience du 22 août 2021 et des ordonnances du 13 avril et du 10 novembre 2022, complétées par le décret du 27 août 2025*, afin de mieux prendre en compte la nécessaire protection des intérêts environnementaux et de renforcer la participation du public et la consultation des collectivités territoriales dans les décisions concernant les activités minières. La stabilité et la prévisibilité de ce nouveau cadre réglementaire seront des facteurs clés pour attirer les capitaux nécessaires au développement de projets miniers d'envergure.

* <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000052142340> ; https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000052195450

Le code minier est un outil au service d'une politique industrielle de valorisation du sous-sol

Le cadre juridique applicable à l'industrie minérale est très ancien. Ses origines sont antérieures à la Révolution française, à une époque où le roi s'efforçait de contenir les ingérences des seigneurs sur les droits de la Couronne¹.

Après la Révolution, une première loi sur les mines a été examinée par l'Assemblée nationale, puis décrétée le 12 juillet 1791 et promulguée le 28 du même mois. Sous l'Empire, ensuite, cette loi a été abrogée et remplacée par la loi du 21 avril 1810 concernant les mines, les minières et les carrières. Cette seconde loi a fondé les principes fondamentaux du droit minier français : la classification des mines et carrières, la notion de substance concessible², une redevance payée à l'État, la distinction entre propriété de la mine et propriété du sol, une surveillance par l'administration et l'établissement d'une police des mines.

Une première codification est intervenue avec le décret n° 56-838 du 16 août 1956 portant code minier.

¹On peut citer à cet égard une ordonnance de Philippe V du 15 avril 1321, puis une de Charles VI du 30 mai 1413 : <https://www.annales.org/archives/juris.html>.

²Le code minier (L. 111-1 du code minier) désigne nommément les substances présentant un intérêt général pour l'État, notamment du fait de leur rareté, de leur valeur économique, voire de leur caractère stratégique, ainsi, dans certains cas, que les modalités d'exploitation dans le sous-sol profond nécessitant une maîtrise du foncier que seuls les pouvoirs publics peuvent organiser.

Ce code ne comportait qu'une partie législative. Ce n'est qu'en 2011 que le cadre législatif a été réorganisé à droit constant pour répondre aux derniers standards légistiques en la matière (code minier dit « nouveau »).

En conséquence de nombreuses controverses liées à des demandes de permis dans la décennie qui a suivi cette codification, et du regain d'intérêt pour les ressources de notre sous-sol, il est apparu nécessaire pour le gouvernement de refonder nos principes d'approvisionnement afin de disposer des outils juridiques nécessaires au développement de projets miniers responsables et compatibles avec notre ambition environnementale.

Cette réforme s'est concrétisée par l'introduction de nouvelles dispositions dans la loi du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et le renforcement de la résilience face à ses effets, et complétée par les ordonnances n°2022-536 du 13 avril 2022 modifiant le modèle minier et les régimes légaux relevant du code minier et n°2022-1423 du 10 novembre 2022 portant diverses dispositions relatives au code minier.

Il a été, notamment, introduit une meilleure prise en compte des enjeux environnementaux, économiques et sociaux des projets minières dès la demande du titre minier, et une harmonisation des procédures du code minier avec la procédure d'autorisation environnementale. Selon un schéma comparable, la loi renforce également la participation du public et la consultation des collectivités territoriales dans les décisions concernant les activités minières. Par ailleurs, elle donne la possibilité à l'État de refuser d'attribuer un titre en cas de doute sérieux sur la possibilité de procéder aux recherches ou à l'exploitation du gisement mentionné sans porter

une atteinte grave aux intérêts protégés du code minier (environnement, milieux, santé, sécurité...).

Ces dispositions s'appliquent dans leur intégralité aux demandes de titres faites depuis le 1^{er} juillet 2024. Elles devraient contribuer à la relance économique en accélérant les procédures de délivrance des titres miniers, mais également à définir une véritable stratégie pour l'exploitation des ressources de notre sous-sol.

La délivrance d'un permis exclusif de recherche s'inscrit dans un long processus administratif préalable à toute exploitation minière

L'État administre les gisements de substances minières, qui appartiennent à la Nation. Par le titre minier, il attribue un gisement à une entreprise, charge à elle d'obtenir ensuite l'autorisation de l'explorer ou de l'exploiter.

Le titre minier (permis exclusif de recherches (PER), concession pour l'exploitation) attribuée à son détenteur l'exclusivité du droit de rechercher ou d'extraire la substance demandée sur un périmètre donné, de disposer librement des produits extraits et, pour les titres d'exploitation, « crée un droit immobilier distinct de la propriété de la surface » (L. 122-1, L. 132-8 et L. 611-17 du code minier).

Il peut, notamment, être refusé en cas de doute sérieux émis par l'autorité compétente sur la possibilité de procéder aux recherches ou à l'exploitation du type de gisement mentionné sans porter une atteinte grave aux intérêts mentionnés à l'article L. 161-1 du code minier³.

Le permis exclusif de recherches est attribué pour une période maximale de 15 ans (122-2 du code minier). Il fixe un périmètre géographique de recherches pour une durée déterminée, sur la base d'un programme de travaux établi par le titulaire du permis, comme la concession minière. La concession est octroyée pour une durée maximale de 50 ans (L. 132-11 du code minier), prolongeable par périodes de 25 ans maximum.

Le titre minier ne peut produire pleinement ses effets sans que son détenteur ait été autorisé formellement par le préfet à procéder aux travaux projetés, et dont les grandes lignes sont présentées dans le dossier de demande de titre minier. L'exploitant d'une mine (L. 161-2 du code minier) est « tenu d'appliquer à l'exploitation des gisements les méthodes confirmées les plus propres à porter au maximum compatible avec les conditions économiques le rendement final de ces gisements, sous réserve de la préservation des intérêts » énumérés à l'article L. 161-1, parmi lesquels figurent la santé et la sécurité au travail, la sécurité et la salubrité publique, ainsi que les caractéristiques essentielles du milieu environnant. Selon la gravité des dangers ou des inconvénients qu'ils peuvent présenter, ces travaux font l'objet d'une déclaration ou d'une autorisation d'ouverture des travaux miniers (L. 161-2 et suivants du code minier).

Dans les départements et régions d'outre-mer, des autorisations spécifiques au territoire sont délivrées, emportant à la fois l'exclusivité sur la substance et l'autorisation de réaliser des travaux : l'autorisation d'exploitation est définie à l'article L.611-1 du code minier.

Par ailleurs, en ce qui concerne les substances de mines, l'exploitation doit passer par une phase préalable de démonstration de l'existence d'un gisement, nécessitant généralement l'octroi d'un titre minier d'exploration. Ainsi, en application de l'article L. 122-1 du code minier, la délivrance d'un PER est nécessaire pour toute personne souhaitant effectuer des travaux de recherches minières.

La procédure d'instruction d'un permis exclusif de recherches

La procédure d'attribution des permis exclusifs de recherche est fixée par le décret 2025-851 du 27 août 2025⁴ relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain.

L'instruction est désormais assurée par l'administration centrale.

Les éléments constitutifs du dossier de demande sont fixés par l'article 11 du décret 2025-851 du 27 août 2025 parmi lesquels on retiendra, notamment :

- La justification de ses capacités techniques et financières.
- Le programme des études et travaux envisagés. Ce programme peut distinguer une phase ferme et une phase conditionnelle, les résultats obtenus à l'issue de la phase ferme conditionnant, dans ce cas, la poursuite du reste du programme. Il convient de noter que la qualité des études préalables à la définition du programme de travaux est déterminante pour justifier les limites du périmètre du titre sollicité, compte tenu, notamment, de la constitution géologique de la région et renseignements sur les travaux déjà effectués et leurs résultats.
- Un engagement financier précisant, pour les permis de recherches de substances de mines, le montant minimum de dépenses que le demandeur s'engage à consacrer à la phase ferme du programme ainsi que, si le demandeur opte pour cette distinction, un budget prévisionnel correspondant à la phase conditionnelle ;
- Un plan de financement précisant les modalités de financement de l'engagement financier minimal correspondant à la phase ferme, dont le niveau doit être en adéquation avec les capacités financières du demandeur et, le cas échéant, du budget prévisionnel correspondant à la phase conditionnelle.
- Un mémoire environnemental économique et social. Ce dernier s'inscrit dans un processus *ad hoc*, distinct de l'évaluation environnementale prévue par le code de l'environnement pour les projets, plans et programmes. Il permet de prendre en compte les impacts environnementaux, économiques et sociaux potentiels de l'activité envisagée déjà connus au stade de la demande du titre. Le volet environnemental de ce dernier contient,

³ Leur détail figure ici : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043975625

⁴ <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000052142340>

notamment, les éléments mentionnés au II de l'article R. 122-20 du code de l'environnement, afin d'identifier les enjeux environnementaux et de justifier la compatibilité du programme de travaux prévus par la demande de titre avec la protection des intérêts mentionnés à l'article L. 161-1 du code minier.

Après l'examen de recevabilité des documents joints à la demande de titre, le préfet est chargé d'informer les communes, les établissements publics de coopération intercommunale dotés de la compétence en matière d'aménagement de l'espace ou de l'urbanisme ainsi que la région du dépôt de la demande sur leur territoire, accompagné du résumé technique de la demande (Article L114-5). Cette étape permet l'information des élus en amont de la mise en concurrence prévue à l'article L122-2 code minier. Cette information préalable crée une opportunité d'initier un dialogue avec le territoire. Le préfet peut également instaurer une commission de suivi de sites à n'importe quel moment de la procédure d'instruction.

Le règlement de la mise en concurrence s'effectue à l'issue de celle-ci. La demande retenue est soumise à l'avis de l'Autorité environnementale de l'inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD) et d'un avis économique et social du Conseil général de l'industrie, de l'énergie et des technologies (CGIET) (article 19 du 2025-851 du 27 août 2025).

Une fois les avis rendus, la demande d'octroi fait l'objet d'une participation du public dans les conditions prévues à l'article L. 123-19 du code de l'environnement⁵. Parallèlement à cette consultation sous forme dématérialisée sur le site du ministère de l'Économie, le préfet lance la consultation des chefs de services civils et de l'autorité militaire intéressés pour connaître les contraintes existantes dans la zone où est située le périmètre demandé qui seraient de nature à affecter la délivrance du titre.

À l'issue de ces étapes, l'administration des mines prépare un projet de décision. Son appréciation porte sur la préservation des intérêts énumérés à l'article L. 161-1, l'absence de doute sérieux ainsi que les capacités techniques et financières du demandeur à mettre en œuvre les travaux de recherches.

La procédure d'instruction d'une concession minière s'inscrit dans la continuité du PER

La demande de concession se situe généralement dans la continuité d'un permis d'exploration, la décision de mise en exploitation d'un gisement n'étant prise qu'à l'issue d'une étude de faisabilité technique, économique

et environnementale, qui repose sur l'estimation des ressources et des réserves du gisement⁶.

Le titulaire d'un permis exclusif de recherches est le seul à avoir droit, s'il en fait la demande avant l'expiration de ce permis, à l'octroi de concessions sur les gisements exploitables découverts à l'intérieur du périmètre de ce permis pendant la validité de celui-ci (l'article L. 142-4 du code minier).

La demande est faite auprès du ministre en charge des mines, et précise, notamment, les substances qui seront exploitées et le périmètre demandé. Elle comprend également un mémoire technique, un descriptif des travaux d'exploitation, une analyse environnementale, économique et sociale, et « l'engagement [...] de respecter les conditions générales de la concession ».

Le ministre en accuse réception, et ses services sont chargés de l'instruction. Si la demande est recevable, l'analyse environnementale, économique et sociale est soumise à l'avis de l'IGEDD et du CGIET. À l'issue de cette étape, une enquête publique d'une durée de trente jours est organisée. Le préfet consulte en parallèle les collectivités territoriales ainsi que les autres services de l'État concernés.

Au vu du dossier d'enquête, des différents avis et de l'avis du préfet, l'administration centrale en charge des mines élabore un rapport d'instruction, qu'elle transmet au ministre des mines accompagné d'une proposition d'octroi ou de rejet.

La concession est accordée par décret. Si la demande est rejetée, le rejet est prononcé par arrêté du ministre en charge des mines.

Les PER ne peuvent être accordés que si le pétitionnaire dispose de capacités financières suffisantes pour toute la durée du titre

Pour obtenir un PER, chaque pétitionnaire doit démontrer, en application de l'article L. 122-2 du code minier, qu'il possède « les capacités techniques et financières nécessaires pour mener à bien les travaux de recherches et pour assumer les obligations mentionnées dans des décrets pris pour préserver les intérêts mentionnés à l'article L. 161-1 et aux articles L. 161-1 et L. 163-1 à L. 163-9 » et, notamment, la protection de l'environnement et la remise en état des sites.

L'examen des capacités financières vise, entre autres, à s'assurer que le pétitionnaire pourra assumer l'ensemble des obligations susceptibles de découler de la réglementation applicable. Elles s'apprécient en fonction

⁵Le 12 juillet 2024, le Conseil d'État a statué qu'une décision d'octroi, d'extension ou de prorogation d'une concession minière relève du champ de la directive 2001/42/CE dite « Plans et programmes ». Les PER de mines ainsi que les concessions sont inclus dans le champ des plans et programmes soumis à évaluation environnementale.

⁶Les ressources et les réserves d'un gisement : Les ressources et réserves sont avant tout des estimations, comportant une part d'interprétation et d'incertitude statistique. Les réserves représentent la somme des quantités de minerais présumées récupérables par l'entreprise au regard des choix techniques retenus. Les ressources correspondent, quant à elles, à la quantité de minerais estimée dans le périmètre du titre. L'incertitude sur les valeurs de ces dernières est grande.

Au regard des incertitudes afférentes à ces données, l'État se réfère lors de l'examen des dossiers aux normes internationalement reconnues pour estimer et rendre compte des ressources et réserves minérales ; aussi, le code canadien CIM Ni-43-101 est majoritairement utilisé.

d'une situation juridiquement acquise et non hypothétique. Aussi, l'administration exige que les capacités financières de l'entreprise soient en adéquation avec la tranche ferme du programme de travaux. L'analyse qui en est faite porte sur les fonds propres de l'entreprise demanderesse ou sur la capacité de cette dernière à s'adjoindre un partenaire (industriel ou investisseur, banquier, fonds de pension...). Il est ainsi difficile de prendre en considération les levées de fonds qui interviendront au gré de l'avancement du programme d'exploration, pour qu'il soit fait droit à une demande de PER. De ce fait, peu de demandeurs de PER sont en capacité de prétendre à la durée maximale autorisée dès l'octroi.

Les juniors minières, dont l'activité principale consiste à obtenir des titres d'exploration afin de mettre en évidence des potentiels gisements miniers, avant de s'associer ou de céder le titre à des sociétés disposant de capacités financières plus importantes pour mener à bien les travaux d'exploitation, sont particulièrement concernées. Elles disposent généralement de capacités financières limitées, et leur capacité à lever des fonds est liée aux résultats des recherches. Cette difficulté constitue un frein au développement de l'exploration en métropole et en Guyane, et conduit les porteurs de projet à s'associer à des investisseurs privés.

Les étapes de concertation

Le nouveau code minier a considérablement renforcé la concertation dans le cadre des demandes de titre, et ce dès le dépôt d'une demande. Le préfet est, notamment, chargé d'informer les collectifs qu'une demande est formée dès la recevabilité proposée. Il peut également mettre en place une commission de suivi afin d'accompagner la procédure d'instruction. Cette étape bien que facultative offre l'opportunité d'une présentation de la procédure aux parties prenantes, et donne de la transparence à un processus d'instruction assez souvent critiqué pour son opacité.

Pour les projets de plus grandes envergures, la conduite d'un débat public sous le contrôle de la CNDP⁷ (Commission nationale du débat public) trouve tout son sens. En effet, les projets miniers s'inscrivent dans le cadre de la politique nationale des ressources et des usages du sol et du sous-sol (Article L100-4 du code minier).

La formation d'Autorité environnementale de l'inspection générale de l'environnement et du développement durable est l'autorité indépendante compétente pour émettre sur le mémoire ou l'étude de faisabilité l'avis environnemental prévu par les dispositions du II de l'article L. 114-2 du code minier.

Le Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies est l'organisme compétent pour émettre l'avis prévu par les dispositions du II de l'article L. 114-2 du code minier sur le volet économique et social de ce mémoire ou de cette étude. Son analyse s'appuie, notamment, sur les orientations définies dans la politique nationale des ressources et des usages du sous-sol.

⁷ https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074220/LEGISCTA000006176636/

Statistiques minières

- Aujourd'hui, le domaine minier métropolitain n'est plus que très faiblement valorisé depuis plusieurs décennies. L'exploitation minière de substances de mines dans l'Hexagone ne concerne plus que le sel (15 concessions, 4,5 Mt/an), la bauxite (3 concessions, 115 kt/an), les calcaires bitumineux (1 concession, 1,8 kt/an), la fluorine (1 concession) et l'or (1 concession).
- La production minière relative aux substances métalliques (étain, tantale-niobium) est faible. Un concentré d'étain-tantale-niobium est valorisé en tant que co-produit d'une carrière de kaolin (40t/an d'étain et 8t/an de tantale-niobium).
- La production aurifère en Guyane (1 063 kg en 2024) repose essentiellement sur des opérateurs minières artisanaux qui exploitent les gisements sous le couvert d'autorisation d'exploiter (72 autorisations d'exploiter). Une production industrielle de faible intensité est également observée sur 2 sites (14 concessions).
- 12 permis exclusifs de recherches valides dans l'Hexagone. Ceux-ci ciblent des substances dissoutes comme le lithium, gazeuses tel que l'hélium ou métalliques.
- 24 permis exclusifs de recherches en cours d'instruction (Hexagone et Guyane).
- 1 demande de concession de mines de lithium en cours d'instruction.

Quelles perspectives à moyen terme

Suite à la première crise des terres rares (2011), plusieurs projets de recherche de substances de mines ont émergé dans l'optique de développer des gisements connus à fort potentiel (gisement de tungstène de Couflens, gisements polymétalliques du district de Saint-Yrieix-la-Perche, amas sulfuré de Rouez en Champagne, gisement de lithium d'Echassière...).

À l'exclusion du PER lithium détenu par Imerys, tous les autres permis octroyés ont rencontré de fortes oppositions et ont rapidement périclité.

L'augmentation des besoins en minéraux imposée par les transitions énergétiques et numériques a forcé l'État à s'inscrire dans une démarche proactive d'accompagnement des projets pour qu'ils répondent aux exigences environnementales et sociétales des territoires. Au-delà de sa mission d'instruction des demandes, l'État cherche à promouvoir le potentiel de son sous-sol auprès des juniors minières.

La relance de l'inventaire minier sur des zones géographiques à fort potentiel (Vosges, massif central, Mont du Lyonnais, Forez, Pyrénées), conjuguée à la mise à disposition de modèles géologiques à l'échelle locale (district) qui permettent de révéler des anomalies qui constitueront par la suite les cibles doivent permettre d'attirer de nouveaux investisseurs. L'État ambitionne de doubler d'ici 5 ans le nombre de permis exclusif de recherche actif dans l'hexagone.

Néanmoins, l'attractivité de notre sous-sol reposera sur la capacité des sociétés d'exploration à conduire des campagnes de forages en profondeur. Les nouvelles dispositions du code minier sont essentielles pour que ces travaux puissent se dérouler dans de bonnes conditions d'acceptabilité.

Les enjeux scientifiques et techniques de l'approvisionnement responsable en ressources minérales

Par Gaël BELLENFANT

Expert environnement minier – Évaluation environnementale et sociale au BRGM

L'approvisionnement responsable en métaux critiques et stratégiques doit concilier des contraintes techniques, environnementales et sociales tout au long du cycle minier, de l'exploration à l'après-mine. La baisse des teneurs, l'augmentation des volumes de résidus et la pression croissante induite sur l'eau et l'énergie renforcent la nécessité d'innovations et d'une gestion rigoureuse des impacts. Au-delà du site d'extraction, la responsabilité s'étend aux chaînes de valeur mondiales, afin de garantir durabilité, équité et acceptabilité sociale.

Introduction

Les ressources minérales sont des ressources naturelles non renouvelables à l'échelle humaine. Leur exploitation, si elle se veut responsable, doit, d'une part, limiter son impact sur l'environnement, d'autre part, tenir compte des besoins des générations futures en préservant les ressources existantes, et, enfin, prendre en compte les droits des travailleurs et populations locales. L'approvisionnement responsable en métaux critiques et stratégiques pose des enjeux multiples : techniques, environnementaux, sociaux et géopolitiques. L'augmentation de la demande accentue les pressions sur les écosystèmes (Giljum *et al.*, 2022 ; Sonter *et al.*, 2020), tandis que la baisse des teneurs en minerais rend leur exploitation de plus en plus complexe et coûteuse en augmentant les volumes d'intrants chimiques, de résidus, la consommation d'eau¹ et d'énergie (Magdanela *et al.*, 2023), la taille des sites

Concevoir et mettre en œuvre une activité minière responsable pose donc des défis scientifiques et techniques que nous nous proposons d'éclairer dans cet article.

Les impacts de l'activité minière

Ce paragraphe décrit les principaux impacts à travers le monde et issus de contextes réglementaires et économiques inégaux.

Avant l'exploitation. Les phases d'exploration génèrent des impacts limités, mais réels (déforestation, forages, déblais). Elles servent à construire le modèle

géoenvironnemental du site (Plumlee et Nash, 1995), indispensable pour anticiper les risques environnementaux (drainage acide, pollutions).

Pendant l'exploitation. Le processus comprend le retrait des stériles, l'extraction du minerai, le concassage et le broyage (20 à 50 % de la consommation énergétique), puis la concentration par procédés physiques ou chimiques (flottation par exemple).

Un site minier combine généralement les sites d'extraction, haldes, bassins de traitement et stockages de résidus (Werner *et al.*, 2020), et les impacts sont multiples.

La surface mondiale affectée par l'extraction est estimée entre 66 et 100 000 km² (Maus *et al.*, 2022). La mine représenterait 7 % de la déforestation mondiale (Honosuma *et al.*, 2012), soit 9 000 km² entre 2000 et 2019 à l'échelle mondiale (WWF, 2023).

Les états de l'art sur la biodiversité (Sonter *et al.*, 2018 ; Boldy *et al.*, 2021) montrent que près de 5 % des pressions sur les espèces menacées sont liées aux activités minières (Mair *et al.*, 2021) ; de nombreux sites opèrent dans des zones à forte diversité d'espèces. De plus, les infrastructures font que ces impacts vont au-delà des limites des sites d'extraction. Ainsi, 27 % des mines d'or, cuivre, zinc et aluminium sont situées dans les 10 km d'une zone protégée² (Duran *et al.*, 2013), et la quasi-intégralité de l'extraction du nickel se fait à 20 km des zones protégées (Luckeneder *et al.*, 2021).

Selon Franks *et al.* (2021), 1 743 mines (dont 725 actives), représentant en moyenne 36 % de la production mondiale, ont stocké 44,5 milliards de m³ de résidus avec un volume moyen d'un stockage de 43,7 Mm³.

¹ Coldeco, Forecast for waterconsumption in the coppermining industry, 2018-2029 <https://rcgi.cochilco.cl/Research/Forecast%20for%20water%20consumption%20in%20the%20copper%20industry,%202018-2029.pdf>

² <https://www.protectedplanet.net/en>

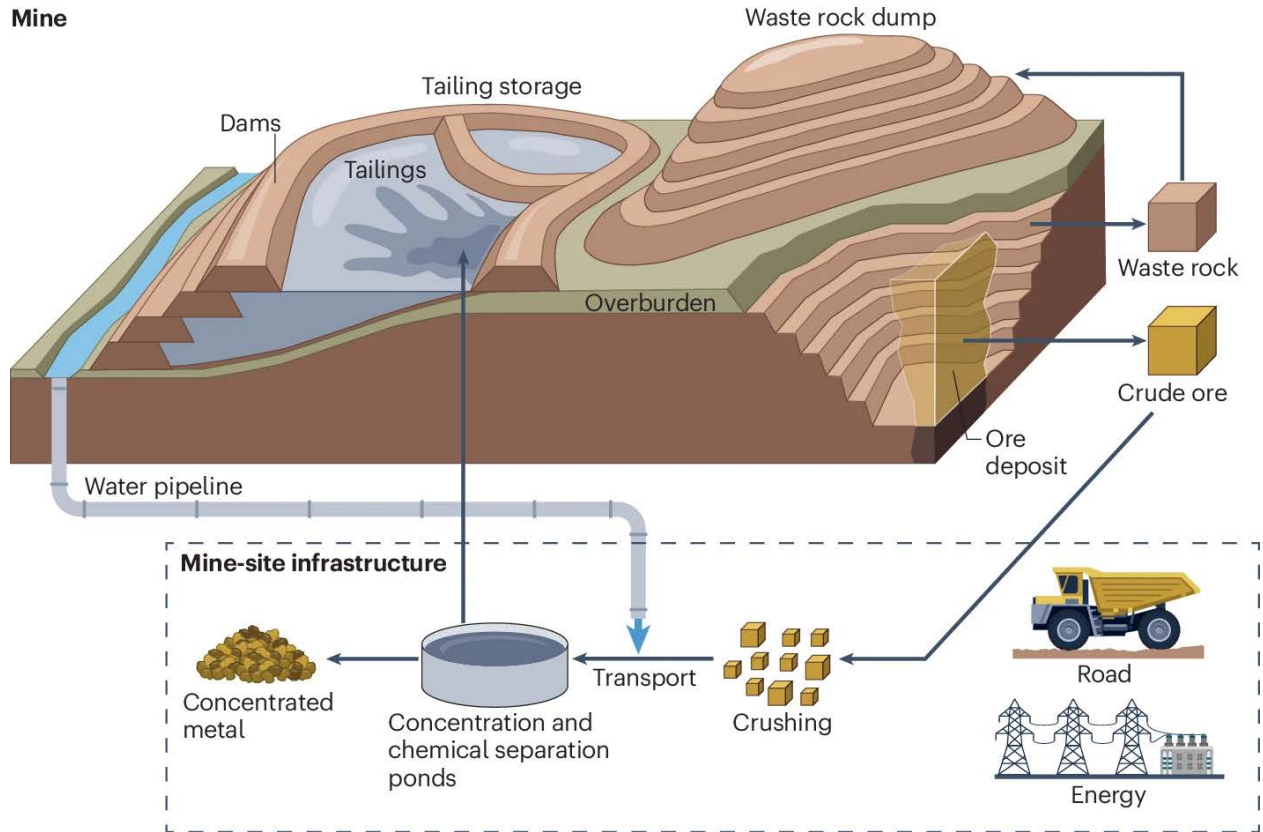


Figure 1 : Infrastructures minières, d'après Giljum, S., Maus, V., Sonter, L. *et al.* (2025), "Metal mining is a global driver of environmental change", *Nat Rev Earth Environ*, 6, pp. 441-455.

La mine est une grande consommatrice d'eau, environ 0,34 à 6,27 m³ par tonne de minerai traité (Northey *et al.*, 2019). L'étude de Luckeneder *et al.* (2021) montre que 90 % des mines (sur un échantillon de 2 935) se situent au sein de bassins en stress hydrique. À cela s'ajoute la contamination des eaux souterraines et de surface par les polluants naturels présents dans le minerai (arsenic par exemple) et les intrants chimiques utilisés en phase d'extraction (explosifs) et de traitement.

L'industrie minière consomme 1,2 à 2 % de l'énergie totale utilisée dans le monde, et cette dernière est susceptible d'augmenter d'un facteur 2 à 8 d'ici 2060 (Aramendia *et al.*, 2023). À l'échelle d'un site, cela peut représenter en moyenne 20 MJ/t de minerai pour une mine à ciel ouvert et de 100 MJ/t pour une mine souterraine (Rotzer, 2020), valeur dépendante de la teneur du minerai.

Fermeture et après-mine. Les résidus et la gestion de l'eau demeurent les principaux enjeux de long terme, aggravés par le changement climatique ; s'y ajoutent la gestion des vides miniers, le démantèlement des infrastructures, etc. Les stockages doivent être stables à très long terme, et plusieurs ruptures sont observées chaque année³, ceci est accru par la diminution des teneurs et l'augmentation des volumes de déchets associés.

La gestion des exhaures (avec traitement de drainage minier acide, notamment) peut être nécessaire à long terme, avec des traitements actifs en phase d'exploitation, puis des traitements passifs.

Les améliorations dans la gestion actuelle

Exploration

En plus des aspects réglementaires, l'exploration responsable se développe sous forme d'initiative volontaire ; on pourra citer la DRE⁴ (*Driving Responsible Exploration*) au Canada.

Exploitation

Les progrès visent la réduction de la consommation d'énergie et d'eau (pré-tri, broyage autogène, électrification), et l'usage d'énergies renouvelables. Ainsi, on constate une augmentation de la part d'énergies renouvelables (42 MW annuel en 2008 à 3 397 MW en 2019 dans le monde) et des systèmes hybrides (diesel + renouvelable) se mettent en place. L'électrification qui se développe permet de réduire les besoins en aération des mines souterraines, qui génèrent moins d'impacts que celles de surface (poussières, usages des sols, déchets miniers).

Les taux de recyclage de l'eau sont de l'ordre de 12 % à 94 % (moyenne 57 %, médiane 62 %, selon Northey *et al.*, 2019). Ceci est accompagné par la déshydratation des résidus miniers avant stockage, et permet des stockages plus sûrs (les résidus filtrés ou en pâte étant plus stables). Toutefois, ces procédés sont énergivores et doivent faire l'objet d'analyses multicritères (coûts, émissions CO₂, bilan hydrique, etc.).

³Base de données internationale : <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>

⁴<https://pdac.ca/driving-responsible-exploration>

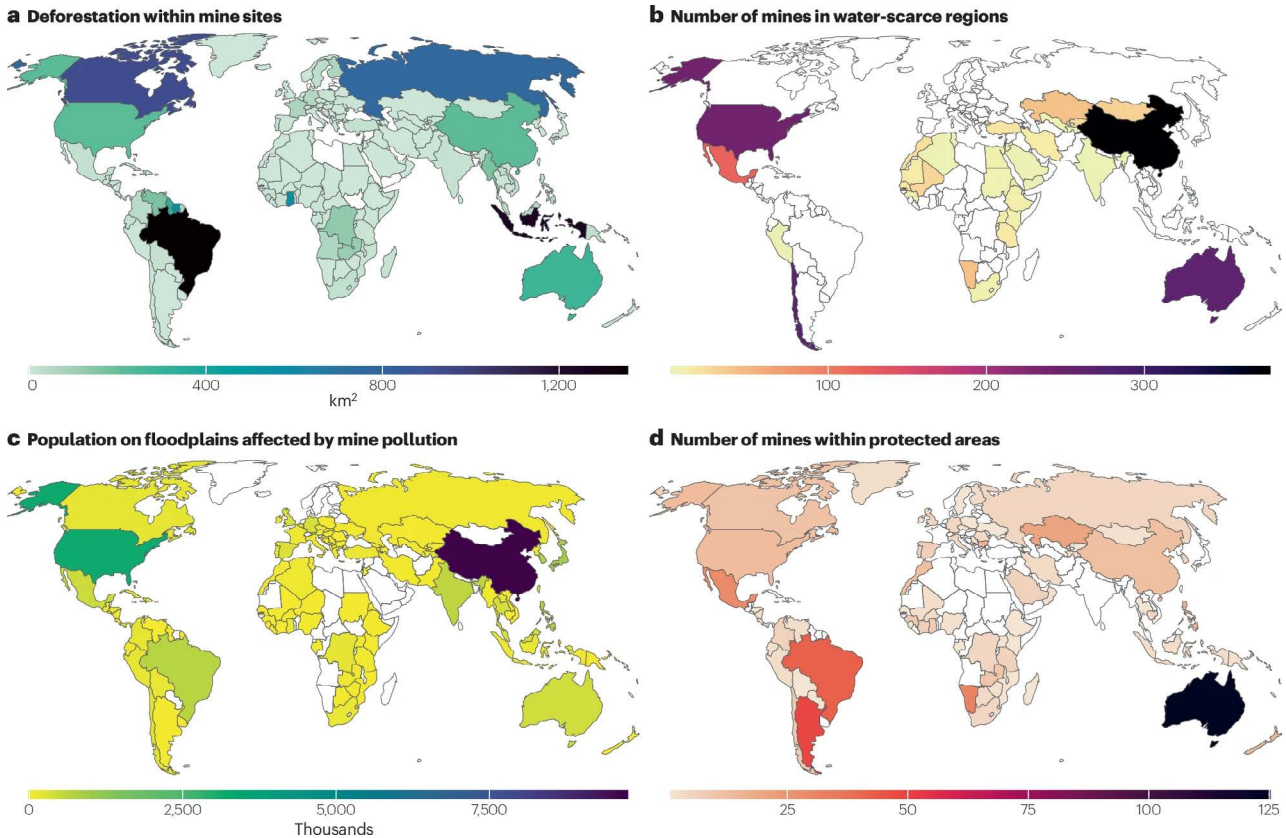


Figure 2 : Principaux enjeux environnementaux des activités minières, d'après Giljum S., Maus V., Sonter L. et al. (2025), "Metal mining is a global driver of environmental change", *Nat Rev Earth Environ*, 6, pp. 441-455.

Les meilleures techniques disponibles pour gérer les déchets de l'industrie extractive ont été publiées par la Commission européenne en 2018⁵.

La télédétection et les Systèmes d'information géographique (SIG) facilitent la surveillance environnementale, comme :

- l'interférométrie radar satellitaire : suivie de l'évolution des déplacements de la surface du sol ;
- l'hyperspectral : identification de la minéralogie de la surface, la teneur des eaux (résolution de 30 m X 30 m) ;
- le multispectral : suivi de la végétation, de l'état de surface.

La réhabilitation progressive fait partie des bonnes pratiques, elle permet de lisser les coûts de fermeture, de vérifier l'efficacité des solutions de gestion.

Fermeture et après-mine. L'objectif est de permettre des usages futurs négociés avec les autorités et les populations : sols réhabilités, infrastructures souterraines sécurisées et valorisées ou reconversion énergétique (panneaux solaires...). Les codes miniers imposent généralement la fourniture d'un plan de fermeture dans le permis d'exploitation et sa mise à jour progressive (Kauppila et al., 2019). Il est en général utilisé pour calculer les garanties financières provisionnées pour la fermeture. En France, l'État finance les études, la surveillance et les travaux des anciens sites miniers

⁵ <https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/mining/MWEI%20BREF.pdf>

ayant été exploités sous un titre minier, pour un montant d'environ 25 à 30 M€/an. Ces activités démarrées depuis les années 2000 ont permis de développer une forte expertise technique en gestion de sites miniers.

La gestion future et les innovations de rupture

Exploration : le **Critical Raw Materials Act (CRM Act)** publié le 16 mars 2023 vise, entre autres, à relancer l'exploration minière en Europe. Une accélération des initiatives dans ce domaine est attendue et, notamment, autour de la prédictivité⁶ et du traitement de la donnée.

Exploitation

Les innovations sur l'énergie se focalisent sur le broyage, qui est le poste le plus consommateur. Ainsi que sur le pré-tri automatique de la gangue avant broyage, la fragilisation sélective combinée au broyage et le broyage autogène ou semi-autogène.

L'automatisation est un domaine de recherche actif ; cela permet de réduire les risques humains, les besoins en ventilation ; on peut citer les projets de recherche **ROBOMINERS**⁷ et **NEXGEN SIMS**⁸.

⁶ <https://www.brgm.fr/fr/solutions/cartographie-predictive-evaluation-exploration-ressources-minerales>

⁷ <https://cordis.europa.eu/article/id/446849-mining-robots-designed-for-selective-extraction/fr>

⁸ <https://cordis.europa.eu/article/id/446847-the-green-and-digital-transformation-of-mining/fr>

Appliquée au suivi environnemental et opérationnel, la recherche s'intensifie dans le domaine satellitaire avec le développement de services et d'algorithmes permettant de mieux traiter les données (projets MINEYE⁹ et Goldeneye¹⁰). De même, des capteurs plus résolus sont attendus (hyperspectral par exemple) pour permettre de l'utiliser à l'échelle des sites. L'objectif est de pouvoir développer des indicateurs de mesures d'impact qui soient fiables, à l'échelle des sites, et mis à jour régulièrement (RAWCLIC¹¹).

Un standard européen des meilleures techniques disponibles destinées à gérer les émissions liées à l'activité minière (BREF-MIN¹²) a été initié par le JRC fin 2024 ; il devrait être publié fin 2028.

La revalorisation des résidus miniers fait partie de la stratégie du CRM Act ; des projets de recherche destinés à quantifier le potentiel en métaux critiques et stratégiques et les meilleures méthodes d'exploitation vont se développer (Bodenan *et al.*, 2019). Elle doit s'accompagner de la revalorisation fraction non critique (mais qui représente plus de 95 % de la quantité de matière) vers le génie civil.

La traçabilité de la chaîne de valeur

La traçabilité des métaux, basée sur des dispositifs permettant leur suivi (origine, parcours, acteurs, conditions ESG), vise à garantir leur origine responsable, à prévenir les risques environnementaux et sociaux, et à renforcer la transparence des chaînes d'approvisionnement mondiales (IEA, 2023).

C'est un prérequis à la démarche de diligence raisonnable, en particulier dans des contextes à haut risque (OECD, 2016). Et cela s'intègre de plus en plus dans un cadre normatif international : règlement sur les batteries, passeport numérique, directive sur le devoir de vigilance.

La traçabilité est encouragée par des standards volontaires (RMI, IRMA, CERA 4in1) et est illustrée par le projet européen MaDiTraCe, qui associe traçabilité physique et outils numériques pour établir une chaîne de preuve des métaux critiques (BRGM, 2023). Mais elle est dépendante des matériaux, des processus de traitement et des bases de références ; elle peut être inaccessible pour des petits producteurs.

Fermeture et après mine

Des travaux de recherche sont nécessaires pour développer des méthodes de calcul du financement de cette phase, qui soient partagées entre les acteurs que ce soit au niveau des hypothèses, de la gestion des incertitudes et des choix de réhabilitation.

La réutilisation des infrastructures pour le stockage et la production d'énergie renouvelable se développe (géothermie, stockage potentiel).

⁹ <https://cordis.europa.eu/project/id/101138456>

¹⁰ <https://cordis.europa.eu/article/id/446846-data-fusion-unlocks-the-potential-of-geo-intelligence-in-mining/fr>

¹¹ <https://www.rawcllc.eu/>

¹² <https://bureau-industrial-transformation.jrc.ec.europa.eu/reference/mining-extraction-ores>

Conclusions et perspectives

Au-delà des défis scientifiques et techniques de l'activité minière, le principe de chaînes d'approvisionnement responsables se développent (OECD, 2016). L'élévation des exigences associées implique potentiellement une restriction future et incertaine, des opportunités d'investissement. Cela ouvre des perspectives de tension, et la priorisation de l'usage des métaux se posera. Bien évidemment, les hausses des cours associées devraient mener à l'ouverture de nouvelles opportunités.

Une prise de conscience des consommateurs sur les performances ESG associées aux minéraux des produits qu'ils utilisent ainsi que des incitations gouvernementales et européennes (fiscalité, taxonomie) sont également des leviers pour favoriser des approvisionnements plus responsables. Mais il faut collectivement être prêt à accepter que cet approvisionnement plus responsable sera aussi plus coûteux, et que la question des usages sera fondamentale.

Références

- ARAMENDIA E., BROCKWAY P. E., TAYLOR P. G. & NORMAN J. (2023), "Global energy consumption of the mineral mining industry: Exploring the historical perspective and future pathways to 2060", *Global Environmental Change*, 83.
- BOLDY R., SANTINI T., ANNANDALE M., ERSKINE P. D. & SONTER L. J. (2021), "Understanding the impacts of mining on ecosystem services through a systematic review", *Extr. Ind. Soc.*, 8, pp. 457-466.
- BODENAN F., BODIN J., BELLENFANT G., D'HUGUES P. (2019), "Retreatment of metallic tailings: a review and a technico-economic case study", AIMS 2019 - 2nd International Conference "Mines of the Future", Aarhen, Germany.
- BRGM (2023), MaDiTraCe - Material and Digital Traceability for the Certification of Critical Raw Materials, <https://www.maditrace.eu>.
- DURÁN A. P., RAUCH J. & GASTON K. J. (2013), "Global spatial coincidence between protected areas and metal mining activities", *Biol. Conserv.*, 160, pp. 272-278.
- GILJUM S., MAUS V. & KUSCHNIG N. (2022), "A pan-tropical assessment of deforestation caused by industrial mining", *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 119(38).
- HOSONUMA N. *et al.* (2012), "An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries", *Environ. Res. Lett.*, 7.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2023), The Role of Traceability in Critical Mineral Supply Chains, <https://www.iea.org/reports/the-role-of-traceability-in-critical-mineral-supply-chains>.
- KAUPPILA T., BELLENFANT G., SOLISMAA L. & MITTELSTADT P. (2019), "Digitalisation of continuous mine closure planning and management: an EIT Raw Materials initiative", 13th International Conference on

Mine Closure, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 1023-1030.

LUCKENEDER S., GILJUM S., SCHAFFARTZIK A., MAUS V. & TOST M. (2021), "Surge in global metal mining threatens vulnerable ecosystems", *Global Environ. Change*, 69.

MAGDALENA R., VALERO A. & CALVO, G. (2023), "Limit of recovery: How future evolution of ore grades could influence energy consumption and prices for Nickel, Cobalt, and PGMs", *Minerals Engineering*, 200.

MAIR L. *et al.* (2021), "A metric for spatially explicit contributions to science-based species targets", *Nat. Ecol. Evol.*, 5, pp. 836-844.

MAUS V. *et al.* (2022), "An update on global mining land use", *Sci. Data*, 9(433).

MEIßNER S. (2021), "The impact of metal mining on global water stress and regional carrying capacities – a GIS-based water impact assessment", *Resources*.

NORTHEY S. A., MUDD G. M., WERNER T. T., HAQUE N. & YELLISHETTY M. (2019), "Sustainable water management and improved corporate reporting in mining", *Water Resour. Ind.*, 21.

OECD. (2016), OECD Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas, 3rd ed., Paris, OECD Publishing.

PLUMLEE G. & NASH J. (1995), "Geoenvironmental Models of Mineral Deposits-Fundamentals and Applications", *US Geol. Surv.*, Open-File Rep, 95.

ROTZER N. & SCHMIDT M., (2020), "Historical, Current, and Future Energy Demand from Global Copper Production and Its Impact on Climate Change", *Resources*, 9(4), p. 44.

SONTER L. J., ALI S. H. & WATSON J. E. M. (2018), "Mining and biodiversity: key issues and research needs in conservation science", *Proc. Biol. Sci.*, 285.

SONTER L., DADE M., WATSON J. & VALENTA R. (2020), "Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity", *Nat. Commun.*, 11, 4174.

WERNER T. T. *et al.* (2020), "Global-scale remote sensing of mine areas and analysis of factors explaining their extent", *Glob. Environ. Change*, 60.

WWF (2023), Extracted forests - unearthing the role of mining-related deforestation as a driver of global deforestation, World Wide Fund for Nature report, 39 p.

Les enjeux de normalisation de la mine responsable

Par **Christophe DIDIER**

Direction scientifique du BRGM et président du SC7 de l'ISO/TC 82

Mercè FERRÉS HERNÁNDEZ

Responsable de programmes techniques au Secrétariat Central de l'ISO

Et **David KRUPKA**

Responsable développement « industrie » à l'Afnor

Le redéploiement d'une industrie extractive sur le territoire national exige la prise en compte de la sensibilité croissante des populations aux enjeux environnementaux, sociaux et de gouvernance. Dès lors, il est indispensable de définir et promouvoir un cadre pour le déploiement d'une « mine responsable », permettant le développement d'une activité économique performante et souveraine, tout en préservant au mieux l'environnement et en promouvant une équité sociale et économique. Le présent article illustre les atouts et enjeux de la normalisation pour accompagner ce défi. Après une rapide présentation des principes de normalisation dont l'essence est de promouvoir les meilleures pratiques en termes de techniques et d'organisation, les principaux enjeux des travaux en cours et à venir sont présentés de même que le cadre le plus adapté à leur mise en œuvre.

Contexte et enjeux d'une « mine responsable »

La France possède une longue tradition minière, qui lui a, notamment, permis d'asseoir sa puissance industrielle. Cette activité s'est traduite par le développement de vastes bassins miniers (charbon, fer, sel...) ainsi que de nombreuses exploitations métalliques plus localisées (uranium, plomb, zinc, or, antimoine, tungstène...). La filière a connu son pic de développement durant la période des « Trente Glorieuses » (1945-1975), avant un déclin progressif sous l'effet d'une mondialisation progressive de l'économie.

Dès la fin des années 1990, la gestion de l'après-mine a représenté un fort enjeu. En effet, le manque de recul sur les conditions de fermeture, le comportement à long terme et l'ennoyage progressif des exploitations ont contribué à l'apparition de phénomènes complexes susceptibles d'affecter la sécurité et l'aménagement du territoire (instabilités, pollution des eaux et sols, émissions de gaz...). Ainsi, une politique efficace de prévention des risques et nuisances associés a été mise en œuvre et fait de la France un pays reconnu pour son expertise dans le domaine (Didier, 2007).

Depuis quelques années, sous l'effet cumulé de crises majeures (Covid-19, conflits internationaux, bouleversement climatique), les enjeux de souveraineté et d'approvisionnement responsable en

matières premières des filières industrielles ont pris une importance majeure. Dans ce cadre, la France a décidé de réinvestir les ressources potentiellement présentes dans son sous-sol pour contribuer, notamment, à répondre aux objectifs ambitieux fixés par la législation européenne sur les matières premières critiques (European Critical Raw Materials Act). Un inventaire des ressources minérales est ainsi en cours sous la coordination du BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières). Toutefois, les conséquences des anciennes mines de même que les modalités d'exploitation existant dans certains pays ont contribué à dégrader l'image de l'industrie minière. La société civile est désormais particulièrement attentive et sensible aux impacts sociaux comme environnementaux de ce type d'activité, aussi bien pendant la phase d'extraction qu'après la fermeture.

Dans un tel contexte, le développement et le déploiement d'un cadre solide et consensuel, capable de définir les principes de déploiement d'une « mine responsable », deviennent prioritaires. La définition et la promotion des meilleures pratiques et savoir-faire doivent permettre de contribuer à un dialogue constructif entre les différentes parties prenantes, ainsi qu'à l'émergence d'une filière plus respectueuse des environnements au sein desquels elle est appelée à se développer.

Cadre et apports de la normalisation

Au regard de l'importance du sujet, de très nombreuses initiatives ont fleuri au cours des dernières années pour proposer des chartes, des labels ou des référentiels permettant de poser les bases du concept de « mine responsable ». Ainsi, près d'une centaine d'initiatives à l'échelle internationale ont émergé sur ce sujet. Toutes présentent leurs intérêts mais également leurs spécificités. Certaines sont construites à une échelle nationale, d'autres sont dédiées à une ou quelques substances spécifiques, enfin beaucoup sont portées par une catégorie de porteurs d'enjeux. Par ailleurs, certaines relèvent principalement d'un « engagement déclaratif » alors que d'autres proposent un cadre « auditable » pour permettre de certifier, par des tiers, que les engagements pris sont bien tenus.

Une norme est un document de référence établi par consensus et approuvé par un organisme reconnu, qui a vocation à garantir un cadre optimal pour la mise en œuvre de matériaux, produits, processus et / ou services. Sauf situation spécifique (norme reprise dans un cadre réglementaire), les normes relèvent d'une démarche volontaire (l'acteur s'engage à la respecter et le fait savoir). Si leur application n'est donc pas obligatoire, leur efficacité s'appuie sur la capacité à fournir un cadre différenciant, garantissant les meilleures techniques disponibles aux citoyens, consommateurs, industriels ou régulateurs. En revanche, les clients peuvent de leur côté décider de privilégier l'achat de produits respectant certaines normes, ce qui a évidemment un effet accélérateur sur l'adoption de ces dernières.

La démarche de normalisation fonctionne sur la base de certains principes intangibles (OMC, 2000), dont :

- la transparence : les informations sont rendues accessibles aux parties intéressées ;
- l'ouverture : l'élaboration et la validation des normes est ouverte à l'ensemble des parties prenantes (pouvoirs publics, industriels, académiques, société civile...);
- le consensus : les travaux préparatoires et les étapes de validation sont menés sur le principe d'un accord de l'ensemble des parties prenantes, sans opposition formelle.

Les principes de cohérence (ne pas permettre l'émergence de normes contradictoires) et de révision régulière sont également appliqués pour s'assurer que le cadre proposé est toujours le meilleur disponible.

Les normes pouvant varier d'un pays à l'autre, une harmonisation est requise pour les produits et activités qui ont vocation à favoriser les échanges internationaux. C'est la fonction de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), créée en 1947 et dont la mission est de coordonner l'élaboration de normes internationales (appelées « normes ISO »). L'ISO regroupe en son sein une très large majorité des pays (173 en août 2025), représentés par leur principal organisme national de normalisation, ce qui lui offre une forte capacité de mobilisation ainsi qu'une importante reconnaissance.

En France, c'est l'Afnor (Association française de normalisation) qui assure ce rôle. Outre l'animation de la contribution française aux travaux de normalisation internationale, l'Afnor assure également la coordination de l'élaboration des normes françaises (« normes NF »).

Les travaux s'organisent au travers de groupes thématiques regroupant des experts volontaires. À l'ISO, il s'agit de comités techniques (« TC »), qui peuvent regrouper des sous-comités (« SC »). À l'Afnor, ce sont des « commissions de normalisation », dont certaines constituent des groupes miroir des comités de l'ISO. Plus de 700 comités à l'ISO et un peu moins de 1 000 commissions à l'Afnor structurent les travaux de normalisation sur l'ensemble des sujets. Si certains de ces groupes sont régulièrement initiés en fonction des besoins émergents, d'autres disparaissent, faute d'activités.

Les enjeux de normalisation pour l'émergence d'une mine responsable

La normalisation a toujours accordé une importance particulière à la définition des termes employés, notamment car le sens peut varier selon le contexte ou d'une langue à une autre. En français, le terme « mine durable » pourrait s'avérer porteur d'un apparent paradoxe, puisqu'une mine n'est, par définition, pas durable car elle extrait des ressources qui ne se régénèrent pas automatiquement. L'expression de « mine responsable » est donc souvent privilégiée, mais, dans l'esprit, on peut l'assimiler à celle de « mine répondant aux principes du développement durable ».

Pour permettre l'émergence d'une filière de « mine responsable », un cadre organisationnel et technique doit être défini et connu pour permettre à une exploitation de se développer tout en préservant au mieux les critères dits « ESG », qui renvoient à la prise en compte des facteurs environnementaux, sociaux et de gouvernance.

Le premier volet à intégrer consiste donc à limiter les risques et impacts sur l'environnement. Pour ce faire, de nombreux paramètres doivent être considérés, et ce aux différentes étapes d'un projet minier (depuis l'exploration jusqu'à la phase de réhabilitation). À titre d'exemple, le choix de la méthode d'exploitation induit des conséquences directes. Une exploitation souterraine limitera l'impact sur l'emprise au sol, le paysage et potentiellement la biodiversité, mais exigera une attention particulière sur la tenue des terrains de surface. De plus, la gestion des stériles ou résidus d'exploitation doit être prise en compte pour limiter leur volume et sécuriser les dépôts environnants (terrils, bassins de décantation...).

La gestion optimisée du cycle de l'eau constitue une priorité pour limiter les interactions avec le milieu (recyclage en vue de réduire les prélèvements, prévention des pollutions). Il en va de même pour la limitation des intrants chimiques et des rejets tant dans l'atmosphère (émissions de poussières, gaz à effet de serre...) que dans les sols ou les hydrosystèmes. L'efficacité énergétique et, au sens large, la réduction de l'empreinte carbone constituent également des objectifs environnementaux majeurs.

Concernant les aspects sociaux, l'établissement d'un dialogue constructif entre les parties prenantes est une priorité, dès l'amont du projet. Il permet d'identifier les différentes parties prenantes, leur niveau d'acculturation et d'engagement ainsi que les besoins des populations locales. Cette démarche est menée par le déploiement de méthodes et pratiques éprouvées qui permettent idéalement d'impliquer les parties prenantes dès les toutes premières phases d'un projet. Elle doit permettre aussi de partager les bonnes pratiques, notamment à l'attention des acteurs disposant d'un moindre retour d'expérience (partage d'exemples réussis mais également d'erreurs ou d'échecs). Le maintien de conditions de travail sûres et le respect des droits humains (notamment ceux des femmes et des enfants) sont également des objectifs importants tout comme l'impact positif et durable de l'exploitation sur l'économie locale ainsi que sur l'accès à la culture et à l'éducation des populations, en particulier pour les pays en développement.

Les enjeux de gouvernance sont également importants. Ils intègrent l'élaboration d'une stratégie incluant l'identification de moyens dédiés à l'atteinte des objectifs ESG. Les notions d'exemplarité et d'éthique de la gouvernance des entreprises représentent un facteur majeur de la crédibilité de leur engagement alors que l'accès aux ressources naturelles est très souvent source de corruption, voire de conflits. La transparence et le rapportage constituent également des gages sur la capacité à suivre l'efficacité des mesures engagées. Enfin, le choix des partenaires des sites d'extraction peut conditionner le succès des projets.

Perspectives de mise en œuvre dans le cadre normatif actuel

Plusieurs comités techniques de l'ISO sont concernés, plus ou moins directement, par le domaine des ressources minérales. Certains relèvent de minerais spécifiques (nickel, lithium, terres rares...), d'autres de démarches plus intégrées (management environnemental, économie circulaire...). Un comité est spécifiquement dédié à l'exploitation minière : l'ISO/TC 82. Créé en 1955 et animé par l'Allemagne, il a été réactivé en 2013 après une assez longue période en sommeil.

Un nouveau sous-comité (SC 7) a été créé en son sein afin de traiter les aspects environnementaux et sociaux de la fermeture des mines et de leur réhabilitation. Officiellement lancé en 2014, l'ISO/TC 82/SC 7 est placé, sur proposition de la Corée du Sud qui en assure le secrétariat, sous présidence française depuis 2017. Depuis, l'ISO/TC 82/SC 7 a produit différentes normes (planification de la fermeture des mines, gestion des mines abandonnées...) et vu son nombre de membres grandement s'élargir¹ (désormais plus d'une trentaine de pays dont les principaux pays miniers et de nombreux pays émergents).

En 2024, pour valoriser son positionnement et favoriser le traitement intégré de sujets majeurs (eau, gestion des résidus miniers...) sur l'ensemble de cycle de vie de la mine, le sous-comité a été invité à modifier son titre et

élargir son domaine d'application. Il s'intitule désormais "*sustainable mining and mine closure*" (« mine et après-mine responsables »), et couvre l'ensemble des thématiques concernées par le déploiement des facteurs ESG dans le domaine de l'exploitation minière, depuis la phase de conception du projet jusqu'à sa fermeture.

Il est donc le mieux placé pour animer et susciter l'émergence de travaux normatifs de portée internationale dans le domaine de la mine responsable, en liaison et interaction avec les autres comités concernés ainsi que les structures / organisations intéressées pour participer aux travaux. L'élargissement du périmètre a rapidement porté ses fruits et trois nouvelles propositions ont ainsi été récemment lancées. La première vise à partager les bonnes pratiques sur les différents aspects sociaux évoqués plus haut. La seconde concerne les démarches de valorisation des produits présents dans les résidus miniers (substances métalliques, granulats). Enfin, la troisième vise à harmoniser la réutilisation des résidus à des fins de remblayage des travaux miniers (en intégrant notamment les exigences environnementales).

Les normes ont vocation à être des documents synthétiques, aisés d'utilisation et devant être élaborés dans un délai restreint. La production de documents « cathédrales », qui veulent traiter de « tout sur tout », est donc vivement déconseillée. Dès lors, deux types d'approches sont privilégiées. Certaines normes visent ainsi à poser un cadre sur un sujet intégrateur, quitte à rester un peu générales. L'objectif est d'identifier les éléments essentiels qui doivent obligatoirement être pris en compte durant la conception et / ou la réalisation d'un projet minier (exemple de la norme en réparation sur les aspects sociaux). La deuxième approche, complémentaire, consiste à développer des normes qui se focalisent sur un sujet plus précis, ce qui permet l'élaboration de prescriptions techniques plus détaillées (typiquement la norme sur la réutilisation des résidus miniers à des fins de remblayage).

Comme explicité plus haut, de nombreuses thématiques restent encore à couvrir pour offrir un cadre intégré au déploiement d'une « mine responsable » (gestion du cycle de l'eau, efficacité énergétique, gouvernance...). Au regard de tels défis, toutes les bonnes volontés sont les bienvenues pour contribuer aux travaux importants à la fois pour la filière et pour ceux qui y concourent. En France, la commission X14A de l'Afnor accueille l'ensemble des participants qui souhaitent contribuer aux travaux, quelle que soit l'ampleur de l'implication envisagée.

Références

DIDIER C. (2007), « La politique française de prévention des risques liés à l'après-mine », *Annales des Mines - Réalités Industrielles*, novembre, pp. 86-97.

OMC (2000), Accord sur les obstacles techniques au commerce, https://www.wto.org/french/res_f/publications_f/tbttrade_f.pdf

¹ <https://www.iso.org/fr/committee/5052041.html?view=participation>

L'acceptabilité sociale des projets d'intérêt public : échelle et focale

Par Corinne GENDRON

Université du Québec à Montréal (UQAM)

Alice FRISER,

Université du Québec en Outaouais (UQO)

Et Stéphanie YATES

Université du Québec à Montréal (UQAM)

Le secteur minier des métaux stratégiques invoque sa contribution à la transition énergétique nationale pour construire son acceptabilité sociale. Or, ce discours reste peu efficace dans la mesure où la pertinence d'un projet s'évalue d'abord à l'échelle du territoire. L'intérêt d'un projet y est débattu en fonction d'une série de facteurs mêlant intérêts et valeurs, qui débordent la contribution proclamée aux intérêts supérieurs de la nation, fût-elle reconnue par un statut institutionnel. C'est pourquoi les dispositifs participatifs sont essentiels à la construction de l'acceptabilité sociale des projets miniers de la transition énergétique, car ils permettent de consolider leur pertinence aux yeux des populations riveraines.

Introduction

À l'automne 2025, cinq municipalités du Québec ont voté massivement contre un projet minier de graphite dans le cadre de référendums consultatifs : pas moins de 95 % des citoyens qui se sont prononcés ont rejeté le projet (Valois-Nadeau, 2025).

Le lieu prévu pour le projet extractif est reconnu comme destination récréo-touristique ce qui, aux yeux des citoyens, le rend incompatible avec une exploitation minière à ciel ouvert qui s'étendrait sur une quinzaine d'années. Le milieu d'affaires, qui s'est lui aussi mobilisé contre le projet, précise que l'économie de la région s'est développée autour du tourisme et de la villégiature : « Ce projet n'a aucun sens compte tenu de la vocation et des assises sur lesquelles l'économie de notre région s'est développée, dont le tourisme et la villégiature. Le projet nuirait aux entreprises, qui bénéficient des plans d'eau et des forêts de la région » (Fontaine, 2025).

L'exploitation d'une mine de graphite s'inscrit pourtant dans les velléités du gouvernement du Québec de mettre en place une filière batterie intégrée. Il n'en reste pas moins que le premier ministre a affirmé récemment, à propos d'un autre projet, qu'« Il n'y a aucun projet minier qui va se faire sans qu'il y ait une acceptabilité sociale. C'est vrai pour ce projet-là, c'est vrai pour tous les autres projets » (Saint-Arnaud, 2022). Le gouvernement a d'ailleurs refusé une aide financière au promoteur de la mine de graphite notamment en raison du manque d'acceptabilité sociale de son projet (Fontaine, 2025).

Alors que l'avenir de ce projet reste incertain, on constate combien l'acceptabilité sociale est devenue une nouvelle

norme de l'action publique au point de conditionner la réalisation de projets pourtant directement rattachés aux grandes orientations stratégiques d'un gouvernement (Simard, 2021). Mais ce que recouvre l'expression « acceptabilité sociale » demeure encore flou pour les acteurs, d'où l'intérêt de s'y attarder dans le cadre du présent texte.

L'acceptabilité sociale : entre fait, stratégie et concept

L'expression « acceptabilité sociale » est de plus en plus employée depuis les dernières années, non seulement par les acteurs mais aussi par les chercheurs qui s'intéressent à l'accueil des décisions publiques et des grands projets par les populations. Elle conserve pour certains un caractère suspect, car on l'a longtemps associée aux stratégies menées par les décideurs pour forcer l'acceptation de projets ou de décisions controversées. Le sens qu'elle revêt aujourd'hui dépasse pourtant cette acception, non seulement sur le registre empirique mais aussi comme concept théorique.

Sur le plan empirique, comme l'a bien précisé un jugement au Québec, l'acceptabilité sociale est un état de fait, et non une stratégie : « L'acceptabilité sociale se mesure à son résultat » (Cour supérieure du Québec, 2017). C'est-à-dire qu'elle se constate, et ce peu importe les moyens ou le processus engagés pour l'obtenir. L'acceptabilité sociale doit donc être clairement distinguée des stratégies communicationnelles auxquelles elle est encore trop souvent réduite.

Mais au-delà de caractériser l'accueil d'un projet ou d'une décision par une population, l'acceptabilité sociale est aussi devenue un concept théorique dont l'ambition est de comprendre et de décrire la trajectoire de cet accueil. Ainsi, plusieurs équipes de recherche ont développé des cadres théoriques visant à rendre compte des dynamiques sociales entourant l'acceptabilité sociale des projets et des politiques publiques. Aux États-Unis, dès les années 1990, Shindler et Brunson se sont intéressés à la gestion forestière et à l'accueil des zones protégées. Leurs travaux ont montré la centralité de la confiance dans les dynamiques d'acceptabilité sociale, laquelle se construit à long terme à travers un dialogue ouvert et transparent (Shindler *et al.*, 2002 ; Brunson, 1996). En France, Depraz a travaillé le concept d'acceptance inspiré d'une terminologie germanophone, en le situant par rapport à ceux d'acceptation et d'acceptabilité : l'acceptation, dont l'acceptance est la forme aboutie, désigne ce qui est jugé acceptable tandis que l'acceptabilité renvoie aux conditions et au contexte de l'acceptation, incluant les critères et les valeurs d'une population (Depraz, 2005 ; Depraz *et al.*, 2016 ; Laslaz, 2005 ; 2016). Dans le secteur extractif, où le concept de "*social licence to operate*" (licence sociale d'opérer) a longtemps prévalu, de nombreux chercheurs privilégient désormais celui d'acceptabilité sociale, plus large et compréhensif (Bergeron *et al.*, 2015 ; Moffat *et al.*, 2018).

En dialogue avec ces travaux et nourris par nos propres recherches sur l'acceptabilité sociale des décisions publiques et des grands projets industriels, nous avons proposé de l'acceptabilité sociale la définition suivante :

L'assentiment de la population à un projet ou à une décision résultant du jugement collectif que ce projet ou cette décision est supérieur aux alternatives connues, y compris le statu quo (Gendron, 2014).

Cette définition met en exergue l'idée d'un jugement collectif, qui se distingue d'une agrégation d'évaluations individuelles par le fait qu'il résulte précisément d'une dynamique sociale. Ce jugement collectif est influencé non seulement par les intérêts, mais aussi par les valeurs de la population d'accueil.

L'argument de l'utilité dans la construction de l'acceptabilité sociale

Dans le cadre d'une recherche récente, nous nous sommes intéressés à l'impact de l'utilité sociale sur l'acceptabilité des projets (Gendron *et al.*, 2021 ; Gendron *et al.*, 2024)¹. Il s'agissait de voir si l'argument d'une nécessaire transition énergétique à laquelle contribuent certains projets miniers favorise leur acceptabilité sociale.

Notre recherche a tout d'abord permis de constater que la contribution à la transition énergétique est la pierre

angulaire des stratégies de communication des promoteurs miniers. Or, selon l'enquête que nous avons menée, cet argument ne convainc pas les opposants, qui insistent sur les contradictions entre la lutte contre les changements climatiques et la préservation de la biodiversité ou du paysage. De plus, cet argument s'avère périphérique pour les citoyens qui sont favorables au projet pour des raisons économiques.

Ces résultats indiquent que pour être convaincante, l'utilité sociale d'un projet doit être reconnue par les populations, et ne peut simplement être édictée par les promoteurs. En d'autres termes, elle doit résulter d'une problématisation partagée des enjeux auxquels on cherche à répondre, bref de la co-construction d'un diagnostic commun. Or, notre enquête révèle que si les citoyens adhèrent à un projet de transition énergétique générique, ils contestent la définition qu'en proposent le gouvernement et les promoteurs, notamment le rôle central qu'y joue l'électrification et donc les projets d'extraction de minerais nécessaires à la fabrication des batteries. De plus, l'utilité sociale d'un projet est toujours envisagée par les populations à partir de leur point de vue local, si bien que la contribution à un enjeu d'ordre national ne peut se substituer à l'intérêt du projet aux yeux des collectivités riveraines. L'invocation du syndrome NIMBY ("*not in my backyard*", pas dans ma cour) discrédite cette posture d'opposition locale à des infrastructures à vocation nationale ; pourtant, du point de vue des populations riveraines, c'est plutôt le syndrome « dindon de la farce » qui caractérise le ressenti de ceux appelés à subir les inconvénients d'une infrastructure profitant à d'autres ou à la collectivité plus large (Depraz, 2024). Ce qui se joue ici est une question de justice réelle et perçue : une collectivité ne devrait pas avoir à se sacrifier pour le bien commun. Il faut minimalement qu'elle soit compensée pour les nuisances d'un projet et même que sa réalisation lui apporte un gain net.

Dans une enquête de terrain menée auprès d'une population confrontée à un projet minier controversé, Friser a observé comment se structure l'opposition et sur quels arguments elle se fonde (2023). Il appert que la qualité des relations entre le promoteur et les populations est au moins aussi importante que les caractéristiques intrinsèques du projet dans les dynamiques d'acceptabilité sociale. Au premier chef des récriminations, Friser cite en effet le sentiment nourri par les populations locales que le projet a été imposé par une entreprise qui se comporte de manière cavalière et arrogante. Un projet acceptable n'est pas simplement un projet qui respecte des conditions données, c'est avant tout un projet qui fait l'objet d'un consentement libre et éclairé, précise une des répondantes de l'enquête (Fraser, 2023, p. 11). Le projet est quant à lui jugé peu utile à l'échelle du Québec, et nuisible à l'échelle de la région. Cela témoigne du fait que l'entreprise a été incapable de faire valoir sa pertinence à travers un dialogue transparent (*ibid*, p. 8, p. 11). À la question de savoir ce qui favoriserait l'acceptabilité sociale des projets miniers de la transition, les répondants préconisent une série de conditions (*ibid*, pp. 13-17). Il s'agirait tout d'abord de s'accorder sur la nature de la transition envisagée, et de concentrer l'exploitation minière dans certaines zones. L'acceptabilité sociale devrait

¹ FRQNT – Programme de recherche en partenariat sur le développement durable du secteur minier II. 2021-2024. Quelle acceptabilité sociale pour les projets miniers de la transition énergétique ? L'influence de l'usage et des valeurs collectives sur le développement minéral au Québec.

constituer une condition d'octroi d'un claim minier, tout comme la protection de la biodiversité et de l'environnement plus largement. Enfin, les citoyens estiment qu'ils devraient être accompagnés par le gouvernement dans leurs échanges avec les entreprises, et que celles-ci devraient adopter un comportement éthique allant au-delà des exigences prescrites par la loi.

Conclusion

Comme on peut le voir, l'argument d'une contribution à la transition énergétique nationale sur laquelle reposent majoritairement les stratégies d'engagement avec les parties prenantes reste insuffisant dans une démarche de construction de l'acceptabilité sociale. La pertinence d'un projet est en effet d'abord appréciée par les populations locales en fonction de leur territoire immédiat ; non pas que seuls les intérêts locaux importent, mais la participation aux intérêts nationaux est toujours évaluée à l'aune de la justice sociale entre ces intérêts et ceux du territoire local. C'est pourquoi tout projet doit faire l'objet d'un dialogue où il revient à l'entreprise de proposer des modalités qui rendent le projet pertinent à l'échelle du territoire impacté.

Dans cette perspective, les consultations en amont du projet sont de la première importance. C'est à tort que les promoteurs craignent d'entamer de telles consultations sans que leur projet soit entièrement ficelé, car en amont de sa réalisation, il s'agit surtout d'aller à la rencontre des citoyens pour mieux connaître leurs besoins et leurs attentes. Ce n'est qu'à travers une meilleure connaissance et prise en compte du milieu qu'un promoteur sera en mesure de développer un projet susceptible de recueillir l'assentiment des populations locales par la suite.

Il est donc hasardeux de prétendre soustraire les projets jugés d'intérêt national des dispositifs consultatifs comme le prévoit la Loi visant à bâtir le Canada – Projets d'intérêt national et comme l'avait proposé le gouvernement Barnier fin 2024². Alors que de telles propositions visent à accélérer la réalisation des projets, elles pourraient avoir l'effet inverse en incitant la population à une « participation sauvage », seule disponible une fois les canaux officiels de dialogue disparus, et à des opérations de blocage conflictuelles et coûteuses (Rosanvallon, 2014). *A contrario*, on peut saluer les nouvelles dispositions du code minier français qui renforcent les processus consultatifs locaux à toutes les étapes et élargissent formellement l'analyse environnementale aux impacts sociaux et économiques d'un projet³.

²La Loi visant à bâtir le Canada a été présentée dans le cadre du projet de loi C-5 (Loi sur l'unité de l'économie canadienne) et sanctionnée le 26 juin 2025 :

https://www.parl.ca/Content/Bills/451/Government/C-5/C-5_4/C-5_4.PDF

Le Projet de décret modifiant les catégories de projets soumis à la Commission nationale du débat public (CNDP) en France a été soumis à la consultation publique fin 2024 :

https://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/projet_decret_projets_industriels_cndp_03122024.pdf

³Décret n°2025-851 du 27 août 2025 relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain.

Bibliographie

BERGERON K. M. *et al.* (2015), « Mesurer l'acceptabilité sociale d'un projet minier : essai de modélisation du risque social en contexte québécois », *Vertigo*, 15(3).

BOUDREAU-LAPIERRE D. & YATES S. (2023), Cadrage militant entourant des projets « nécessaires » à la transition énergétique. Colloque international Vent Debout ! Dynamiques communicationnelles, mobilisations écologiques et participations citoyennes contemporaines, Paris, 23 novembre.

BOUDREAU-LAPIERRE D. & YATES S. (2024), « Cadrage des communications entourant des projets miniers s'inscrivant dans la transition énergétique du Québec », 91^e congrès de l'ACFAS, Ottawa, 14 mai.

BOUTILIER R. G. & THOMSON I. (2011), "Modelling and measuring the social licence to operate: fruits of a dialogue between theory and practice", *Proceedings*, International Mine Management. En ligne : <http://sociallicense.com/publications/Modelling%20and%20Measuring%20the%20SLO.pdf>

COUR D'APPEL DU QUÉBEC. (2020), « Ressources Strateco inc. c. Procureure générale du Québec », Jugement 200-09-009554-178, Formation : les honorables Jean-François Rancourt, Suzanne Gagné et Geneviève Cotnam, 13 janvier.

COUR SUPÉRIEURE DU QUÉBEC. (2017), « Ressources Strateco inc. c. Procureure générale du Québec », Jugement 200-17-022389-159, sous la présidence de l'honorable Denis Jacques, 21 juin.

DEPRAZ S. (2024), L'acceptabilité sociale Un concept révélateur des concurrences collectives et des dissonances individuelles face à la nature, colloque Acceptabilité sociale, Entretiens du Centre Jacques Cartier, mercredi 16 octobre 2024, colloque L'acceptabilité sociale de la transition écologique : enjeux, controverses et vivre-ensemble Montréal, <https://shs.hal.science/halshs-04744595v1/file/Pr%C3%A9sentation%20EJC%20-%20SDEPRAZ.pdf>

DEPRAZ S., CORNEC U. & GRABSKI-KIERON U. (dir.) (2016), *Acceptation sociale et développement des territoires*, Lyon, ENS Éditions, coll. « Sociétés, espaces, temps », 270 p.

DEPRAZ, S. (2005), « Le concept d'"akzeptanz" et son utilité en géographie sociale : Exemple de l'acceptation locale des parcs nationaux allemands », *L'Espace géographique*, 34(1), pp. 1-16.

FERRANT, A. (2023), « Extraire plus pour sauvegarder la planète ? Justifications d'un projet minier de la transition énergétique », *Vertigo*, 23(2), <https://doi.org/10.4000/vertigo.41081>

FERRANT A. (2023), « Les projets miniers de la transition : intensifier l'extractivisme sous couvert de la lutte aux changements climatiques », *LeClimatoscope*, 5, pp. 141-145.

FERRANT A., LALANDE, J. (2024), « S'interroger sur l'utilité sociale des projets miniers de la transition :

revue de littérature de la notion d'utilité », 91^e congrès de l'ACFAS, Ottawa, 14 mai.

FONTAINE A. (2025), « La mobilisation s'organise contre le projet de mine de graphite La Loutre », *Le Devoir*, publié le 8 juillet.

FRISER A. (2023), Rapport d'analyse des entrevues menées avec les acteurs du milieu. Projet de mine de graphite au Québec. Cahier du CRSDD, 17 p.

FRISER A., FERRANT A., LALANDE J. & CHYNGWA A. (2024), « Le paradoxe des projets miniers de la transition : une utilité perçue toute relative de deux projets de graphite au Québec », 91^e congrès de l'ACFAS, Ottawa, 14 mai.

FRISER A. (2022), Session thématique « Enjeux socioéconomiques », colloque Construire ensemble la recherche sur les MCS pour une économie VERTE, Laval Université Laval, le 24 mai.

GENDRON C. (2014), « Penser l'acceptabilité sociale : Au-delà de l'intérêt, les valeurs », *Revue internationale de communication sociale et publique*, 11, pp. 117-129.

GENDRON C. *et al.* (2021), Quelle acceptabilité sociale pour les projets miniers de la transition énergétique ? L'influence de l'usage et des valeurs collectives sur le développement minéral au Québec. FRQNT – Programme de recherche en partenariat sur le développement durable du secteur minier II, 2021-2024.

GENDRON C., FRISER A., YATES S. & ARPIN M.-L. (2022), "Social acceptability of energy transition paths", Congrès DEEPSURF, Nancy, le mardi 18 octobre.

GENDRON C., FRISER A., YATES S., FERRANT A., LALANDE J. & BOUDREAU-LAPIERRE D. (2024), Quelle acceptabilité sociale pour les projets miniers de la transition énergétique ? L'influence de l'usage et des valeurs collectives sur le développement minéral au Québec. Présentation des résultats du projet. [Communication orale]. Québec Mines + Énergie 2024, Québec, 21 novembre.

GOURGUES G. & SEGAS S. (2021), Chapitre 10. La démocratie participative : entre techniques de gouvernement et pratiques sauvages », in FRINAULT T., LE BART C. & NEVEU É. (éd.), *Nouvelle sociologie politique de la France*, Armand Colin, pp. 137-150.

LALANDE J. (2022), « La trajectoire des savoirs citoyens : Le cas du développement d'un projet minier québécois », *Vertigo*, <https://journals.openedition.org/vertigo/37761>

LALANDE J. & FERRANT A. (2022), La transition énergétique comme argument de légitimité de nouveaux projets miniers d'extraction du lithium au Québec : le cas de la mine Authier. ACFAS, 11 mai. (en ligne).

LALANDE J., FERRANT A., FRISER A., GENDRON C. & YATES S. (2024), « Dynamique d'opinion et de cadrage : sondage sur le degré de favorabilité face à des projets miniers de la transition énergétique au Québec », 91^e congrès de l'ACFAS, Ottawa, 14 mai. DOI : <https://zenodo.org/records/11198759>

LALANDE J., YATES S. & GENDRON C. (2022), La mise en valeur de la norme VDMD dans les communications des compagnies minières en territoire québécois : quelle utilité ?, Académie des controverses et de la communication sensible, 16 novembre, Paris.

LALANDE J., YATES S. & GENDRON C. (2022), La mise en valeur de la norme VDMD dans les communications des compagnies minières en territoire québécois : Quelle utilité ? Académie des controverses et de la communication sensible, Paris, 16 novembre.

LASLAZ L. (2005), *Les zones centrales des Parcs Nationaux alpins français (Vanoise, Ecrins, Mercantour) : des conflits au consensus social ? Contribution critique à l'analyse des processus territoriaux d'admission des espaces protégés et des rapports entre sociétés et politiques d'aménagement en milieux montagnards*, thèse de doctorat en géographie, Université de Savoie, 644 p.

LASLAZ L. (2016), *Avide d'espaces, vol. 2 - Mémoire inédit : Protéger en montagne. Une polymogéographie des politiques environnementales au défi de l'acceptation sociale*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Savoie Mont Blanc, 437 p.

MOFFAT K. *et al.* (2018), "Understanding the social acceptance of mining", in LODHIA S. K. (éd.), *Mining and sustainable development: Current issues*, Routledge-Taylor & Francis, Chaoter 3, <https://doi.org/10.4324/9781315121390-3>

ROSANVALLON P. (2014), *La contre-démocratie. La politique à l'âge de la défiance*, Paris, Seuil.

SAINT-ARNAUD P. (2022), « Pas de mine sans acceptabilité sociale, affirme Legault », *Le Devoir*, publié le 2 sept..

SIMARD L. (2021), « L'acceptabilité sociale : trajectoire d'une nouvelle norme d'action publique », *Politique et Sociétés*, 40(3), pp. 29-62.

SIMARD L. (2021), « L'acceptabilité sociale au Québec : nouvel instrument normatif d'action publique », *Revue internationale de psychosociologie et de gestion des comportements organisationnels*, 27(69), pp. 17-44.

TANCHON M. & KROLIK C. (2024), « Les ententes avec le milieu d'accueil d'un projet minier : propositions de bonnes pratiques juridiques », 91^e congrès de l'ACFAS, Ottawa, 14 mai.

VALOIS-NADEAU B. (2025), « Un "Non" catégorique contre le projet minier La Loutre », *Le Devoir*, publié et mis à jour le 1^{er} septembre

ZHANG A. *et al.* (2015), "Understanding the social licence to operate of mining at the national scale: A comparative study of Australia, China and Chile", *J. Cleaner Production*, 108, pp. 1063-1072.

La politique française en matière de minerais et métaux stratégiques

Par Benjamin GALLEZOT

Délégué interministériel aux approvisionnements en minerais et métaux stratégiques

Le renforcement de la sécurité des approvisionnements est l'une des pierres angulaires de la souveraineté industrielle. Ce défi est d'autant plus grand que plusieurs décennies d'internationalisation et d'optimisation par les coûts des chaînes de valeur ont augmenté très fortement les dépendances des industriels aux approvisionnements extra-européens. Le cas des minerais et métaux stratégiques en constitue un exemple archétypique, comme l'analysent abondamment les articles de ce numéro des *Annales des Mines*.

La diversification des sources d'approvisionnement et la réponse aux besoins croissants de l'économie impliquent de développer de nouvelles capacités de production en France, en Europe et à l'international.

Chaque métal présente à cet égard des défis différents, selon la partie de la chaîne d'approvisionnement où se situent les goulots d'étranglement, et selon les horizons de temps.

De manière générale, les ressources géologiques sont disponibles et géographiquement diversifiées, et ce d'autant plus qu'une grande partie de notre planète n'a pas été explorée. S'agissant de l'extraction, le défi est essentiellement d'accélérer les projets, et de disposer du cadre économique et réglementaire adapté.

Les technologies nécessaires à la transformation et au recyclage sont disponibles et accessibles, mais l'enjeu est essentiellement de mobiliser les capacités d'investissement et de financement afin de donner un cadre économique adapté.

Dans ce contexte et sur la base des recommandations du rapport remis par Philippe Varin en 2022, le gouvernement a défini une politique publique relative aux minerais et métaux stratégiques. Elle est mise en œuvre par la Délégation interministérielle aux approvisionnements en minerais et métaux stratégiques (DIAMMS), qui coordonne l'action des différents départements ministériels et établissements publics concernés, et assure la relation des pouvoirs publics avec les filières industrielles et nos partenaires internationaux. La DIAMMS, dont la mise en place avait été recommandée par Philippe Varin, est une structure légère – le délégué et son adjoint – d'impulsion et d'animation d'une politique publique, dans une logique de gestion de projet et de subsidiarité.

La stratégie française pour les minerais et métaux stratégiques est élaborée conjointement avec les filières industrielles de l'amont et de l'aval, et comporte une dimension majeure de coopération européenne et internationale. Elle s'appuie sur des moyens d'interventions très

importants pour soutenir le développement de projets industriels. Cette politique publique nouvelle, rendue nécessaire par la croissance des besoins, l'accroissement des tensions géopolitiques et l'inefficacité des seuls mécanismes de marché, a d'ores et déjà obtenu des résultats très significatifs au cours des premières années de sa mise en œuvre, illustrant la mobilisation de l'ensemble des acteurs et en particulier de l'État.

Améliorer la connaissance des chaînes de valeur et d'approvisionnement, se préparer à des crises d'approvisionnement

Le premier pilier de cette stratégie consiste à disposer d'une connaissance fine des chaînes de valeur, et à évaluer la criticité des différents matériaux, en fonction de projections de l'offre et de la demande, de la concentration géographique des chaînes de production aux différentes étapes (extraction, transformation, recyclage) et des possibilités de substitution. C'est dans ce but qu'a été constitué l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI), dont les travaux font l'objet d'un article spécifique dans ce numéro des *Annales des Mines*.

Il est en effet essentiel d'adapter notre stratégie, à chacun des métaux, aux spécificités de leurs chaînes de valeur, et en particulier à l'analyse des points de fragilité de celle-ci, aux différentes échelles de temps. En outre, ces analyses dépendent des types d'usages en aval pour les différentes filières industrielles, et donc ne peut se faire qu'en relation très étroite avec celles-ci.

Le domaine des minerais et métaux stratégiques est, à ce titre, particulièrement complexe :

- une cinquantaine de métaux différents, représentant des tailles de marché en volumes et en valeur extrêmement variés (de la dizaine de millions de dollars à la centaine de milliards de dollars) ;

- chacun de ces métaux intervenant sous des formes différentes selon les usages spécifiques, et étant élaboré à l'issue de nombreuses étapes de transformation ;
- la quasi-totalité des secteurs industriels sont concernés ;
- les informations relatives à ces marchés et aux détails des chaînes de valeur ne sont généralement pas disponibles en sources ouvertes ;
- les besoins évoluent.

L'association très étroite des filières aval et l'analyse fondée sur les chaînes de valeur et non sur les seules activités extractives constituent une spécificité de l'approche française.

L'OFREMI réalise également des tests de résilience qui visent à examiner les conséquences des ruptures d'approvisionnement. Une méthodologie a ainsi été développée et est partagée avec nos partenaires européens.

S'agissant de la constitution de stocks stratégiques, si l'Union européenne n'a pas, à ce stade, pris de mesures générales prescriptives, en France, la loi de programmation militaire 2024-2030 a prévu des dispositions permettant au ministère des Armées d'enjoindre à ses fournisseurs de constituer des stocks à des niveaux suffisants. La constitution de stocks est en effet une mesure particulièrement adaptée pour la sécurisation des approvisionnements de la BITD en métaux stratégiques : les quantités mises en jeu sont en général relativement faibles en valeur absolue et au regard des besoins globaux de l'industrie, et leur coût reste limité au regard du coût total d'un équipement militaire. Ceci suppose un travail en amont pour identifier précisément les bonnes quantités et la forme adaptée, qui doit être cohérent avec les différents usages et les capacités dans la chaîne industrielle en aval.

Les mesures de priorisation et de réquisitions prévues par la loi de programmation militaire constituent également des moyens importants, ce qui suppose d'identifier préalablement les capacités correspondantes.

Des travaux sont en cours concernant la constitution de stocks stratégiques pour les besoins plus larges de l'industrie, en fonction des besoins des différentes filières, et dans une perspective intégrant la dimension européenne. La France considère, à ce titre, que l'Europe doit se doter de tels stocks.

Développer les capacités d'extraction et de raffinage de matières premières critiques sur le territoire national

Le second pilier consiste à développer, chaque fois que possible, les capacités d'extraction, de raffinage et de recyclage sur le territoire national.

Afin de soutenir la création de capacités industrielles, la France a mis en place un éventail de mesures de soutien financier et d'appui à la réalisation de cette ambition, qui a d'ores-et-déjà permis de faire émerger une quinzaine de projets d'usines sur le territoire ainsi que l'extension des capacités de production d'une dizaine de sites existants :

- L'appel à projets « Métaux critiques » du plan France 2030, opéré pour le compte de l'État par Bpifrance, vise à soutenir des usines de production de métaux critiques. Doté d'un budget de 400 M€, il soutient déjà **23 projets, soit 2,3 Mds€ d'investissements capacitaires encouragés par une aide publique cumulée de 240,7 M€.**
- L'appel à projets « Solutions innovantes pour l'amélioration de la recyclabilité, du recyclage et de la réincorporation des matériaux » du plan France 2030, opéré pour le compte de l'État par l'ADEME, vise à soutenir le développement de solutions innovantes de recyclage. Doté d'un budget de 120 M€, il a ciblé six thématiques dont les métaux stratégiques, et a permis de financer et d'accélérer la mise sur le marché de solutions innovantes en matière de conception des produits, de collecte et tri des déchets, de préparation des déchets et matières au recyclage, et la réincorporation de la matière recyclée dans de nouveaux produits. **11 projets concernant les métaux critiques ont été ainsi soutenus, soit 135,3 M€ d'investissements encouragés par une aide publique cumulée de 47,9 M€.**
- La loi « industrie verte » votée fin 2023 a, notamment, créé le crédit d'impôt au titre des investissements en faveur de l'industrie verte (C3IV), pour soutenir le financement de projets industriels clés pour quatre filières de la transition écologique : batteries, éolien, photovoltaïque, pompes à chaleur. **À ce jour, sept projets de production de métaux critiques et de l'éolien ont bénéficié du crédit d'impôt, soit près de 4,1 Mds€ d'investissements encouragés par une aide globale d'environ 809 M€.**
- **La constitution d'un fonds d'investissement** par Infravia et abondé par l'État à hauteur de 500 M€ de France 2030 ambitionne d'investir dans des projets d'extraction, de raffinage ou de recyclage de métaux critiques, avec en contrepartie une sécurisation de volumes à destination des industriels français ou européens. La première levée de fonds a été réalisée, et les premiers investissements sont en cours d'analyse.
- **La garantie des projets stratégiques (GPS)**, qui permet de garantir le financement bancaire de projets à l'étranger ou en France, sous condition de matérialisation d'intérêts français du côté des clients *via* la signature de contrats d'approvisionnement long terme. Plusieurs projets lauréats des dispositifs de France 2030 devraient également bénéficier d'une telle garantie de financement.

Ces outils constituent un effort important de l'État. Ils ont, notamment, permis l'émergence de nombreux projets structurants dans plusieurs filières clés comme celles de la filière batteries (par exemple les projets soutenus produiront l'équivalent de 40 % des besoins en lithium des usines françaises de production de batteries), aimants permanents (100 % de nos besoins nationaux en terres rares lourdes pourraient être sécurisés *via* les deux projets soutenus), recyclage de déchets électroniques, de l'aluminium et du cuivre (production de 90 % des besoins nationaux en fils de cuivre en 2028).

Encadré 1 : 7 projets ont été soutenus grâce au C3IV

CAREMAG, Carester – Lacq (Pyrénées-Atlantiques)

Le projet CAREMAG doit permettre de produire plus de 500 tonnes de dysprosium et 100 tonnes de terbium par an par séparation de terres lourdes, ainsi que 800 tonnes de terres rares légères *via*, notamment, le recyclage d'aimants permanents usagés. Il doit permettre de sécuriser 10 % des besoins mondiaux à l'horizon 2030. Ce projet générera 92 emplois à Lacq et 13 emplois à Vénissieux. Ce projet est également lauréat de l'AAP « métaux critiques » de France 2030.

CoRaLi, Viridian Lithium – Lauterbourg (Bas-Rhin)

Le projet CoRaLi consiste en un projet de raffinage de lithium visant une production de 25 000 tonnes d'hydroxyde de lithium par an à partir de 2028, et pourrait permettre de développer des capacités de production additionnelles. Le site sera alimenté à partir de carbonate de lithium acheté sur le marché mondial ou sécurisé par les clients du site, qui seront des constructeurs automobiles, des *gigafactories* de cellules et des producteurs de matériaux actifs de cathode. Ce projet, également lauréat de l'AAP « Métaux critiques » de France 2030, portera la création de 130 emplois en phase d'exploitation.

Electro Mobility Materials Europe, Grand Port Maritime de Bordeaux, Parempuyre et Blanquefort (Gironde)

Electro Mobility Materials Europe développe un projet d'usine de raffinage de sulfates de nickel et de cobalt sur l'emprise foncière du Grand Port Maritime de Bordeaux, à partir d'hydroxydes mixtes de nickel et de cobalt. Il pourrait répondre jusqu'à 30 % des besoins en cobalt et nickel des usines françaises de batteries, et prévoit de créer 200 emplois directs.

VANGUARD, Borax Français - Coudekerque-Branche (Nord)

Le projet Vanguard consiste en la construction d'une unité de conversion de carbonate de lithium en

hydroxyde de lithium pour le marché des batteries, d'une capacité nominale de 12 000 tonnes par an, en complément de la production historique de produits boratés. La production commerciale débutera à partir de 2028. Jusqu'à 65 emplois directs pourraient être créés.

NEOMAT CAM, Orano & XTC New Energy – Loon-Plage (Nord)

Le projet consiste à produire des matériaux actifs de cathode (CAM) pour le marché des batteries. Le projet, constitué de deux unités de production d'une capacité annuelle de 50 000 tonnes (soit 100 000 tonnes au total), débutera en 2028 et permettra de sécuriser les besoins en CAM des *gigafactories* européennes équivalant à l'équipement de 700 000 à 1 000 000 de véhicules électriques, selon la capacité de la batterie. Près de 800 emplois pourraient être créés à horizon 2030 par le projet à l'atteinte de la pleine capacité de production.

BREES, Solvay – La Rochelle (Charente-Maritime)

Le projet vise à transformer l'outil industriel du site de La Rochelle pour l'adapter spécifiquement à la séparation de terres rares lourdes et légères (néodyme, praséodyme, dysprosium ou terbium) nécessaires à la fabrication des aimants permanents pour, notamment, le secteur de l'éolien et du véhicule électrique. Le projet prévoit la création de 50 emplois et la requalification de 30 autres.

EMILI, Imerys – Echassière et Saint-Victor (Allier)

Le projet EMILI consiste en l'exploitation d'un gisement souterrain de mica lithinifère dans l'Allier. Le projet devrait permettre de produire annuellement 34 000 tonnes d'hydroxyde de lithium (soit les besoins de l'équivalent de 700 000 véhicules électriques). Il est prévu que la production commerciale débute en 2030. Le projet EMILI prévoit la création de 170 emplois directs. Il comporte également une phase de développement de plusieurs pilotes industriels.

34 projets soutenus¹ dans le cadre de deux appels à projets de France 2030

France 2030 a contribué au déploiement de 34 projets dans plusieurs domaines de production (ou développement) de métaux critiques sur le territoire (représentant plus de 2,5 Mds€ d'investissements productifs) pour un montant global d'aides de 288,6 M€. Jusqu'à 2 700 emplois directs pourront être générés par l'ensemble des projets conduits à leur terme.

Production de métaux critiques pour batteries (extraction, raffinage, recyclage) :

Les projets soutenus vont permettre de traiter les besoins en métaux critiques pour la fabrication des batteries lithium-ion, et participent à la consolidation d'une offre domestique en matières premières critiques pour la production de cellules dans les *gigafactories*

françaises (trois *gigafactories* auront démarré leur production commerciale en 2025) et pour les constructeurs automobiles animés par la volonté de sécuriser davantage leurs approvisionnements. À titre d'exemples, les projets soutenus par France 2030, en cas de succès, pourraient satisfaire plus de 40 % de nos besoins en lithium au bon niveau de pureté attendu, et plus de la moitié de nos besoins en graphite artificiel nécessaire à la production de matériaux d'anodes pour l'électrode négative de cellules de batteries. Plusieurs projets visent également à développer de nouvelles technologies de recyclage de batteries ainsi qu'une offre souveraine concernant la production de matériaux actifs pour les cathodes des batteries lithium-ion.

Ces douze projets ont fait l'objet d'une aide globale de 114,6 M€.

¹Liste et description des projets en annexe.

Production de terres rares pour aimants permanents contenus dans des composants automobiles et éoliens (raffinage, transformation, recyclage) :

Les trois projets soutenus, portés par Carester et MagReeSource, vont permettre de réduire la dépendance nationale concernant la production de terres rares et d'aimants permanents. Le projet de Carester à Lacq permettra, notamment, de couvrir jusqu'à 10 % des besoins mondiaux à horizon 2030 et 100 % de nos besoins nationaux en terres rares lourdes.

L'aide mobilisée sur ce périmètre est de 48,5 M€.

Production d'aluminium par voie de recyclage

Quatre projets d'investissements productifs, ainsi que deux projets de R&D, vont permettre d'accroître significativement les capacités de recyclage d'aluminium sur le territoire (augmentation de la capacité sur deux sites existants et création de deux nouvelles usines de recyclage de déchets en aluminium). Ces nouvelles capacités viennent augmenter la production de billettes d'aluminium bas carbone, à destination notamment du secteur du bâtiment et des infrastructures. Elles permettront de réduire les importations de billettes d'environ 50 % et de diminuer les risques inhérents à la dépendance de l'industrie française par rapport à la quasi-totalité des importations de Russie. Plus généralement, grâce à l'ouverture de nouvelles capacités de recyclage encouragées par les plans France Relance et France 2030, 70 % des besoins des industriels français à horizon 2030 pourraient être satisfaits par la production nationale primaire et le recyclage (hors besoins en aluminium contenu dans des produits importés).

L'ensemble des projets a pu bénéficier d'une aide globale de 33,7 M€.

Production de cuivre par voie de recyclage

Deux projets concernent le développement de la filière de recyclage du cuivre sur le territoire. Le projet de Nexans va, notamment, permettre de renforcer notre souveraineté dans les approvisionnements en cuivre raffiné et la production de fil à contenu bas carbone et recyclé (voir Encadré 2).

L'autre projet soutenu prévoit la mise en place d'une boucle d'économie circulaire pour la valorisation du cuivre issu du démantèlement des sous-stations du réseau ferré national.

L'aide totale mobilisée sur ces deux projets de recyclage est de 16,8 M€.

Production de métaux précieux via le recyclage de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) et d'autres déchets industriels riches en métaux critiques

Plusieurs PME et ETI industrielles innovantes et travaillant dans le domaine du recyclage des métaux contenus dans les DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques) ont été soutenues pour augmenter leur capacité de production ou diversifier leur capacité de traiter des métaux via le développement de nouveaux procédés.

Quatre projets ont reçu un soutien de 37 M€.

Production de métaux critiques divers, matériaux métalliques, matériaux avancés et composites se substituant à des métaux critiques pour applications industrielles variées

Ce dernier lot de projets a totalisé un soutien de 36,45 M€.

S'agissant des projets extractifs sur le territoire national, dans le cadre de la politique nationale des ressources et usages du sous-sol (PRUSS), document qui a été soumis à consultation au premier semestre 2025, le gouvernement a très clairement indiqué sa volonté d'utiliser chaque fois que possible les ressources du sous-sol national pour répondre aux besoins d'approvisionnement en minerais et métaux critiques.

Les projets structurants qui ont ainsi été engagés dans le domaine du lithium dans l'Allier et en Alsace permettraient de répondre à près de ¾ des besoins nationaux.

S'y ajoute la décision majeure de **lancer un inventaire des ressources minérales** et d'y consacrer plus de 60 M€, qui manifeste clairement l'intention de valoriser le sous-sol national. En complément est lancé **un inventaire du potentiel en matières premières critiques contenues dans les déchets** issus des carrières et des mines, qu'il s'agisse d'anciens sites ou d'installations en exploitation. Une base de données des sites fermés sera mise à disposition du public sous forme numérique. Les pouvoirs publics s'appuieront sur ces résultats pour prendre et adapter des mesures pour encourager la valorisation des matières premières critiques issues des déchets d'extraction, et en particulier de ceux qui se situent sur des mines et carrières fermées.

Encadré 2 : Encourager le développement de Nexans pour renforcer notre souveraineté dans les approvisionnements en cuivre raffiné et la production de fil à contenu bas-carbone et recyclé

Le projet Nexagreen, porté par Nexans avec le support industriel de l'équipementier italien Continuous Properzi, constitue en une extension des capacités de fusion et de production de fil de cuivre de l'usine historique de Lens (Pas-de-Calais), et représente un investissement stratégique de plus de 90 M€ appuyé par le soutien de l'État dans le cadre de France 2030.

Il a pour objectif de produire 240 000 tonnes par an de fil de cuivre dont 80 000 tonnes par recyclage de cuivre secondaire grâce à la technologie apportée par son partenaire italien. Cela représente une augmentation de la capacité actuelle de la fonderie de Lens de près de 50 %. Avec cet investissement permettant de couvrir l'équivalent de 90 % des besoins français annuels en fil de cuivre, Nexans initie le développement d'une filière circulaire de recyclage de cuivre en France, assure une indépendance stratégique en fourniture de cuivre, et continue de soutenir l'emploi industriel en France.

Par ailleurs, pour l'ensemble des projets industriels, outre les moyens de soutien financiers mentionnés ci-dessus, l'État, aux niveaux national et territorial, accompagne les industriels dans la recherche de sites et simplifie les procédures d'autorisation des projets. Le dispositif des projets nationaux d'intérêt majeur (PNIM) doit permettre à cet égard une accélération significative des procédures d'autorisation.

Une politique européenne ambitieuse et des partenariats internationaux pour diversifier nos approvisionnements

Dès l'année 2022, la France a demandé à la Commission européenne d'élaborer une stratégie ambitieuse pour les matières premières critiques. Elle a très fortement contribué aux négociations du Critical Raw Material Act (CRMA), et est pro-active dans sa mise en œuvre.

Ce règlement européen est entré en vigueur en mai 2024, un an après la proposition de la Commission européenne, ce qui constitue un délai particulièrement court au regard des pratiques habituelles des textes européens.

La Commission a lancé le premier appel à candidature pour la reconnaissance « projets stratégiques » pour les projets susceptibles d'apporter une contribution significative à la sécurité de l'approvisionnement de l'Union en matières premières stratégiques. Le 25 mars 2025, la Commission a officiellement labellisé 61 projets stratégiques parmi les 140 postulants. Ces lauréats contribuent, notamment, à sécuriser de manière significative les approvisionnements européens, et respectent des standards ESG exigeants. Ils pourront bénéficier d'une accélération des autorisations de permis et d'un accès facilité aux financements européens. **La France représente le plus grand nombre de projets labellisés, avec 9 projets lauréats (listés en annexe).**

L'OFREMI a mis au service de l'Union européenne ses **compétences reconnues au niveau international sur les tests de résistance**, qui vont être effectués régulièrement sur les chaînes de valeur des matières premières critiques. Ces tests qui sont réalisés avec les industriels concernés prévoient **d'explorer et d'identifier les vulnérabilités** tout au long de la chaîne de valeur. L'objectif est de prendre des mesures d'atténuation des risques, le cas échéant, comme la diversification des approvisionnements, la substitution, le recyclage,

Première étape dans une politique européenne des matières premières critiques, le CRMA est néanmoins insuffisant et doit être approfondi.

Les autorités françaises ont salué les conclusions du rapport de Mario Draghi qui préconise d'aller au-delà du Critical Raw Materials Act et de mettre en place une plateforme qui regroupe les ressources dispersées afin de gérer un stock stratégique et des achats groupés.

La France soutient la mise en place d'une plateforme européenne au service de la compétitivité des

entreprises utilisant des matières premières stratégiques. Un outil puissant associant la Commission et les États membres qui le souhaitent visant à constituer un levier majeur pour soutenir les projets de capacités d'extraction, transformation et recyclage de matières premières critiques en Europe.

Afin de renforcer la compétitivité des industriels, cette plateforme devrait combiner plusieurs missions afin de dégager des synergies :

- **Un système d'achat de matières premières** destiné, d'une part, à agréger la demande des entreprises intéressées établies dans l'Union qui consomment des matières premières critiques, et, d'autre part, à solliciter des offres auprès des fournisseurs en vue de répondre à cette demande agrégée. Différents types d'achats devront être considérés (contrats de court / moyen / long terme) en fonction des matières premières ainsi que des dispositifs de financement de ces achats (outils de financement commerciaux, garanties...);
- **Des stocks stratégiques** pilotés et structurés à l'échelle européenne, ainsi qu'au niveau des entreprises, pour sécuriser les disruptions de chaînes de valeur de court terme ;
- **Un soutien financier**, mobilisant l'ensemble des leviers de financement de l'UE, à des projets en Europe et à l'international (extraction minière, transformation, et recyclage de matière première stratégique) afin de réduire les dépendances européennes sur toute la chaîne de valeur.
- **Un outil d'expertise** capitalisant sur les différentes missions pour apporter au États membres une bonne connaissance des chaînes de valeur.

Sur le plan international, une feuille de route pour une diplomatie des matières premières critiques a été adoptée dès 2022. Cette stratégie s'est traduite par le développement des partenariats stratégiques avec les pays prioritaires pour nos approvisionnements.

15 partenariats bilatéraux sur les minerais critiques ont été signés par la France à ce jour, dont ceux avec l'Argentine, l'Australie, le Brésil, le Canada, le Chili, l'Indonésie, le Kazakhstan, le Maroc, la République démocratique du Congo, la Serbie, et le Vietnam.

Ces partenariats ont déjà permis d'accompagner des projets stratégiques pour les entreprises françaises et de susciter des opportunités pour les filières. Ils ont également permis d'engager des coopérations techniques, pour établir un environnement favorable aux investissements durables, et de renforcer les coopérations sur la formation et le soutien à des standards extractifs ambitieux.

Le déploiement de ces partenariats est assuré par les différents services de l'État, le ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, la DIAMMS, Business France, mobilisés sur la question des métaux matières premières critiques *via* des échanges réguliers avec les services des États affinitaires et partenaires et les entreprises françaises et étrangères impliquées dans des projets d'intérêt.

Le projet Caremag, soutenu par les États français et japonais, est emblématique des actions de sécurisation de nos approvisionnements en métaux critiques en lien avec la diplomatie des métaux

Le développement de l'usine de recyclage d'aimants permanents et de séparation des terres rares lourdes de Carester à Lacq est un projet emblématique des actions de sécurisation des approvisionnements en métaux critiques. Soutenu par l'État en partenariat avec le gouvernement japonais, il permettra de répondre à 10 % de la demande mondiale en 2030 alors qu'il n'existe aujourd'hui pas d'alternative aux productions chinoises.

Le projet permettra, notamment, de produire 500 tonnes par an de terres rares lourdes à partir de la filière primaire et secondaire (*i.e.* le recyclage d'aimants permanents usagés), intrants critiques pour la filière éolienne et les véhicules électriques. Il permettra également de créer 92 emplois.

Représentant 185 M€ d'investissements productifs, ce projet est rendu possible grâce à l'engagement à hauteur de 106 millions d'euros de l'État Français (via France Relance, France 2030 et le crédit d'impôt industrie verte) depuis le début du projet.

Cet ambitieux projet industriel est également rendu possible grâce au soutien de l'État japonais. En effet, l'Organisation publique japonaise pour la sécurité des métaux et de l'énergie (JOGMEC) et Iwatani Corporation, société privée japonaise, via leur co-entreprise Japan France Rare Earth Company, se sont engagées financièrement à hauteur de 110 M€ en fonds propres et en dette d'actionnaires dans l'usine Caremag. Cet investissement s'accompagne par ailleurs de la signature d'un accord d'achat long terme pour la fourniture au Japon d'oxydes de terres rares lourdes produits par Caremag.

Les politiques mises en place depuis 2022 ont permis d'engager une dynamique très forte sur le territoire national et avec nos partenaires européens et internationaux, afin de diversifier les approvisionnements des industriels. Cette dynamique a, en particulier, permis le développement de projets structurants.

Les résultats obtenus en moins de trois ans, pour une politique nouvelle, sont très encourageants.

Au regard des compétences françaises et européennes, de la disponibilité des ressources géologiques mondiales et de leur diversité géographique, il est tout à fait possible de répondre aux besoins de nos industries dans le cadre d'approvisionnements diversifiés.

Cependant, les défis restent considérables.

1. Les délais de développement des projets sont très importants. **Tous les efforts doivent être portés sur le raccourcissement des délais**, en appliquant en particulier les nouvelles technologies.

2. Paradoxalement, alors que les besoins à long terme vont accroître les prix, des métaux sont à un niveau bas, en particulier s'agissant de ceux relatifs à la filière des batteries. Cette situation freine considérablement le développement des nouveaux projets, qui, pour une partie importante d'entre eux, ne trouvent pas de rentabilité à ces niveaux de prix. **Les prix de marchés sont essentiellement construits sur un équilibre de court terme et ne donnent pas de signal sur le long terme, ce qui est particulièrement pénalisant pour les métaux émergents. Il est nécessaire de faire évoluer la structure des marchés vers des contrats de long terme pour donner une visibilité permettant de développer les projets.**

3. **Les restrictions commerciales deviennent de plus en plus prégnantes**, notamment compte tenu des tensions croissantes entre les États-Unis et la Chine. Le cas des terres rares en constitue le cas le plus illustratif. Les projets lancés en France avec le soutien du gouvernement permettent d'offrir des solutions concrètes de désensibilisation. Mais ils monteront en puissance progressivement, et la situation à court terme restera très tendue.

Pour répondre à ces défis, nous mettons tout en œuvre pour accélérer et approfondir la mise en œuvre des politiques engagées.

En particulier au niveau européen, la France a demandé une politique plus ambitieuse, avec des moyens de l'Union européenne supplémentaires et dédiés aux métaux critiques, et la mise en place d'une agence européenne assurant les fonctions de stockage, d'achats groupés et de soutien aux projets à la hauteur des défis.

La France a également demandé des mesures de régulation du marché européen pour que les industriels fassent évoluer leurs politiques d'achat, en vue d'atteindre les objectifs de diversification. L'achat au moins-disant en termes de prix à court terme, qui a caractérisé les comportements des entreprises au cours des dernières décennies, a en effet conduit à des dépendances excessives.

Ces régulations permettront de construire un environnement favorable au développement des projets français et européens et des projets conjoints avec nos partenaires internationaux.

Les outils de financement mobilisés pour le soutien à la filière des métaux critiques

Par Massimiliano PICCIANI

Direction des Filières industrielles de Bpifrance

L'exposition des nouvelles technologies pour la transition énergétique aux approvisionnements en métaux critiques est désormais identifiée comme un problème majeur, non seulement d'ordre géopolitique mais aussi économique.

La volonté de s'affranchir de certaines sources d'approvisionnement en minerais brutes ou raffinés, notamment en provenance de Chine ou des filières contrôlées par des acteurs chinois, pose aux industriels français et européens une équation économique souvent difficile à résoudre : dépenses pour développer des nouveaux procédés, sécurisation de la chaîne de valeur et de la rentabilité de chaque étape de production, validation de choix d'investissement significatifs et risqués.

Dans ce contexte, et afin de dé-risquer des initiatives industrielles nécessaires pour la souveraineté économique, mais présentant une rentabilité incertaine, la France a entrepris un effort significatif de soutien aux entreprises de la filière, à la fois avec des aides d'État avec financements non dilutifs, un crédit d'impôt et un fonds d'investissement dédié.

Le secteur des métaux critiques est connu pour être fortement capitalistique, avec des besoins de financement conséquents à la fois en phase d'exploration et de développement des projets miniers, de conception des procédés – avec des efforts de R&D et d'innovation nécessaires à garantir l'efficacité des rendements d'extraction des métaux – et en phase d'exploitation industrielle pour les outils de production, accompagnés de besoins en fonds de roulement significatifs pour les acteurs réalisant les étapes d'extraction minière, de raffinage ou de recyclage.

De plus, l'exposition du secteur au cours des métaux – notamment sur le London Metal Exchange – rend les retours sur investissements assez risqués : à titre d'exemple, la hausse du prix des terres rares voulue par la Chine en 2010, déclenchant une alerte et une forte prise de conscience sur le besoin d'investissements permettant de garantir la souveraineté d'approvisionnement des pays occidentaux, fut suivie d'une baisse des prix en peu de temps, rendant tout projet d'investissement dans ce secteur non rentable pour les acteurs industriels concernés.

La prise en compte de ces éléments de risque et de fort besoin de financement pour l'amorçage de projets industriels, dans un contexte de transition verte qui rend l'indépendance en approvisionnement des métaux critiques encore plus cruciale, a déterminé dans les dernières années une volonté, à la fois de la part des États et de l'Union européenne, d'intervenir avec des outils de financement dédiés à la filière.

La mise en place de telles initiatives est issue d'un contexte en évolution depuis au moins 2014, au niveau français et européen, visant la sécurisation de métaux, considérés comme critiques pour plusieurs filières industrielles d'intérêt stratégique : la production, le stockage et la distribution d'énergie, les transports et la mobilité, la santé, l'aéronautique, le spatial, l'électronique, la défense. La Commission européenne établit par ailleurs depuis 2014 une liste de « métaux critiques » (au nombre de 34 lors de la dernière liste publiée en 2023 et reprise dans un règlement d'avril 2024¹).

Au niveau français, les travaux menés pendant les dernières années par le Comité des métaux stratégiques (COMES), ainsi que le « Rapport Varin » (janvier 2022), ont contribué de manière significative à mettre en évidence le besoin d'une source de financement permettant de réduire (au moins partiellement) la dépendance nationale par rapport à un certain nombre de métaux critiques, sur une liste élargie par rapport à celle publiée par la Commission européenne.

Ces initiatives de soutien financier aux acteurs industriels font recours à des outils classiques, classables en financements non dilutifs – notamment des aides d'État sous forme de subventions ou de prêts à taux bonifié –, des entrées au capital des entreprises du secteur, et la mise en place d'un crédit d'impôt dédié à la transition verte.

¹ [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401252 annexes 1 et 2.](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401252%20annexes%201%20et%202)

Le financement non dilutif : les appels à projets Résilience (France Relance) et Métaux critiques (France 2030)

Le plan de relance et l'AAP Résilience : « Intrants essentiels pour l'industrie »

Dans le cadre du plan de relance (2020-2022), l'appel à projets Résilience a vu un volet dédié aux intrants essentiels pour l'industrie, dont les métaux critiques. Cela a permis le financement d'une douzaine de projets dédiés au recyclage de métaux issus des batteries en fin de vie ou des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), ou encore des aimants permanents et terres rares, aidant principalement des travaux de R&D (notamment développement expérimental de procédés innovants) nécessaires pour dé-risquer la montée en maturité technologique des procédés proposés, ainsi que des premières dépenses d'industrialisation pour des entreprises de taille petite ou moyenne. D'autres projets ont permis la réalisation de programmes de R&D exploratoire, notamment par des consortia regroupant laboratoires de recherche et PME autour d'une grande entreprise.

La quasi-totalité des projets en question ont pu trouver une suite dans l'AAP Métaux critiques de France 2030, décrit ci-après, qui a ainsi constitué un vrai continuum de soutien financier, permettant d'accompagner des PME innovantes dans leur montée en capacité vers le déploiement industriel.

L'AAP Métaux critiques de France 2030

Dans le cadre du programme d'investissements France 2030, l'appel à projets « Métaux critiques » opéré par Bpifrance a eu la mission de répondre au premier de six leviers d'action, celui visant la sécurisation des matières premières. Un premier AAP, lancé en janvier 2022, s'est clôturé en janvier 2024 ; un deuxième AAP, sur le même périmètre, a été lancé en mai 2025. Dotés au global d'une enveloppe d'environ 350 M€, ces appels à projets ont pu permettre le démarrage ou la poursuite de projets industriels novateurs, et un déploiement capacitaire sur le sol français.

Par rapport aux actions menées dans le cadre de France 2030, il convient également de noter que, dans le cadre de la stratégie d'accélération « Recyclabilité », portée par le PIA4, l'appel à projets « RRR » opéré par l'ADEME incluait également un volet dédié aux métaux ; cet AAP avait cependant vocation à financer uniquement de la R&D, et a donc été complémentaire par rapport à l'AAP Métaux critiques opéré par Bpifrance, essentiellement orienté vers les projets d'industrialisation.

L'ensemble de l'écosystème industriel français travaillant sur les métaux critiques (entreprises de toutes tailles confondues) a répondu à l'AAP Métaux critiques. Le nombre relativement restreint d'acteurs dans ce domaine, ainsi que les difficultés intrinsèques au marché des métaux critiques (forte concurrence chinoise, incertitudes sur le marché des voitures électriques, difficultés

dans l'approvisionnement en matières à recycler – batteries, mais aussi DEEE et déchets métalliques –, spécificité du modèle économique lié au recyclage comme activité de « raffinage à façon² » ou vente sur des marchés internationaux très volatiles) ont fait apparaître une demande en financement légèrement moins importante que prévue, avec un reliquat sur l'enveloppe initialement dédiée, permettant un deuxième AAP. Cette issue semble essentiellement due à un effet de taille de l'écosystème : d'un côté, les PME et ETI ne peuvent pas s'engager sur des projets trop importants du point de vue financier, pouvant mettre à risque leur stabilité économique ; de l'autre, les grandes entreprises ont vocation à recevoir moins d'aides, du fait des plafonds aux taux de financement indiqués dans les régimes d'aides.

Nature des projets financés et modalités de financement

L'objectif de réduire la dépendance des métaux critiques au profit de chaînes de valeur stratégiques a été poursuivi en sélectionnant des projets ayant dépassé le stade de la R&D amont, et visant la mise en production préindustrielle ou industrielle avec déploiement de moyens capacitaires de production, sur des volumes pertinents de métaux. Les projets se positionnent sur l'ensemble de la chaîne de valeur industrielle :

- la production de métaux primaires et issus du recyclage ;
- le développement de méthodes, de technologies et de processus visant la numérisation et l'automatisation de la production de matières premières ;
- l'utilisation des métaux, pour réduire les dépendances aux métaux, en jouant à la fois sur la consommation spécifique, les volumes nécessaires, les qualités suffisantes et les substitutions possibles pour une même fonction.

Ces projets devaient clairement identifier les marchés avals (en France, dans l'Union européenne, voire au niveau mondial) destinataires des métaux considérés, ainsi que leur localisation géographique principale, et en évaluer l'évolution des parts de marché pouvant être sécurisées grâce au projet.

Les aides proposées ont été octroyées en subventions et avances remboursables à taux bonifié, récupérées à partir de trois ou quatre ans après la fin du projet financé.

Analyse thématique des projets sélectionnés

Il est possible d'identifier plusieurs domaines pour lesquels l'AAP a contribué au déploiement d'initiatives d'industrialisation :

- Lithium et métaux pour batteries (toutes formulations confondues), sur plusieurs segments de la chaîne de valeur : extraction de mica lithinifère en Auvergne ; raffinage de carbonate de Li de qualité technique à LiOH de qualité batteries ; recyclage de batteries Li-Ion ou LFP avec extraction de Co, Li, Mo par voie hydro-métallurgique. De par leur nature, ces projets seront soumis aux aléas du marché des métaux.

²Indiqué couramment comme "tolling".

- Terres rares pour aimants permanents (véhicules électriques, éolien), visant l'installation d'usines dédiées au raffinage (par séparation) d'oxydes de terres rares à partir de concentrés miniers et d'aimants permanents, ou à la production d'aimants permanents pour différentes applications industrielles *via* un procédé de recyclage en « boucle courte ».
- Recyclage de grands volumes d'aluminium, par recyclage de déchets en aluminium, permettant la production de billettes d'aluminium « bas-carbone », à destination du secteur du bâtiment. Les projets financés, visant la production d'environ 130kt/an de billettes d'aluminium recyclé, ont permis d'augmenter de manière très significative les installations de recyclage par fusion des déchets d'aluminium en France, et de couvrir ainsi le besoin national annuel (aujourd'hui déficitaire de 40kt/an par rapport aux besoins extrudeurs, et d'environ 200kt/an par rapport aux besoins globaux de profilés d'aluminium) et rééquilibrer ainsi la balance commerciale française dans le secteur.
- Recyclage de cuivre, avec une ligne de production de fil machine de cuivre à partir de déchets basse teneur (cathode et scrap), en intégrant une technologie dédiée permettant d'éviter l'utilisation de matières premières issues de mines, notamment depuis le Chili.
- Métaux critiques ou précieux issus de DEEE et autres déchets industriels par plusieurs PME et ETI industrielles innovantes et travaillant dans le domaine du recyclage des métaux des cartes électroniques, du titane aéronautique et d'autres métaux (gallium, germanium). Les aides ont permis l'extension de leurs lignes de production (augmentation de capacité) ou la diversification de leur capacité d'extraction de métaux *via* le développement de nouveaux procédés, et de renforcer de manière significative leur positionnement commercial à l'échelle nationale et européenne.
- Divers : métaux ou matériaux métalliques pour applications industrielles avec industrialisation de procédés en phase de maturation technologique avancée, ou à extension de capacités productives déjà installées, pour des entreprises ayant pu montrer qu'un besoin de montée en gamme ou en capacité de production était essentiel afin de maintenir ou conforter leur position sur les marchés respectifs.

Les vingt-trois projets financés ont permis des retombées importantes au niveau des territoires, avec l'extension, la réhabilitation ou la reprise d'installations industrielles préexistantes. Les retombées en termes d'emplois sont assez variées (de quelques unités à plusieurs dizaines d'ETP par projet).

Également, la mise en œuvre des projets a été aussi analysée sous le prisme de la décarbonation des procédés et des produits, et de la protection de l'environnement :

- les projets d'extraction minière ont montré une attention particulière à la protection de l'environnement et des ressources naturelles (eau, notamment), et aux actions de prévention et remédiation des sites concernés ; il faut noter à cet égard une réforme

du code minier dont le décret d'application est sorti le 25 août 2025³ ;

- les projets de raffinage de minerais, en particulier *via* des procédés hydro-métallurgiques, ont affiché des procédés spécifiquement conçus pour minimiser la consommation en eau et gérer de manière optimale le rejet d'effluents ;
- les projets de recyclage de métaux ont pu faire valoir leur impact positif en termes d'économie circulaire et de réduction du bilan carbone des produits finaux ;
- les autres projets, visant essentiellement des investissements industriels pour l'augmentation de leurs capacités de production, prévoyaient de manière plus générale une optimisation de la consommation énergétique et une meilleure efficacité des procédés.

Verrous technico-économiques mis en évidence

Si certains métaux, comme le lithium, peuvent être extraits en France et en Europe (en fonction des études, dans des proportions pouvant pallier, jusqu'à combler, les besoins nationaux et européens), pour d'autres, la sécurisation de l'approvisionnement et la réduction de la dépendance doivent passer par une action multiple de : recyclage et raffinage des matières déjà présentes, sous forme de produits en fin de vie, sur le territoire ; mise en place de contrats d'approvisionnement en minerais depuis des pays producteurs hors UE ; et montée en capacité de raffinage sur le territoire européen, de manière à sécuriser aussi les segments intermédiaires de la chaîne de valeur.

Les projets de raffinage de minerais sont structurellement dépendants de l'importation depuis des pays hors Union européenne, mais le financement d'usines de raffinage en France ou en Europe permet de rapatrier un segment crucial de la chaîne de valeur.

Les projets de recyclage de métaux issus de batteries et DEEE, de cuivre, ou de silicium, font face aux verrous technico-économiques caractéristiques de l'économie circulaire, à savoir la collecte, le tri et l'acheminement des déchets. Dans ces cas, les porteurs de projets ont souvent recours à une série de contrats d'approvisionnement d'éco-organismes (français ou européen) ou à des grands acteurs industriels souhaitant récupérer, à la fin du cycle de vie des dispositifs produits, les métaux contenus (approche de « raffinage à façon »). Dans les contrats de financement pour ces projets, des conditions concernant les contrats d'approvisionnement et de vente des métaux récupérés ont été étudiées.

Les projets visant la production de billettes d'aluminium « bas carbone » représentent un cas particulier, car essentiellement porté par des acteurs de l'extrusion souhaitant se doter de fours de fusion permettant ainsi de réutiliser directement, *via* des installations industrielles sur le sol français, les déchets de production et les produits en fin de vie. Le besoin de sécurisation dans ce schéma est certainement moindre.

³<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000052142340>

Le financement dilutif : le fonds Métaux critiques opéré par InfraVia

Toujours dans le cadre du programme France 2030, l'État a décidé de mobiliser 500 M€ pour des investissements au capital d'entreprises de la filière, à travers la mise en place d'un fonds Métaux critiques destiné à soutenir la transition énergétique et sécuriser les approvisionnements de l'industrie française et européenne.

InfraVia Capital Partners, société d'investissement créée il y a 15 ans, a été désignée comme gestionnaire de ce fonds, et a annoncé un montant cible de 2 Mds€, les investisseurs privés pressentis pour ce fonds étant les industriels du secteur les plus directement concernés, ainsi que les nombreux investisseurs institutionnels soucieux de participer à la transition énergétique. Avec une durée initiale de 25 ans, le fonds se place dans une perspective de long terme.

Le fonds visera, en France et à l'international, à améliorer les chaînes d'approvisionnement des métaux critiques (notamment lithium, nickel et cobalt). Les investissements couvriront des projets portant sur toute la chaîne de valeur ajoutée de ces métaux – de l'extraction à la transformation et au recyclage.

Le crédit d'impôt : C3IV

Un autre instrument, essentiellement dédié à alléger les charges des industries souhaitant déployer une production industrielle de métaux critiques, est le nouveau crédit d'impôt au titre des investissements dans l'industrie verte⁴ (C3IV), entré en vigueur en 2024 et destiné aux entreprises qui développent des projets industriels dans quatre filières clés de la transition énergétique : batteries, éolien, panneaux solaires, pompes à chaleur.

Sont éligibles à ce crédit d'impôt la production d'équipements, la production de composants essentiels conçus et utilisés principalement pour la production des équipements, et la production ou la valorisation des matières premières critiques nécessaires à la production des équipements et des composants définis aux points précédents.

Le C3IV est calculé sur la base du coût des investissements corporels (bâtiments, installations, équipements, machines et terrains) et incorporels (droits de brevet, licences, savoir-faire ou autres droits de propriété intellectuelle), avec un taux de 20 % des investissements réalisés.

Pour en bénéficier, il est nécessaire d'obtenir l'agrément préalable par la DGFIP, délivré après avis conforme de l'ADEME.

Conclusion

La mise en œuvre d'une série bien articulée d'interventions de financement, telles que présentées ci-avant, a permis de renforcer l'amorçage sur le territoire national d'une filière d'acteurs industriels producteurs de métaux critiques, composée de « jeunes pousses », entreprises innovantes, ou grands acteurs industriels en transition. Certains acteurs ont pu passer de l'échelle laboratoire au pilote industriel, voire au site de production, en mettant à profit des technologies développées en laboratoire ; d'autres ont su remettre en activité les *savoir-faire* historiques de cette filière industrielle, ou se renforcer sur leur propre chaîne de valeur.

En termes d'emplois, de réindustrialisation, et surtout de sécurisation d'un approvisionnement souverain et durable en métaux critiques, les retombées des projets financés directement ou soutenus *via* les crédits d'impôts et les investissements en fonds propres pourront être évaluées seulement à horizon 2028-2030, c'est-à-dire une fois les programmes d'industrialisation ayant abouti à une production en plein régime.

Néanmoins, même si certains projets peuvent traverser quelques difficultés – par ailleurs, tout à fait courantes pour des programmes industriels d'envergure – sur l'ensemble, le suivi des projets indique une dynamique de déploiement positive. En particulier, puisque les besoins du marché français et européen d'approvisionnements en cuivre, aluminium, terres rares et aimants permanents, métaux pour l'électronique et superalliages, ne font que s'accroître, notamment dans un contexte de fortes tensions géopolitiques, les projets financés maintiennent tout leur sens, non seulement en termes de souveraineté, mais aussi de rentabilité économique.

Seuls les projets les plus liés aux batteries (et notamment à leur recyclage) semblent fortement impactés par le ralentissement de ce marché, et les incertitudes sur les politiques industrielles européennes.

En conclusion, l'effet de dé-risquage technologique et de marché visé par les aides d'État et les crédits d'impôt, ainsi que l'effet de levier permettant de mobiliser des capitaux privés en complément de l'intervention publique, semblent avoir bien réussi dans leurs objectifs. En perspective, grâce à ces financements, la filière française des métaux critiques semble être en mesure de s'affirmer comme un des acteurs de référence sur le marché européen et mondial, notamment sur la partie du raffinage et recyclage des métaux. Pour que cette dynamique se poursuive, il sera indispensable de garantir un soutien politique aux niveaux national et européen dans la continuité à ce secteur, non seulement d'ordre financier mais aussi normatif et de protection du marché, afin de lui permettre de surmonter des éventuelles futures difficultés ou tentatives de "dumping".

⁴ <https://www.economie.gouv.fr/actualites/credit-impot-investissements-industrie-verte-C3IV#> ; <https://www.impots.gouv.fr/professionnel/questions/puis-je-pretendre-au-credit-dimpot-au-titre-des-investissements-en-faveur>

La sécurité énergétique au cœur de la diplomatie des minerais et métaux critiques

Par Maël LE BAIL

Chef du pôle Énergies à la direction de la Diplomatie économique du ministère de l'Europe et des Affaires étrangères

Les minerais et métaux critiques sont un enjeu géopolitique majeur. Les distorsions du marché couplées à des stratégies de prédation et « d'arsenalisation » des ressources minérales complexifient le paysage.

La diplomatie des métaux critiques de la France est un levier essentiel de souveraineté économique et industrielle. En s'adossant à une stratégie européenne, en mobilisant ses réseaux diplomatiques et en nouant des partenariats équilibrés, la France se positionne face aux puissances déjà bien engagées dans la bataille des ressources.

La France doit contribuer à assurer une approche multilatérale, à rebours des tentations protectionnistes brutales et transactionnelles qui émergent. Elle est aujourd'hui identifiée comme un partenaire fiable et volontaire sur la scène internationale, mais cette stratégie ne pourra réussir qu'à condition d'être durable, équitable et alignée avec les engagements de la transition écologique. Les enjeux de recyclage, d'innovation, et d'économie circulaire seront déterminants pour réduire la pression extractive sur les ressources primaires.

Introduction

Les minerais et métaux critiques sont un enjeu géopolitique majeur. Cela tient à leur concentration géographique et aux dépendances engendrées, en particulier vis-à-vis de la Chine. Ces dépendances s'accroissent et concernent aussi bien l'extraction que le raffinage. Elles doivent être traitées à un niveau à la fois bilatéral, européen et multilatéral en raison de la taille limitée du marché français, qui ne peut constituer le seul débouché. Les distorsions du marché couplées à des stratégies de prédation et « d'arsenalisation » des ressources minérales complexifient le paysage.

La diplomatie française des métaux critiques mise en œuvre depuis 2022 est un levier essentiel de souveraineté économique et industrielle. En s'adossant à une stratégie européenne, en mobilisant ses réseaux diplomatiques et en nouant des partenariats équilibrés, la France se positionne face aux puissances déjà bien engagées dans la bataille des ressources.

À l'échelle internationale, un nouveau chantier se dessine : celui d'une gouvernance mondiale des métaux critiques, qui garantisse un accès juste, transparent et soutenable à ces ressources clés de notre avenir commun. La France doit contribuer à assurer une approche multilatérale, à rebours des tentations protectionnistes brutales et transactionnelles qui émergent.

Mais cette stratégie ne pourra réussir qu'à condition d'être durable, équitable et alignée avec les engagements de

la transition écologique. Les enjeux de recyclage, d'innovation, et d'économie circulaire seront déterminants pour réduire la pression extractive sur les ressources primaires.

Minerais et métaux critiques : enjeu majeur de sécurité énergétique

Le nouvel or stratégique

Les ressources énergétiques sont, depuis la Seconde Guerre mondiale, centrales dans les rapports de force internationaux. Le pétrole, le gaz, ou encore l'uranium sont depuis lors des ressources clés pour le développement économique et la projection militaire. Mais ils ont été rejoints depuis les années 2010 par les métaux critiques du fait de l'explosion des besoins tirés par les transitions énergétiques et numériques. C'est ainsi qu'aux conflits historiques autour de l'or noir ou du gaz naturel liquéfié (GNL) (russe) sont venus se rajouter des conflits d'accès aux métaux critiques comme au Kivu (République démocratique du Congo).

Un paradigme nouveau est apparu avec l'impératif de décarbonation. Les États se sont ainsi engagés, au travers de l'Accord de Paris en 2015, à limiter le réchauffement sous 1,5°C par rapport aux niveaux pré-industriels. La COP28, à Dubaï en 2023, a approfondi ces engagements avec des déclarations de triplement

des capacités renouvelables d'ici 2030¹ et nucléaires d'ici 2050².

Pour répondre à ces enjeux, la demande mondiale en minerais et métaux critiques explose. Selon l'Agence internationale de l'Énergie (AIE), un véhicule électrique requiert 6 fois plus de minerais qu'un véhicule thermique, et une éolienne jusqu'à 9 fois plus qu'une centrale à gaz à puissance installée équivalente³, soit 15 à 20 fois plus par kWh produit du fait de l'intermittence des renouvelables. D'ici 2040, la demande mondiale en lithium pourrait ainsi être multipliée par 5, celle en terres rares et en cobalt par 1,5 et celle en graphite et nickel par 2 par rapport à 2024⁴.

Cette transition énergétique indispensable s'inscrit dans une crise énergétique globale. Organiser la sortie des énergies fossiles est un impératif climatique et de sécurité énergétique, devenant un enjeu de sécurité nationale.

Une prise de conscience tardive de l'hégémonie chinoise

La Chine a très vite identifié l'importance des minerais et métaux critiques. Dès les années 1990, elle a structuré une politique industrielle ambitieuse sur ce thème en investissant massivement dans l'extraction minière et les infrastructures de la mine (énergie, logistique...),

puis dans le raffinage, d'abord sur son territoire puis ensuite à l'étranger.

Cette planification est un succès : les chaînes d'approvisionnement sont aujourd'hui largement dominées par la Chine (voir la Figure 1). Elle assure, en 2024, 69 % de l'extraction et 92 % du raffinage mondial des terres rares, et contrôle la quasi-totalité de la chaîne de valeur du graphite, du gallium ou du tungstène⁵.

La réaction des pays consommateurs est tardive. La crise sino-japonaise des Diaoyu-Senkaku en 2010 constitue le premier exemple d'utilisation des métaux comme arme géopolitique. La pandémie de Covid-19 a provoqué d'importantes perturbations des chaînes d'approvisionnement. Cela a abouti en 2021 à la publication, par l'AIE, d'une évaluation faisant état d'une explosion des besoins mondiaux à venir en minerais et métaux critiques et de la domination chinoise.

Plusieurs pays ont développé des stratégies dédiées (Japon, UE, Australie - UE et les États-Unis) avec de nouveaux acteurs (Émirats arabes unis et Arabie saoudite). La France est le pays européen le plus mobilisé sur le sujet et a intégré ces enjeux dans sa politique industrielle dès 2022 au travers d'une stratégie nationale dédiée et d'une diplomatie active.

Les pays producteurs s'organisent pour mettre en place des filières locales de raffinage et de transformation, d'une part, pour capter une part croissante de la valeur ajoutée et soutenir leur développement, d'autre part, pour réduire leur dépendance à la Chine (Indonésie sur le nickel, RDC sur le cobalt).

¹ <https://www.cop28.com/en/global-renewables-and-energy-efficiency-pledge>
² <https://world-nuclear.org/news-and-media/press-statements/six-more-countries-endorse-the-declaration-to-triple-nuclear-energy-by-2050-at-cop29>
³ <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
⁴ <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>

⁵ <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>

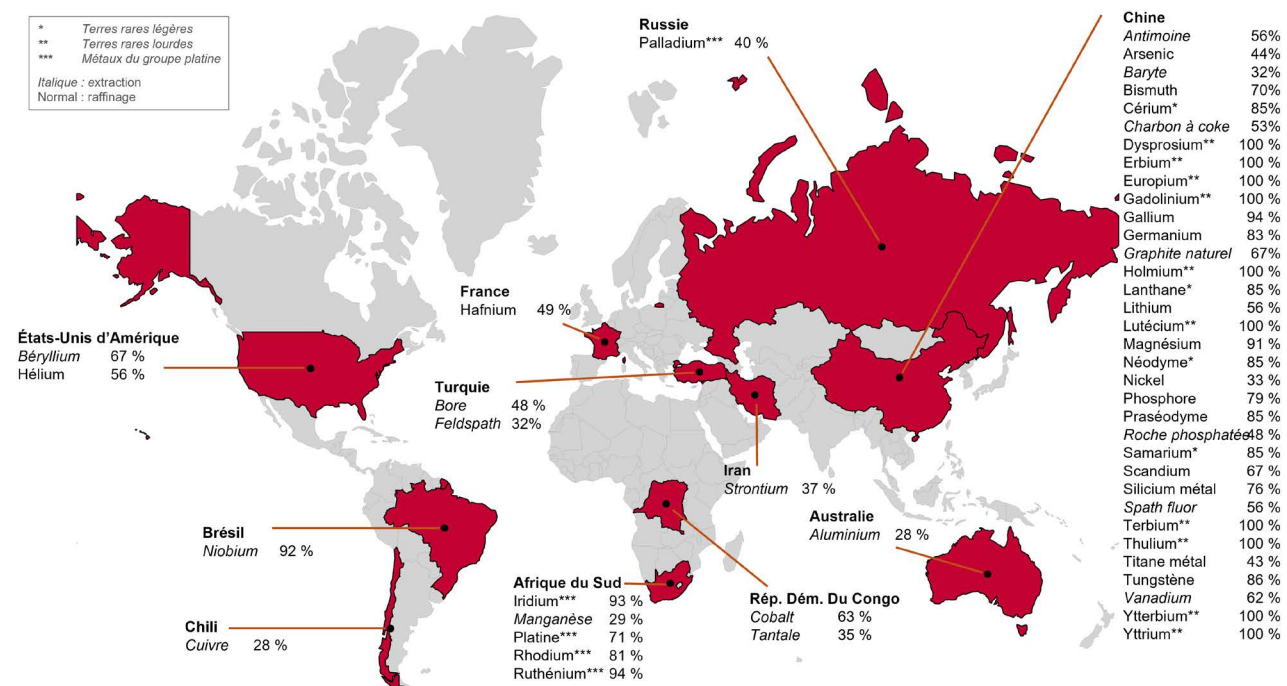


Figure 1 : Principaux producteurs et extracteurs de minerais et métaux critiques (Source des données : Commission européenne, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Grohol M. & Veeh C., Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report, Publications Office of the European Union, 2023, <https://data.europa.eu/doi/10.2873/725585>).

Une arsenalisation grandissante des ressources

La concentration des minerais et du raffinage génère des dépendances dans des filières stratégiques (énergie, défense, aéronautique, microcomposants...). Ces ressources sont des outils de pression efficaces, et permettent des stratégies de prédation et « d'arsenalisation ».

La Chine est le premier pays à avoir utilisé les métaux critiques pour des pressions politiques en 2010 sur le Japon dans le cadre du conflit territorial concernant l'archipel des Senkaku-Diaoyu. À la suite d'un incident maritime, la Chine a imposé des restrictions sur les exportations de terres rares vers le Japon pendant deux mois, ce qui a eu des conséquences directes : les prix des terres rares ont temporairement flambé entre novembre 2010 et l'été 2011.

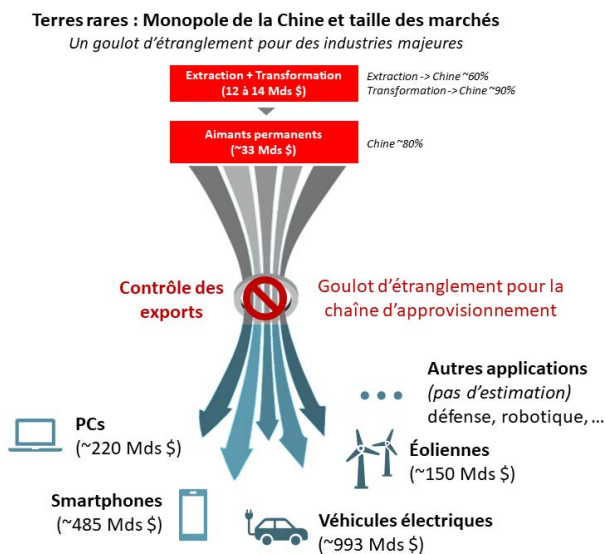


Figure 2 : Monopole de la Chine sur les terres rares et impact potentiel du contrôle des exportations sur les marchés associés*

Depuis, la Chine a mis en place des licences d'exportation avec une dimension extraterritoriale pour pouvoir les utiliser dans ses négociations commerciales et politiques (voir Figure 2), à l'image de la guerre commerciale avec les États-Unis. De leur côté, les États-Unis mettent en place une stratégie agressive, ciblant les pays producteurs avec des velléités expansionnistes (Canada, Groenland) ou dans une approche transactionnelle (Ukraine).

* Sources : <https://www.globalgrowthinsights.com/fr/market-reports/permanent-magnets-market-111972>
<https://www.researchandmarkets.com/reports/5911097/rare-earths-mining-processing-global-market>
Véhicules électriques : <https://www.statista.com/outlook/mmo/electric-vehicles/worldwide?srsId=AfmBOoow7uJ0lCu9oVlyPVLCTBQV11UuwrRgoe4PRgdDldArGhCWHUR5>
Smartphones : <https://www.statista.com/outlook/cmo/consumer-electronics/telephony/smartphones/worldwide?srsId=AfmBOoQb0aeYVO7iab5mppFqFIsRL0zqT-AsmE72vZkvwE-c0ULu3GU>
Ordinateurs : https://www.statista.com/outlook/cmo/consumer-electronics/computing/worldwide?srsId=AfmBOorKZmki3oIN5T3WXS_McCJtNO8qFci0OKgKDOCSvVqmqzlpRjcoE
Éolien : <https://www.gminsights.com/industry-analysis/wind-turbine-market>

La diplomatie française pour sécuriser et diversifier l'accès aux minerais et métaux critiques

La France, nation minière historique (étain, or, aluminium, uranium, plomb, zinc, tungstène...), dispose d'une expertise reconnue grâce à son Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), qui jouit d'une aura internationale, et d'entreprises minières et paraminères, qui restent malheureusement de taille modeste par rapport aux géants mondiaux. Elle a été parmi les premiers pays occidentaux à réagir en se dotant d'une stratégie dédiée, après la remise du rapport Varin⁶ en 2022. Cette stratégie est coordonnée par la délégation interministérielle aux approvisionnements en minerais et métaux stratégiques (DIAMMS).

Forte du troisième réseau diplomatique mondial, la France a ainsi mis en place une diplomatie des métaux dynamique, coordonnée par le Quai d'Orsay, en appui de la DIAMMS. Cette stratégie s'appuie sur nos ambassades (chancelleries, services de coopération et d'action culturelle, services économiques), sur la mobilisation des fonds de la DG Trésor et sur l'expertise des différents ministères concernés.

La France a ainsi signé 18 partenariats en moins de trois ans, marquant notre volonté forte d'initier ou de renforcer nos coopérations à un niveau politique. Ces partenariats mettent en exergue une partie des liens entretenus par la France et les acteurs français sur les minerais et métaux critiques sans en couvrir l'intégralité.

La coopération se structure autour de quatre axes :

- **Une coopération technique sur le cadre législatif**, les investissements et la cartographie des ressources avec le BRGM. Elle constitue un premier pas pour des projets avec des industriels sur une base équilibrée.
- **Le développement de projets industriels communs**, dans un objectif de diversification et de développement local. La France a ainsi mobilisé de nombreux outils financiers du Quai d'Orsay et de la Direction générale du Trésor (Fonds Équipe France, FASEP, garantie export...) (cf. « Les outils de financement mobilisés pour le soutien à la filière des métaux critiques », pp. 101-104). On notera la création du fonds Métaux critiques InfraVia, en 2023, soutenu par l'État avec une taille cible de 2 Mds€, et l'évolution du mandat de l'Agence française de Développement (AFD), approuvée en 2024, qui réintègre le secteur minier dans les activités susceptibles d'être soutenues.

⁶ https://www.info.gouv.fr/upload/media/organization/0001/01/sites_default_files_contenu_piece-jointe_2022_01_220110_cp_métaux_strategiques_aap_def.pdf

Le Fonds équipe France (FEF) et le FASEP

- **Le FEF** est un dispositif de financement du MEAE permettant de mener des actions à impact rapide et visible au bénéfice des populations locales. Il s'agit d'un projet tremplin de 2 années maximum, il permet de préparer le terrain pour des actions à plus grande échelle avec des financements de 10 000 € à 1M€.
- **Le FASEP*** (Fonds d'études et d'aide au secteur privé) est un dispositif géré par la Direction générale du Trésor, visant à soutenir les entreprises françaises dans leur développement à l'international. Il est destiné à financer des études de faisabilité ou des projets démonstrateurs de technologies vertes et innovantes au bénéfice d'autorités publiques étrangères dans les pays en développement. Les aides attribuées vont de 100 à 800 k€.

* <https://www.tresor.economie.gouv.fr/services-aux-entreprises/le-fasep>

Notre diplomatie économique accompagne nos entreprises à l'export sur le long cours (15 à 20 ans), ce qui nécessite un appui constant. Plusieurs projets incarnent cette approche :

- au Gabon, l'entreprise française Eramet opère depuis 1959 un projet d'extraction de manganèse en investissant dans des infrastructures et la production locales ;
- en Argentine, le projet Centenario d'Eramet (cf. Présentation du projet page 123) vise à sécuriser l'accès au lithium avec une solution souveraine en développant des formations locales, des transferts de compétence et des engagements de normes environnementales, sociales et de gouvernance (ESG) ;
- le projet Caremag (cf. Présentation page 120), soutenu par la France et le Japon (cf. Encadré page 100), permettra de produire en France 500 t/an de terres rares lourdes, soit 15 à 20 % des besoins mondiaux, à partir de la filière primaire et secondaire (recyclage d'aimants permanents usagés) d'ici 2029 et de fournir une alternative aux productions chinoises. Il bénéficie d'un soutien de 106 M€ de l'État français *via* France Relance, France 2030 et le crédit d'impôt industrie verte, et d'un important financement japonais.
- **La promotion de critères ESG élevés.** Des coopérations ont été mises en place et financées telles que celle lancée en mars 2023 entre le BRGM et son homologue congolais, le Service Géologique National du Congo (SGNC).
- **Le renforcement en R&D et formation** pour faire face aux besoins du secteur (1,3⁷ million d'emplois dans le monde estimés en 2030 pour le scénario zéro net émission contre 790 000 en 2023).

S'appuyant sur l'excellence de son enseignement supérieur et son expertise dans le minier, la diplomatie française initie des partenariats universitaires pour former les futurs experts des pays partenaires. Le Quai d'Orsay en finance pour 70 M€ en 2024, qui peuvent être mobilisés pour le secteur minier.

Il convient d'investir dans la R&D et d'encourager les partenariats de souveraineté technologique partagée.

Les financements nationaux et européens permettent de nouer des partenariats de recherche, avec l'appui du réseau diplomatique français.

La France est aujourd'hui identifiée comme un partenaire fiable et volontaire sur la scène internationale, dans un contexte de concurrence agressive. La pérennité de cette stratégie est un enjeu, du fait de la différence entre le temps politique et le temps industriel.

La France actrice d'une approche multilatérale

L'indispensable structuration européenne commence à prendre forme

La France a fortement contribué aux négociations du règlement européen sur les matières premières critiques, dont elle a donné l'impulsion, notamment sous sa présidence de l'UE en 2022, et porté les objectifs. Le Critical Raw Materials Act (CRM Act), adopté en 2023 par l'UE et entré en vigueur en mai 2024, vise à sécuriser les approvisionnements de l'UE pour 34 matières premières dites critiques, en fixant des cibles à horizon 2030 pour 17 d'entre elles :

- extraire en Europe 10 % de la consommation de l'UE ;
- produire en Europe 40 % de la consommation de l'UE ;
- couvrir 25 % de la consommation de l'UE par le recyclage ;
- ne pas dépendre à plus de 65 % d'un même pays tiers.

En 2025, la Commission européenne a dévoilé 47 projets industriels stratégiques en Europe (dont 9 en France) et 13 extra-européens (Ukraine, Groenland), visant à renforcer l'extraction, la transformation et le recyclage de minerais et métaux critiques. Ils bénéficient du soutien de l'UE pour réduire les délais d'obtention de permis. Si cette identification est une excellente initiative, on peut regretter l'absence de financement dédié à ce stade.

La Commission européenne a signé plusieurs partenariats sur les matières premières critiques (Namibie, Canada, Argentine, Chili, Brésil, RDC, Serbie...), et intègre cette question dans sa politique commerciale. Cette démarche doit se poursuivre et s'opérationnaliser en lien avec les États membres, et la France jouera toute sa part.

La France agit pour une approche multilatérale forte

Les formats et initiatives multilatéraux se multiplient et sont passés d'une dizaine à une vingtaine en quelques années, sur des questions telles que la résilience des chaînes de valeur et la soutenabilité des activités minières : Mineral Security Partnership (MSP), G7, G20, formats spécialisés au sein de l'AIE et l'OCDE...

La France est active dans ces différentes instances. Elle a rejoint le MSP et assure la vice-présidence du groupe Métaux critiques créée par l'AIE. La présidence du G7 de la France en 2026 sera une occasion de porter au plus haut niveau l'importance d'une approche multilatérale sur ce sujet.

⁷ <https://www.iea.org/reports/world-energy-employment-2024>

Le Mineral Security Partnership

Le MSP est une initiative transnationale constituée de 30 membres* et lancée en 2022. Il vise à sécuriser et diversifier les chaînes d'approvisionnement en minerais et métaux critiques, et promeut des pratiques responsables, transparentes et durables.

Au G7, la présidence japonaise de 2023 a fait adopter un plan en cinq axes : anticipation de la demande et des approvisionnements ; développement des chaînes de valeur responsables ; augmentation des capacités de recyclage ; promotion de l'innovation ; et préparation à des ruptures d'approvisionnement.

*Argentine, Australie, Canada, République démocratique du Congo, République dominicaine, Équateur, Estonie, Union européenne, Finlande, France, Allemagne, Groenland, Inde, Italie, Japon, Kazakhstan, Mexique, Norvège, Namibie, Pérou, Philippines, République de Corée, Serbie, Suède, Turquie, Ukraine, Royaume-Uni, États-Unis, Ouzbékistan et Zambie.

Si ces initiatives témoignent de l'importance du sujet sur la scène internationale, leur multiplication risque d'apporter une confusion dans l'établissement de standards ESG élevés et dans l'élaboration d'initiatives concrètes. Ces instances révèlent des divergences entre les acteurs. Ainsi :

- Les consommateurs s'accordent sur la nécessité de diversifier et de sécuriser les chaînes de valeurs et de développer des financements. Des limites apparaissent cependant du fait de la concurrence pour l'accès aux ressources (accord UE-Ukraine *versus* accord États-Unis-Ukraine). Par ailleurs, les normes diffèrent : réglementation européenne exigeante et faible présence des labels privés, contre des normes plus souples en Amérique du Nord mais des labels privés plus importants.
- Les producteurs mettent en avant la valorisation locale des ressources tout en souhaitant des aides financières et un transfert de technologies. Ces positions rejoignent celles de la France qui encourage le développement de capacités locales d'extraction et de raffinage, dans une logique de soutien au développement des pays producteurs.

L'avenir de certaines initiatives est lié à la position que prendront les États-Unis de l'administration Trump II, principaux promoteurs du MSP avec l'UE, et aux tentations des États consommateurs de renforcer une logique protectionniste ou transactionnelle. La France œuvre de son côté pour défendre l'approche multilatérale.

Un exemple d'action diplomatique : la France propose un moratoire mondial sur l'extraction des ressources en haute mer

Les océans recèlent d'importantes réserves de minerais critiques estimées à plusieurs fois celles de la surface terrestre (par exemple la zone de Clarion-Clipperton couvre 9 millions de km² et pourrait contenir jusqu'à 34 milliards de tonnes de nodules, dont 340 millions de tonnes de nickel et 275 millions de tonnes de cuivre⁹). Leur exploitation en haute mer soulève cependant des risques écologiques importants et non mesurés

⁸ <https://www.ifremer.fr/fr/ressources-minerales/les-nodules-polymetalliques-des-galets-de-metaux-dans-les-abysse>

(dévastation potentielle des écosystèmes profonds et renouvellement des habitats abyssaux sur des millénaires), alors même que l'intérêt économique reste incertain par rapport aux ressources à terre, et que la faisabilité technique au-delà des prototypes poserait des problèmes de passage à l'échelle non encore résolus⁹.

Alors que certains pays souhaitent accélérer l'exploitation de ces ressources, à l'image des États-Unis avec un ordre exécutif de Trump émis en avril 2025¹⁰, la France, par la voix de son président de la République et aux côtés de 23 autres pays, a appelé à un moratoire à l'occasion de la conférence des Nations unies sur l'Océan à Nice (9 au 13 juin 2025), visant à protéger les grands fonds marins et à accélérer la recherche scientifique¹¹. L'enjeu est de trouver un équilibre entre sécurité des approvisionnements et préservation de l'océan, *via* une gouvernance mondiale renforcée.

Conclusion

Pour un secteur où les projets sont à maturation lente (quinze à vingt ans avant exploitation) et l'appui politique essentiel dans la durée, les résultats de la première phase de notre diplomatie des métaux attestent de l'effort de notre politique publique.

Partant de la quasi-absence de mention du thème des métaux critiques dans nos dialogues diplomatiques avant 2022, la stratégie issue du rapport Varin a permis un progrès indéniable avec 18 partenariats signés en 3 ans ainsi que le renforcement des dialogues bilatéraux dans le domaine. La création de la DIAMMS a consolidé l'approche interministérielle et apporté de la clarté et de la visibilité à nos actions. La mobilisation collective a ainsi renforcé la valorisation des acteurs français (BRGM, entreprises privées...), permettant une plus grande présence dans les pays partenaires. La France est aujourd'hui identifiée comme partenaire fiable et volontaire.

La poursuite de cette stratégie implique un renforcement de l'action diplomatique et du soutien aux industriels ainsi qu'un portage au plus haut niveau de nos ambitions de diversification. L'ensemble des ministères et des acteurs sont pleinement mobilisés.

Pour passer à l'échelle, il sera indispensable d'assurer la mise en œuvre de la stratégie européenne du CRM Act, et en particulier de sécuriser des fonds européens. Au niveau multilatéral, les échanges doivent se renforcer pour identifier les projets communs, coordonner les financements et garantir les meilleurs critères ESG. La présidence française du G7 en 2026 sera un temps fort de cette action collective.

⁹ Les Japonais sont parmi les plus avancés en l'espèce, et ont prévu de lancer une phase d'extraction expérimentale de trois ans en 2025, pour l'extraction de quelques milliers de tonnes de nodules de ferromanganèse par jour. Un des 10 programmes de France 2030 est dédié aux grands fonds marins : <https://www.info.gouv.fr/actualite/france-2030-premier-comite-de-pilotage-grands-fonds-marins>

¹⁰ <https://www.whitehouse.gov/presidential-actions/2025/04/unleashing-americas-offshore-critical-minerals-and-resources/>

¹¹ <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2025/06/09/pour-un-océan-préserver-protéger-les-grands-fonds-marins-en-haute-mer-de-l'exploitation-minière>

Le défi du renouvellement des compétences

Par Judith SAUSSE

Directrice de l'École nationale supérieure de Géologie, UMR CNRS 7359 GeoRessources, Université de Lorraine

Les ingénieurs en géosciences de demain devront maîtriser l'ensemble de la chaîne de valeur des matières minérales, de l'exploration au recyclage, en intégrant extraction, traitement et valorisation. L'ENSG (pour l'École nationale supérieure de Géologie), entre autres et historiquement, offre des formations initiales et continues construites sur un socle scientifique commun, enrichi de spécialisations techniques, numériques, économiques, sociétales et éthiques. L'approche par blocs de compétences métier s'appuie sur la pratique, notamment via les écoles de terrain, pour développer savoir-faire et savoir-être. Répondre aux attentes des jeunes diplômés, attachés à des carrières à fort impact sociétal, valorisant RSE et innovation, est un enjeu majeur face au déclin démographique et au risque de désintérêt pour les filières scientifiques, nécessitant le recours à de nouveaux viviers, des parcours innovants et des mobilités internationales. Enfin, une communication efficace et accessible demeure indispensable pour mieux faire connaître ces métiers.

Contexte

Face à une demande mondiale croissante et diversifiée en matières premières, l'industrie minérale doit faire face à un enjeu crucial : former de nouveaux experts miniers, qui devront conjuguer compétences techniques, économiques, environnementales et sociales dans une démarche multidisciplinaire, et contribuer à faire émerger et déployer les nouveaux standards de mine responsable. Leur rôle sera de maîtriser l'ensemble de la chaîne de valeur des matières premières, depuis l'exploration et l'extraction (ressources primaires et secondaires), jusqu'au traitement, la valorisation des résidus, le recyclage et l'économie circulaire.

Ingénieur-géologue ?

Par son mode de raisonnement singulier, l'ingénieur-géologue, géologue et ingénieur, peut contribuer de manière déterminante à résoudre des problématiques d'ingénierie dépassant le seul champ des géosciences. Le raisonnement géologique s'appuie sur une démarche naturaliste : il consiste à étudier des objets inconnus *a priori* en collectant des indices, directs ou indirects, puis à les valider, à les organiser en cohérence et à les hiérarchiser dans des échelles de temps et d'espace très contrastées.

Compétences clefs

La formation des ingénieurs-géologues développe des compétences (Sausse *et al.*, 2022) couvrant l'ensemble des dimensions des géosciences, de l'observation du terrain à l'intégration des projets dans leurs contextes sociétal et économique. Ils apprennent à analyser et interpréter des systèmes géologiques

complexes, à décrire les roches et formations, à évaluer le contexte structural et à produire les documents nécessaires à l'exploitation des données. La maîtrise des outils et techniques de reconnaissance du sol et du sous-sol leur permet de concevoir et piloter des campagnes de mesures, d'en analyser les résultats et de prendre en compte les incertitudes et changements d'échelle, tout en intégrant les outils de *monitoring* et de surveillance. La modélisation constitue une autre compétence clé : les élèves ingénieurs mobilisent calculs, simulations et outils numériques pour construire et exploiter des modèles géologiques, quantifier les ressources et réserves, et appréhender les processus multiphysiques à différentes échelles spatio-temporelles. Enfin, la formation insiste sur l'inscription des projets dans leur territoire, en intégrant les dimensions environnementale, réglementaire et sociétale, avec une attention particulière portée à la responsabilité sociale et environnementale, à l'évaluation des risques naturels et techniques, ainsi qu'à la médiation scientifique et à la gestion des impacts pour une mise en œuvre responsable et durable des projets.

L'expérience de terrain : ADN de la formation

Les écoles de terrain représentent une spécificité majeure et un élément structurant de la formation d'ingénieur en géosciences. Elles permettent aux étudiants de devenir acteurs de leur apprentissage, en appliquant sur le terrain les connaissances théoriques acquises en cours, en appréhendant la géologie de manière concrète et en développant des compétences spécifiques au travail sur le terrain. Au-delà des compétences techniques, ces écoles de terrain permettent de développer des aptitudes essentielles au métier d'ingénieur géologue : savoir observer, décrire, mesurer et analyser,

raisonner à différentes échelles de temps et d'espace, et rester attentif à son environnement. Elles offrent également une expérience humaine riche : vivre en groupe, s'adapter à des environnements variés, s'organiser et faire preuve de rigueur. Les écoles de terrain constituent ainsi un cadre privilégié pour construire et évaluer les savoir-être des étudiants, qu'il s'agisse des aptitudes à gérer un projet (définition des objectifs, sens des réalités, action en univers incertain, solidarité) ou des qualités personnelles (confiance en soi, capacité d'analyse et de synthèse, aptitude à proposer de l'aide).

« Ingénieur-géologue » dans l'industrie minérale ?

Un état des lieux complet des formations disponibles en 2024 en France métropolitaine a été réalisé afin de cartographier le spectre des métiers ainsi que les formations, spécifiques ou transversales, qui y sont associées. L'objectif était d'évaluer la couverture actuelle des thématiques par niveau de formation (intitulés, contenus, volumes horaires, crédits...) et d'en analyser la répartition géographique. Cet inventaire des formations et contenus de formation a été réalisé et présenté lors d'un atelier au Congrès de la Société de l'Industrie Minérale en 2024 à Dijon (Bour et Sausse, 2024). Plusieurs organismes de formation ingénieur sont présents en France autour des écoles d'ingénieur publiques historiques : Écoles des Mines (Mines Paris, Mines Alès, Mines Nancy) et l'École Nationale Supérieure de Géologie (ENSG). Ces formations proposent des compétences scientifique et techniques complémentaires et sont présentées pour celles amenant à un niveau Bac+5/6 dans le Tableau 1 ci-dessous.

L'École nationale supérieure de Géologie en est l'un des exemples et forme historiquement ses ingénieurs en génie minier, sur des compétences larges couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur de l'industrie minérale. Les enseignements du cycle ingénieur sont d'abord dispensés au cœur d'un tronc commun. Ils ont pour objectif de permettre à l'élève ingénieur d'acquérir une capacité d'expertise propre à l'un des grands secteurs d'activité des géosciences et de mettre en pratique les enseignements scientifiques et méthodologiques. Une démarche d'apprentissage par projet répond en même temps aux exigences d'opérationnalisation et de contextualisation des connaissances, qui caractérisent la transformation des savoirs en compétences.

A la suite de ce tronc commun, et parmi les six spécialisations proposées par l'école, l'option « Matières Premières Minérales » couvre l'exploration géologique, l'exploitation des mines et le traitement des minerais, en offrant une formation innovante en géométallurgie, basée sur les connaissances en modélisation et évaluation des ressources dans un contexte économique et géostratégique déterminé par les tensions en approvisionnement des métaux stratégiques. La formation prépare les futurs ingénieurs à maîtriser l'ensemble de la chaîne de valeur des ressources minérales (voir la Figure 1, Galin *et al.*, 2017), depuis leur exploration jusqu'à leur valorisation, dans une perspective de durabilité et de responsabilité sociétale.

Ils acquièrent une expertise en exploration géologique, en géophysique et en géochimie appliquées, renforcée par l'usage d'outils analytiques innovants et de laboratoires mobiles pour une caractérisation rapide et intégrée sur le terrain. Une large place est accordée aux compétences numériques (traitement du signal et

Tableau 1 : Les formations dans le secteur de l'industrie minérale, de niveau bac+5/6, dans les écoles d'ingénieurs publiques et leurs effectifs.

Écoles	Effectifs ingénieurs	Cycles Ingénieur (Bac+5)	Master 2 (Bac+5)	Mastère 2 (Bac+6)	Certification Professionnelle (Bac+6)	Centres de recherche associés
ENSG Nancy	~ 120	Spécialisation « Matières Premières Minérales » 30	M2 STPE « Georesources Engineering » 10	Mastère MS@ MIRIS Conférence des Grandes Ecoles « Industrie des ressources minérales et Société » 15		UMR CNRS 7359 GeoRessources, CReM « Cycle des Ressources Minérales », Université de Lorraine
Mines Nancy	~ 150	Spécialisation « Géosciences et Génie Civil » 20	M2 STPE Pacours « Exploitation Durable des Ressources Minérales » 10			UMR CNRS 7359 GeoRessources, MeMori « Mécanique, Modélisation et Risques », Université de Lorraine
Mines Paris - PSL	~ 130	2 MI Module « Ingénieur Généraliste » 30	M2 « Ressources Minérales pour les Transitions » 15			Centre de Géosciences, Centre de Sociologie de l'Innovation et CERNA / Mines Paris - PSL
Mines Alès	~ 300	Spécialisation « Ingénierie du sous-sol et Exploitation des ressources minérales » 30	Double diplôme INSERM & M2 Géosciences « Géologie de l'Exploration et des Réservoirs (GER) » 4	Mastère MS@ 2EM Conférence des Grandes Ecoles « Exploitation et Environnement Miniers » 12	France Compétences UNICEM « Manager d'Exploitation de Carrières » 10	Département « Ressources minérales & Aménagement du Sous-sol » IMT Mines Alès

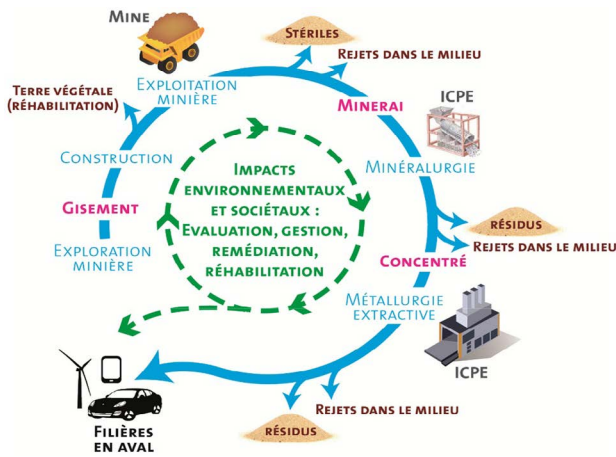


Figure 1 : Les différentes étapes de production d'un métal à partir d'un minerai (Source : Galin et al., 2017).

de l'image, télédétection, statistiques et géostatistique), indispensables pour exploiter les données massives issues des nouveaux outils d'observation.

Les étudiants sont également formés aux méthodes modernes d'exploitation minière, en surface comme en souterrain, à l'automatisation des procédés et à la conception de plans optimisés intégrant sécurité et efficacité. La minéralurgie occupe une place centrale : conception de schémas de traitement adaptés, optimisation et modélisation des procédés, pilotage d'une usine pilote industrielle en continu, avec une attention portée à la performance et aux enjeux environnementaux. À ces compétences techniques s'ajoute une compréhension des dynamiques économiques, des marchés et de la gouvernance des matières premières, complétée par des connaissances en droit minier, gestion de sites et réhabilitation environnementale. Enfin, la formation intègre la dimension sociétale en préparant les ingénieurs à dialoguer avec les parties prenantes, à analyser les impacts environnementaux et sociaux, et à concevoir des solutions innovantes et responsables répondant aux enjeux éthiques, économiques et géopolitiques contemporains.

Les élèves ingénieurs complètent leur formation par des travaux pratiques d'échantillonnage, de dimensionnement et de bilan matière. L'objectif est de les familiariser avec le fonctionnement d'une usine de traitement de minerais à l'échelle industrielle, tout en les sensibilisant aux enjeux des mines à faible impact environnemental et zéro-déchet. Ces activités s'appuient sur la Station Expérimentale de Valorisation des matières premières et substances résiduelles (STEVAL), unique en milieu universitaire européen.

Vivier ?

Nombre d'apprenants

Un enjeu majeur pour l'industrie minière et les géosciences en général est de garantir un flux suffisant de diplômés au regard d'une pyramide des âges qui n'est pas favorable, et alors même que le vivier d'apprenants se réduit tandis que la demande de professionnels, elle, augmente. La population d'ingénieurs

et cadres spécialisés (exploitation, géologie, minéralurgie, post-minier) est globalement vieillissante : une part significative (~ 35–45 %) de la génération actuelle atteindra l'âge de départ à la retraite d'ici 2035, d'après les observatoires de branche et études prospectives sectorielles (Observatoire de la Métallurgie / OPCO 2i, 2024), UNICEM & CERC, 2022). La capacité de nos formations à attirer suffisamment d'étudiants devient ainsi un enjeu majeur pour répondre à ces besoins, dans un contexte où le nombre de candidats post-bac pourrait diminuer d'environ 20 % dans les cinq prochaines années. Cette tendance est aggravée par la moindre attractivité des carrières scientifiques, renforcée par la réforme du baccalauréat, ainsi que par des effectifs en classes préparatoires aux grandes écoles, principale voie d'accès aux écoles d'ingénieurs, qui demeurent stables et donc n'augmentent pas.

Cela suppose de diversifier les sources de recrutement en mobilisant de nouveaux viviers d'élèves dès le lycée, tout en développant des parcours de formation innovants en partenariat avec le monde socio-économique, notamment à travers l'apprentissage et les contrats de professionnalisation. Plusieurs dispositifs de vulgarisation et de diffusion scientifique existent déjà, tels que les « Cordées de la Réussite », « Universcience » ou encore les Olympiades des géosciences, à destination des collégiens et lycéens. Toutefois, ces actions concernent encore trop peu les domaines liés à l'industrie minière. Il apparaît donc essentiel de sensibiliser les élèves dès la classe de seconde, avant leurs choix d'orientation et de spécialités scientifiques, par exemple en valorisant les stages de découverte du milieu professionnel de deux semaines, désormais obligatoires.

Les flux et mobilité entrante internationaux sont aussi importants à préserver avec des accords de doubles diplômes, les dispositifs Erasmus, Erasmus +, Erasmus Mundus, MIC, MSc internationaux, etc., à maintenir et / ou développer sur des pays cibles anglophones mais également francophones. Les promotions d'élèves ingénieurs ENSG en génie minier sont par exemple complétées par des étudiants internationaux du Master Erasmus Mundus Emerald, qui attire chaque année des cohortes d'une vingtaine d'élèves. Cette formation permet d'aborder plusieurs majeures telles que : *process mineralogy*, *ore body modeling*, *mineral processing*, *recycling*, et est co-portée par quatre partenaires européens : la France avec l'ENSG et l'Université de Lorraine, la Suède avec l'Université de Luleå, l'Allemagne avec l'Université de Freiberg, la Belgique avec l'Université de Liège.

Des choix de formation en conscience

Une dépêche de l'AEF du 20 octobre 2021 (n°660504, Berthier et al., 2021) soulignait déjà un phénomène en forte émergence autour de la responsabilité sociétale des entreprises (RSE) : « Des étudiants brillants, diplômés de grandes écoles et promis à un bel avenir, refusent la voie toute tracée pour vivre en accord avec leurs valeurs sociales et environnementales... ». Cette tendance reflète très clairement les aspirations actuelles de nos jeunes diplômés et des nouveaux entrants sur le marché du travail. Leur priorité n'est plus uniquement la stabilité ou la rémunération, mais avant tout le sens

donné à leur métier et la cohérence entre leurs engagements personnels et leur activité professionnelle. Ils recherchent des environnements de travail capables de concilier performance économique, innovation et impact sociétal positif.

Communiquer sur nos métiers

Les étudiants qui intègrent nos cursus en géosciences ne le font jamais par hasard. Les futurs ingénieurs arrivent avec une idée précise de leur projet professionnel, conscients que la formation au sein d'un écosystème de recherche dynamique leur permettra de développer des solutions scientifiques, techniques et sociétales innovantes. Engagés et proactifs, ils souhaitent participer activement aux décisions concernant l'exploitation des ressources du sous-sol, considérées comme un bien commun.

Pour autant, la perception du « métier de géologue » ou du rôle « d'ingénieur en géosciences » reste souvent floue pour le grand public ou les lycéens, notamment par manque d'enseignement et de sensibilisation suffisante au niveau lycée. Il est nécessaire de mettre du liant entre éducation nationale et enseignement supérieur en saisissant les inspecteurs Sciences et Vie de la terre pour organiser des échanges de la communication à destination des collègues de lycées. Comprendre les enjeux et la portée de nos métiers n'est pas automatique, et la communication au-delà des programmes académiques constitue un véritable défi. Il s'agit de transmettre des notions d'innovation, d'ingénierie durable et de transitions sociétales de manière accessible. La stratégie consiste et consistera donc à favoriser la rencontre avec différents publics, en recourant à des outils de vulgarisation et de médiation scientifique. Conférences grand public, expositions, visites de sites ou autres événements sont autant d'occasions de faire découvrir nos métiers et de rendre compréhensibles les enjeux des géosciences à tous, avec en particulier ceux de l'industrie minière.

Programmes de formation continue

Si la formation initiale demeure le cœur de l'activité, le développement de la formation continue et de l'apprentissage « tout au long de la vie » constitue un enjeu stratégique. L'implication des professionnels dans nos formations est forte, mais la réciproque reste limitée. Accréditées par la CTI (Commission des titres ingénieurs) et inscrites au RNCP (Répertoire national des compétences professionnelles), nos formations d'ingénieurs sont éligibles à la validation de blocs de compétences *via* le CPF (Compte personnel de formation). Pourtant, les offres destinées aux professionnels restent peu développées, alors qu'il est possible d'ouvrir toutes les unités d'enseignement des cycles ingénieur ou de concevoir des parcours « à la carte ».

D'autres types de formation destinées aux professionnels existent (Fleurisson *et al.*, 2020). Dans le cadre de la chaire de mécénat « Industrie Minière & Territoires », l'ENSG co-accrédite, par exemple, le Mastère spécialisé MIRIS® (« Industrie des ressources minérales et Société »), co-porté avec l'École des Mines de Paris et l'École des Mines de Nancy.

Par ailleurs, l'admission sur titre en 2^e année des cycles ingénieur constitue une voie de formation continue qui permet à des salariés techniciens d'accéder au diplôme d'ingénieur et de consolider ainsi leur progression de carrière. Enfin, la validation des acquis de l'expérience (VAE) représente une autre possibilité pour des professionnels expérimentés d'obtenir le diplôme d'ingénieur.

Bibliographie

BERTHIER D., BOS S., LANIQUE J., PIOVEZAN S. & SCHERER D. (2021), « Les diplômés des grandes écoles se détournent-ils d'une voie toute tracée pour donner vie à leurs valeurs écologiques ? », *Dépêche AEF*, n°660504.

BOUR I. & SAUSSE J. (2024), « Que faire pour les métiers de l'industrie minière ? », *Mines & Carrières*, Atelier 74^e congrès de la Société de l'Industrie Minière, Dijon.

FLEURISSON J.A., LAURENT B., GUNZBURGER Y., SAUSSE J., FILIPPOV L., CERCEAU J., FAYOL N., MANNE F., VINCHES M. & KISTER Ph. (2021), « Chaire Industrie minière et Territoires : quelques innovations en matière de formation des futurs cadres de l'industrie », *Mines & Carrières*, no 288, février, pp. 59-62.

GALIN R., URIEN P., CHARLES N. & BAILLY L. (2017), *Projet minier et parties-prenantes*, Collection « La mine en France », Tome 3, 24 p.

OBSERVATOIRE PARITAIRE DE LA METALLURGIE & OPCI 2i. (2024). Prospective des besoins en recrutement à 2030 et 2035 pour la branche professionnelle de la métallurgie. Observatoire de la Métallurgie.

SAUSSE J., FAY-VARNIER C., HAUTEVELLE Y., RAULT V. & BOUDAREL M.-R. (2022), « Une approche compétences pour des métiers en évolution », *Géologues, Hors-série 2 - Les métiers des géosciences : Évolutions et challenges*, pp. 44-54.

UNICEM & CERC. (2022) « Activité, emploi et formation dans l'industrie des matériaux – Données 2022. Observatoire des métiers de l'industrie minière ».

Pourquoi renforcer la R&D française face aux enjeux d’approvisionnement en métaux ?

Par Damien GOETZ

Professeur, Mines Paris-PSL

Et Patrick d’HUGUES

Directeur des Ressources minérales du BRGM

Afin de soutenir la stratégie française de sécurisation de ses approvisionnements en métaux critiques et stratégiques, il est indispensable de déployer des actions de recherche, de développement et d’innovation (RDI) à la fois ambitieuses et coordonnées. Dans cet article, nous proposons un panorama des initiatives en cours, tout en mettant en lumière des lacunes majeures, notamment dans les domaines de l’exploration, de l’exploitation minière et de la minéralurgie. Plusieurs pistes d’action – non exhaustives – sont suggérées afin de renforcer ces volets au service d’une mine plus responsable. Elles viendront en complément des efforts déjà engagés et contribueront à une approche globale couvrant l’ensemble du cycle de vie des métaux, de l’extraction minière jusqu’au recyclage. Au-delà de la dimension technologique, il est essentiel d’intégrer les dimensions économique, environnementale, sociale et de gouvernance pour garantir des approvisionnements responsables.

Des politiques françaises et européennes en réponse aux risques d’approvisionnement

Quels que soient les scénarii envisagés, y compris les plus sobres, les transitions énergétique et numérique génèrent une demande croissante en métaux et matériaux, en quantité comme en diversité. L’enchaînement de la crise sanitaire, de la guerre en Ukraine et des récents conflits géopolitiques et commerciaux a par ailleurs mis la lumière sur la grande vulnérabilité européenne et française face aux enjeux d’approvisionnement. L’accessibilité à la ressource minérale est donc redevenue un enjeu majeur pour les pays européens, car indispensable à leur économie et à la mise en place des transitions. L’Europe est largement dépendante des importations en métaux ainsi qu’en produits intermédiaires issus d’une production extérieure à son territoire. Ceci fragilise de nombreuses chaînes de valeur consommatrices. Cette dépendance est non seulement responsable d’un transfert de souveraineté et d’opportunités industrielles, mais elle pose également un problème éthique en transférant ailleurs les impacts environnementaux et sociaux associés à nos modes de vie.

Face à cette situation, le gouvernement français et la Commission européenne (au travers du règlement CRM Act) ont pris des dispositions incitant à réduire notre dépendance à des pays tiers, notamment ceux en

position de quasi-monopole sur certaines substances et / ou filières. Ces actions politiques s’accompagnent, en Europe, d’un soutien en recherche, développement et innovation (RDI) couvert par le programme cadre pour la recherche et l’innovation (Horizon Europe). Au niveau français, suite au rapport de Philippe Varin, une politique ambitieuse a été engagée depuis trois ans, par l’État, pour répondre aux enjeux associés aux métaux stratégiques et critiques, avec la création de la Délégation interministérielle aux approvisionnements en minerais et métaux stratégiques (DIAMMS), la mise en place de l’Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI), le lancement d’un fonds d’investissement public-privé dédié, le démarrage d’un nouvel inventaire national des ressources minérales, ou enfin le lancement d’un appel à projet préindustriels métaux critiques (France 2030). Même si ce dernier amorce un progrès, toutes ces initiatives aussi structurantes soient-elles, ne s’accompagnent pas encore d’un effort coordonné et à la hauteur des enjeux en matière de recherche, de développement et d’innovation (RDI), alors que ce levier est essentiel pour faire émerger des activités de production (mine et recyclage) innovantes, responsables et compétitives. Ce constat a été partagé depuis cinq ans dans un certain nombre de documents (rapports CGE¹

¹ https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/vulnerabilite-approvisionnement.pdf (2019).

et du CESE², Document de Politique Nationale sur les Usages du Sol et du Sous-Sol³...).

La RDI française en lien avec les enjeux d'approvisionnement

Les enjeux économiques, environnementaux, sociaux et politiques (gouvernance) en lien avec les approvisionnements en ressources minérales peuvent être déclinés sous forme de défis pour la communauté scientifique :

- Défi 1 : Caractériser, analyser et modéliser le cycle de vie des matières minérales permettant une parfaite connaissance des flux et stocks actuels et à venir (ressources primaires, secondaires ou issues du recyclage).
- Défi 2 : Explorer le sous-sol et exploiter les données pour prédire et orienter la recherche de nouveaux gisements en ressources minérales et leur potentiel de valorisation, en intégrant dès cette phase la dimension territoriale des projets et la contribution des acteurs locaux.
- Défi 3 : Développer des méthodes extractives responsables et économiquement compétitives sur des matrices minérales de plus en plus complexes tout en réduisant significativement l'empreinte environnementale.
- Défi 4 : Développer l'économie circulaire et le recyclage des métaux et matériaux sur toute la chaîne de valeur (dès la mine) en optimisant les procédés, la réglementation (y compris portant sur la conception pour favoriser le recyclage) et les modèles économiques.
- Défi 5 : Mettre en place des outils / méthodes permettant de comparer les bénéfices environnementaux et sociaux des différentes filières d'approvisionnement, et accompagner le développement des solutions sur les territoires.

Certains de ces défis sont aujourd'hui plus ou moins couverts, mais les actions et les communautés scientifiques sont dispersées. Une coordination nationale par le ministère chargé de la recherche sous pilotage global de la DIAMMS permettrait non seulement une meilleure mise en synergie des différents acteurs, projets et programmes existants, mais également de lancer des actions sur les thèmes peu ou pas couverts.

Les questions scientifiques en lien avec les enjeux d'approvisionnement en ressources minérales se retrouvent « diluées » dans la programmation de l'ANR en géologie, en chimie ou sur les écotechnologies. Deux PEPR abordent en partie les enjeux associés aux questions d'approvisionnement en métaux et matériaux : le PEPR Sous-Sol, bien commun⁴ et le PEPR Recyclage⁵ (inclus

dans une stratégie d'accélération). Le PEPR Sous-Sol, bien commun est orienté sur l'acquisition de connaissance sur l'ensemble des composantes du sous-sol et pas seulement sur les ressources minérales. Il intègre une importante dimension SHS. Il couvre les questions de R&D associées à l'anticipation de la demande en métaux et matériaux (modélisation prospective de l'empreinte matière des transitions) et la prise en compte des questions environnementales, sociales et juridiques en lien avec l'exploitation extractive du sous-sol. Il est peu orienté sur le développement d'innovations technologiques, même s'il existe un projet dédié au traitement durable des ressources minérales. En revanche, la métallurgie, l'exploration, ou encore l'exploitation ne sont pas réellement abordées. Dans le PEPR Recyclage, un cinquième du programme est dédié aux métaux stratégiques et aux objets qui en contiennent. Cela représente un investissement de 7 M€ sur sept ans. Les projets sont essentiellement technologiques et portent relativement peu sur les flux et stocks de déchets à valoriser.

Au niveau européen, les enjeux Ressources Minérales font l'objet d'appels à projets dédiés (regroupés notamment dans le *cluster 4* du pilier 2 du programme Horizon Europe). L'exploration et les procédés de valorisation des minerais sont couverts par ces appels très compétitifs, avec des niveaux élevés en TRL (*Technology Readiness Level*) et ne représentent *in fine* qu'un potentiel de financement relativement limité et très cadré pour les équipes françaises.



Usine de production de cobalt par biolixiviation (© M. Mugabi)

« Réinvestir dans les ressources minérales primaires » ?

Aujourd'hui, si la dimension recyclage est relativement bien couverte par la communauté française, c'est moins le cas sur les activités en lien avec les ressources minérales primaires (de l'exploration à l'extraction). Pour autant, les ambitions Européennes du CRM Act sont d'extraire sur le territoire Européen plus de 10% de ses besoins. Un financement national permettrait d'accompagner les initiatives européennes et fédérer autour de ce thème une communauté scientifique éclatée sur plusieurs domaines. La question des approvisionnements en métaux et matériaux se veut par essence transdisciplinaire et inter-organismes. De cet état des lieux, il est possible de conclure que les sujets spécifiquement en lien avec les ressources minérales primaires

² <https://www.lecese.fr/travaux-publies/la-dependance-aux-metiaux-strategiques-queles-solutions-pour-l-economie>

³ https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2025-03/20250314_Politique%20nationale%20des%20ressources%20et%20usages%20du%20sous-sol.pdf

⁴ <https://www.soussol-bien-commun.fr/fr>

⁵ <https://www.pepr-recyclage.fr/>

nécessitent d'être redynamisés, après de nombreuses années de mise en sommeil. Alors que la France relance un inventaire minier, il paraît nécessaire et logique de l'accompagner par des actions de RDI en soutien de l'exploration « moderne » des ressources et de l'extraction maîtrisée des cibles minérales les plus prometteuses et stratégiques. En lien avec les ressources minérales primaires et l'activité extractive, deux enjeux scientifiques et techniques majeurs semblent aujourd'hui nécessiter un effort dédié :

- Explorer plus rapidement et plus efficacement le sous-sol par l'utilisation d'approches innovantes couplant des moyens de caractérisation performants (géophysiques, géochimiques, géologiques...) et de nouveaux outils numériques (IA, science de la donnée...) permettant d'orienter la prospection de nouveaux gîtes minéralisés, tout en intégrant dès cette phase une dimension territoriale et la contribution des acteurs locaux. Cet enjeu peut également se décliner pour les déchets de l'industrie extractive.
- Développer des méthodes d'extraction et de traitement des minerais répondant au mieux aux principes du développement durable et de ses trois piliers (*i.e.*, environnemental, social, économique). L'objectif est de se doter de technologies économiquement compétitives tout en réduisant significativement leur empreinte carbone, leur emprise foncière, les volumes de déchets produits, la consommation en énergie et en eau ainsi qu'en optimisant les phases post-exploitations.

Ces travaux s'accompagnent de la nécessité de développer des outils / indicateurs performants permettant d'évaluer les externalités environnementales et sociales des différentes technologies et filières d'approvisionnement et d'accompagner le développement de solutions à l'échelle des territoires. Ils s'inscrivent dans la stratégie de renouveau d'une industrie minière responsable sur le territoire national et doivent s'intégrer aux autres enjeux scientifiques majeurs, et, notamment, la modélisation de l'évolution des flux et stocks de métaux et matériaux, l'analyse des chaînes de valeur des ressources minérales, le développement de technologies innovantes de recyclage et enfin la mise en place d'une économie circulaire dès la phase extractive.

Besoins de RDI en lien avec l'exploration minière

L'un des grands défis scientifiques associés à l'activité minière consiste à développer des approches intégrées d'exploration – de l'identification de zones favorables à la délimitation du gisement –, plus efficaces, plus rapides et moins intrusives. Une telle démarche exige le croisement de multiples technologies de terrain (géologie, géophysique, géochimie...) et l'exploitation croisée d'un grand volume de données, rendue possible par les avancées en sciences de la donnée, en intelligence artificielle et en apprentissage automatique. Un accent particulier devrait également être mis sur le renforcement des connaissances fondamentales en géosciences, notamment sur les systèmes

métallogéniques qui conditionnent la formation et la localisation des gisements. Ce socle scientifique sera complété par le déploiement de capteurs de nouvelle génération et de techniques géophysiques avancées, afin de caractériser les propriétés électrochimiques des roches et discriminer les signatures minérales en profondeur, tout en limitant l'impact sur les milieux naturels. L'objectif est de construire des modèles prédictifs robustes capables de déterminer, avec un haut niveau de fiabilité, les zones les plus favorables en ressources minérales, pour optimiser les campagnes d'exploration et réduire les délais et les impacts environnementaux liés à la découverte de nouveaux gisements.

Besoin des RDI pour l'exploitation responsable des ressources du sous-sol

Une fois les gisements identifiés, plusieurs défis technologiques devront être relevés pour rendre possible l'accès aux substances stratégiques dans des conditions économiquement viables, dans un contexte où les futures mines devront respecter également de hauts standards environnementaux, qui constituent un des éléments majeurs (même si c'est loin d'être le seul) d'une mine plus responsable, et ainsi plus acceptable par la population.

À l'heure de la décarbonation et de l'électrification des processus, les exploitations minières font encore significativement appel aux combustibles fossiles. Dans les mines à ciel ouvert, l'électrification, en particulier des camions, reste à faire, tandis que les mines souterraines sont confrontées au déploiement d'équipements sur batteries en milieu confiné. Ce passage à l'électrique sur batteries offre des perspectives nouvelles en termes de design des exploitations (en particulier récupération d'énergie par les véhicules dans les déplacements en pente descendante). Par ailleurs, les progrès que l'on peut attendre de la prospection quant à la caractérisation en 3D des gisements sont une autre source d'optimisation du design des exploitations futures. Tout en évoluant vers des exploitations de plus en plus grosses et productives, les entreprises minières ont fait d'énormes progrès en termes de sécurité au cours des dernières décennies. Pour autant, l'industrie minière reste intrinsèquement dangereuse (hétérogénéité des massifs rocheux, travail en milieu confiné dans les mines souterraines...). La mise en œuvre, dans des mines connectées, d'équipements autonomes ou *a minima* pilotés à distance, avec l'assistance éventuelle de drones, offre des perspectives importantes de limitation de l'exposition des personnels. Elle conduit également à réinterroger le nexus productivité-sélectivité, en particulier dans la perspective de chantiers souterrains de petite dimension sans accès du personnel. Enfin, toujours pour les mines souterraines, le développement des réseaux wifi, avec des équipements et des capteurs connectés, permet également d'envisager des gains significatifs de productivité, par un pilotage fin et en temps réel des opérations d'exploitation.

Enfin, il est également important de soutenir l'innovation autour des enjeux de réutilisation des stériles et des résidus miniers, *a minima* pour le remplissage des galeries, voire pour des usages de terrassement ou de génie civil.

Besoin des RDI pour le raffinage responsable des minerais

À la suite de la phase d'extraction, il est nécessaire de développer des solutions minéralurgiques en rupture pour une exploitation efficiente de matrices solides de plus en plus complexes, primaires (minerais polymétalliques) et secondaires (résidus miniers, déchets métallurgiques) et la valorisation des différents coproduits. Les étapes de préparation de la matière nécessitent souvent une réduction granulométrique importante, consommatrice d'énergie, et éventuellement productrice de particules fines, voire ultra-fines. Les actions de RDI doivent donc insister sur des méthodes d'aide au broyage comme la fragilisation de la matière (électro-fragmentation ou traitement micro-ondes). Ces méthodes permettent d'optimiser la récupération des minéraux valorisables et réduire la consommation d'énergie. Pour la concentration et le tri physique et physico-chimique (comme la flottation), l'effort portera essentiellement sur le traitement des particules fines (voire ultra fines) en voie sèche ou humide. L'optimisation du recyclage des eaux des procédés (en boucle courte) reste également un enjeu d'efficacité globale majeur. Il conviendra par ailleurs de poursuivre et renforcer les travaux en métallurgie extractive, et, notamment, en renforçant, au-delà des solutions (bio) hydrométallurgiques, les approches combinées avec les traitements thermiques (pyrométallurgiques). Une attention particulière méritera d'être accordée aux technologies adaptées au traitement des anciens déchets miniers (*tailings*) à des fins combinées de dépollution des anciens sites et d'extraction.

Pour l'extraction comme pour le traitement, la capacité de caractérisation multi-échelle de matériaux hétérogènes et complexes, partant d'approches terrain et pouvant descendre à l'échelle micrométrique, nanométrique, voire atomique, permettra d'accompagner des approches innovantes en géomécanique et en géomé-tallurgie, de l'échelle du processus à celui de l'application. Les actions de RDI s'attacheront à développer la modélisation mathématique et la simulation numérique des processus et des procédés, en intégrant le couplage procédés / ACV afin d'aider à l'optimisation des opérations unitaires et à leurs changements d'échelles (intégration de l'intelligence artificielle et du *machine learning*).

Conclusion

Afin de soutenir la stratégie française de sécurisation de ses approvisionnements en métaux critiques et stratégiques, il est essentiel de relancer un programme ambitieux de recherche, développement et innovation capable de fédérer les acteurs de la recherche,

du développement et de l'innovation (RDI) autour d'une vision commune et d'objectifs partagés. Cela implique tout d'abord de structurer et d'animer une communauté scientifique encore trop fragmentée sur ces enjeux, et ainsi de renforcer les positions de la France sur la scène européenne et internationale. Cette stratégie doit permettre de remettre à l'agenda national des thématiques aujourd'hui délaissées autour de l'exploration, l'exploitation minière et la minéralurgie, au service d'une mine plus responsable. Une intégration de ces enjeux dans les travaux en cours des agences de programmes thématiques ferait sens.

Cette programmation scientifique devra s'inscrire dans une approche intégrée du développement durable, couvrant l'ensemble du cycle de vie des métaux, de l'extraction minière jusqu'au recyclage.

Compléter la chaîne de valeur de la batterie en France avec le projet industriel d'Orano et de XTC New Energy (Neomat)

Par Philippe HATRON

Directeur du programme Batteries Orano



Aujourd'hui, il est un enjeu stratégique que la France et l'Europe se dotent d'une industrie souveraine de fabrication de matériaux actifs de cathode (CAM) et de leur recyclage, afin de réduire leur dépendance aux importations venues d'Asie concernant des matériaux hautement technologiques et absolument clés pour le bon fonctionnement des batteries.

Une synergie industrielle au service de l'économie circulaire localisée dans le Dunkerquois

Orano et XTC New Energy ont mis leurs expertises en commun, avec pour objectif le développement d'un projet industriel intégré de trois usines complémentaires en amont et en aval de la fabrication des batteries, dans une logique d'économie circulaire, ainsi qu'un laboratoire de R&D commun. Ce projet, baptisé Neomat, sera implanté sur les communes de Gravelines et Loon-Plage dans les Hauts-de-France, au cœur de la « Vallée de la batterie ». Ce site combinera des activités de production de matériaux de cathode (CAM)

et leurs précurseurs (PCAM), et le recyclage des rebuts des *gigafactories* et de batteries en fin de vie. Ces usines fonctionneront en synergie, en assurant préférentiellement la fourniture de PCAM vers l'usine de CAM, la fourniture par l'usine de recyclage de métaux stratégiques recyclés (nickel, manganèse, cobalt) vers l'usine de PCAM, et de lithium recyclé vers l'usine de CAM. Le projet dans son ensemble représente un investissement global de 1,5 milliard d'euros et la création de 1 300 emplois directs, à partir de la prochaine décennie. La construction des différentes usines a été modularisée et phasée dans le temps selon les besoins du marché.

La priorité porte sur la fourniture des CAM, composants essentiels et à haute valeur ajoutée dans la production de batteries, pour l'atteinte des objectifs de règles d'origine des véhicules prévues par l'accord de libre-échange Union européenne (UE)-Royaume-Uni. Une phase de concertations publiques préalable et continue¹ sur l'ensemble du projet industriel a été conduite entre février 2024 et juin 2025, suivie d'une enquête publique du 7 juillet au 8 août 2025, sur la première brique du projet, Neomat CAM². L'objectif est de produire des CAM dès 2028, sous réserve d'une décision d'investissement d'ici la fin d'année 2025.

S'agissant des usines de PCAM et de raffinage de la *black mass* (ou matière active), les décisions d'investissement en Europe dépendront de la capacité à déployer des modèles d'affaires compétitifs avec des réglementations renforcées pour faire face, notamment, à la concurrence asiatique.

Un procédé de recyclage innovant et sécurisé

Sur ce dernier volet, Orano poursuit ses tests sur ses deux pilotes industriels de pré-traitement et d'hydrométallurgie, installés sur le site d'Orano de Bessines-sur-Gartempe (Nouvelle-Aquitaine), assurant la récupération et le recyclage, en toute sécurité, des matériaux d'intérêt et des différents composants afin de les réutiliser pour la fabrication de matériaux de cathode. Ces pilotes doivent notamment valider le futur procédé de raffinage de la *black mass* par hydrométallurgie, qui sera déployé à l'échelle industrielle à Dunkerque. Orano, au travers de son expertise dans les procédés pour les activités minières de l'uranium et le recyclage des combustibles nucléaires, a mis au point un procédé optimisé minimisant les étapes et le coût du procédé tout en garantissant des produits de sortie de très grande pureté, compatibles avec la filière des précurseurs de matériaux actifs de cathode pour une réutilisation dans les batteries conformément à la réglementation européenne.

S'agissant du prétraitement, le procédé d'Orano présente de nombreux atouts : il est disruptif technologiquement par rapport aux technologies de broyage classique, permettant ainsi, d'une part, de sécuriser le recyclage (élimination de l'énergie résiduelle, suppression de l'électrolyte), et, d'autre part, de maximiser la récupération des matières dont un concentré en cobalt, nickel, manganèse et lithium, ainsi que le graphite dans un autre flux séparé assurant ainsi sa revalorisation en boucle fermée.

En conclusion, ce programme intégré vise à créer une nouvelle filière industrielle en France, assurer la sécurité d'approvisionnement des matières premières et métaux stratégiques, créer de la valeur par des techniques industrielles innovantes, respectueuses de l'environnement, et, plus généralement, accroître l'autonomie énergétique et la souveraineté de la France et de l'Europe dans l'industrie de l'automobile électrique, vouée à devenir, à l'aune de la prochaine décennie, la clé de voûte de la mobilité en Europe.

¹ Concertations sous l'égide de la Commission nationale du débat public (CNDP).

² Neomat CAM est le nom de la co-entreprise créée en décembre 2024 ; répartie entre XTC New Energy à 51 % et Orano 49 %. Une co-entreprise Neomat PCAM est portée par Orano à 51 % et XTC New Energy 49 %. Le projet de recyclage est porté par Orano.

Carester – Caremag : une expertise terres rares pour une souveraineté européenne

Par Frédéric CARENCOTTE

Fondateur et président de Carester et Caremag



Figure 1 : L'usine en 3D (Source : Vindry Architecture).

Carester, créé en 2019 par votre auteur, accompagne les acteurs du secteur des terres rares en les conseillant dans le développement de leurs procédés. En parallèle, l'entreprise déploie son savoir-faire industriel via Caremag, une filiale dédiée à la séparation et au recyclage des terres rares. Ensemble, Carester et Caremag forment un écosystème cohérent, du conseil à la production, avec l'ambition de renforcer la souveraineté européenne en matériaux critiques.

Implantée à Lacq (64), l'usine vise à produire d'ici 2030 plus de 1 400 tonnes d'oxydes de terres rares par an à partir d'aimants recyclés et de concentrés miniers, selon un procédé bas carbone, sans rejet d'effluent liquide, et en recyclant 80 % de ses émissions de CO₂. Ce projet stratégique, soutenu à hauteur de 216 millions

d'euros par l'État français et par des partenaires japonais (JOGMEC, Iwatani), répond aux objectifs du Critical Raw Materials Act : relocalisation des étapes critiques de transformation, circularité et réduction de la dépendance aux importations.

Caremag ambitionne de fournir l'équivalent de 15 % de la production mondiale actuelle en oxydes de terres rares lourdes telles que le terbium et le dysprosium. Cette contribution renforcera la résilience industrielle et l'autonomie stratégique de l'Europe, tout en créant plus de 90 emplois directs. Carester et Caremag incarnent une réponse concrète aux enjeux de la transition énergétique : bâtir une filière européenne compétitive, responsable et durable pour les matériaux critiques.

Présentation du projet Emili

Par Alan PARTE

Vice-président des Projets Lithium chez Imerys

Emili est un projet de production de lithium pour le marché européen des batteries pour véhicules électriques, à partir d'un gisement de classe mondiale situé sur un site minier existant en Auvergne-Rhône-Alpes (département de l'Allier), où est exploité du kaolin par Imerys, leader mondial des spécialités minérales et matériaux avancés pour l'industrie.

Le projet Emili permettrait la production annuelle de 34 000 tonnes d'hydroxyde de lithium, pendant 50 ans, soit l'équivalent de 700 000 véhicules électriques chaque année (environ la moitié des besoins de la filière automobile française actuelle).

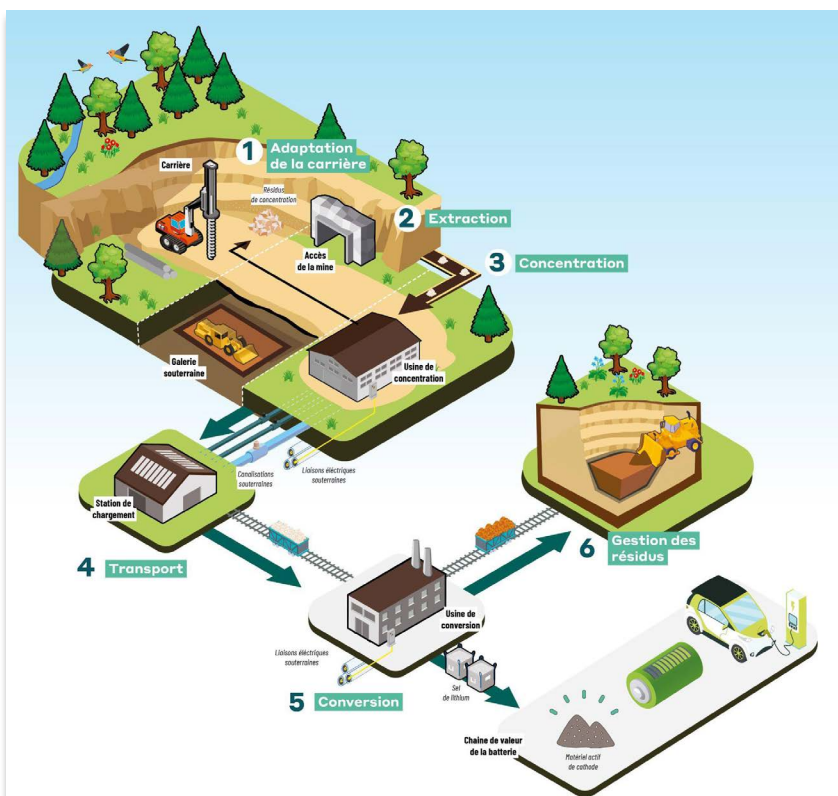
Il s'agit d'un « projet d'intérêt national majeur » au titre de la loi industrie verte et d'un projet stratégique européen au titre du Critical Raw Material Act, qui permettrait de renforcer la sécurité des approvisionnements en lithium des industries européennes, actuellement totalement dépendantes des importations, notamment de la Chine.

Il vise une production respectueuse de l'environnement et socialement responsable, qui s'appuie sur des impacts très réduits et des pratiques et technologies responsables telles qu'une exploitation souterraine,



Carotte de granite de Beauvoir (Source : Imerys).

la réutilisation des eaux usées, le recyclage des eaux de procédés, le recours au transport par rail et un engagement fort auprès des parties prenantes à l'échelle locale, régionale et nationale. À terme, le projet devrait permettre la création localement de 1 500 emplois directs et indirects, et générer d'importants bénéfices économiques tant pour les communautés locales concernées que pour la France.



Étapes d'extraction et de transformation du Lithium à partir du granite de Beauvoir (Source : Imerys).

Le Projet lithium de France : la production de chaleur et de lithium géothermal dans le fossé rhénan

Par Romain MILLOT

Directeur scientifique de Lithium de France

En plein cœur du fossé rhénan, en Alsace, le projet de Lithium de France incarne une double ambition : accélérer la transition énergétique et positionner la France comme acteur clé de la mobilité électrique, tout en valorisant les ressources naturelles locales. Ce projet pionnier repose sur l'exploitation des eaux géothermales, naturellement riches en lithium et en chaleur, pour répondre à deux enjeux majeurs : décarboner l'industrie et sécuriser l'approvisionnement en lithium, métal stratégique pour les batteries des véhicules électriques.

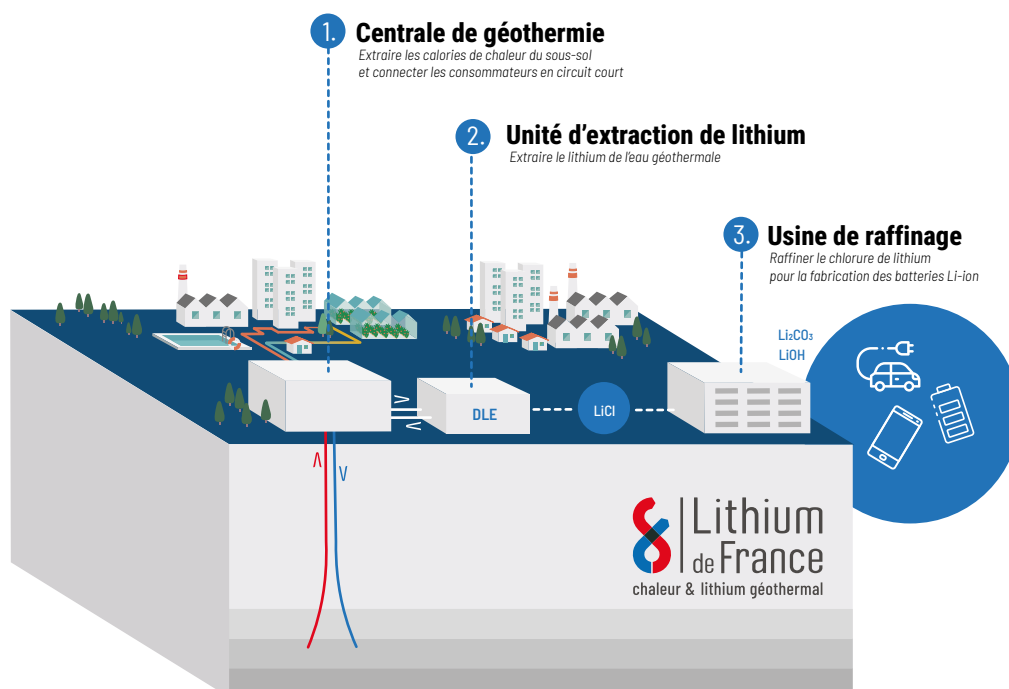
Les eaux profondes du fossé rhénan, connues pour leur forte concentration en minéraux, recèlent un potentiel exceptionnel. Grâce à des technologies innovantes et respectueuses de l'environnement, le lithium est extrait directement de ces eaux géothermales. Par rapport aux modes habituels de production (salars d'Amérique du Sud, roche dure), ce procédé limite drastiquement l'empreinte carbone, réduit l'emprise au sol et minimise la consommation d'eau, tout en garantissant une production locale et durable.

Cette approche innovante permet de :

1. Sécuriser l'approvisionnement en lithium : face à une demande mondiale croissante, ce projet permettra à la France et à l'Europe de réduire leur dépendance aux importations.
2. Produire un lithium bas carbone.
3. Créer une filière industrielle vertueuse.
4. Combiner énergie renouvelable et extraction minière, permettant de mutualiser les coûts et les risques.

Les bénéfices de l'alliance chaleur et lithium géothermal offrent à la France une opportunité de renforcer son autonomie énergétique et sa souveraineté minière, ainsi que l'attractivité des territoires.

En associant innovation et respect de l'environnement, l'Alsace devient un territoire pionnier de la filière, et renoue avec son histoire énergétique du sous-sol.



Le projet Centenario d'Eramet

Par Fabien BURDET

Directeur Procédé de la Business Unit Lithium d'Eramet



Figure 2 : Photo générale de l'usine (Source : Eramet).

Le projet Centenario d'Eramet, opéré par sa filiale Eramine en Argentine, marque une avancée stratégique majeure pour la souveraineté française en métaux critiques.

Situé dans la province de Salta, le gisement de lithium de Centenario figure parmi les plus importants au monde, avec des réserves estimées à 15 Mt LCE (lithium carbonate équivalent). En déployant pour la première fois hors de la Chine un procédé d'extraction directe du lithium (DLE), développé en France et protégé par 12 brevets, Eramet devient, avec ce projet, la première entreprise européenne à produire du lithium à l'échelle industrielle.

Le projet est entré en production fin décembre 2024, et a vu sa production croître au cours du 1^{er} semestre 2025 avec l'objectif d'atteindre, à l'issue du *ramp-up*, une production de 24 000 tonnes par an de carbonate de lithium, suffisant pour équiper 600 000 véhicules électriques.

Des phases ultérieures de développement sont envisagées pour exploiter le plein potentiel du salar.

Le procédé DLE, plus rapide¹ et respectueux de l'environnement, permet un taux de récupération de 90 % du lithium, tout en réduisant l'empreinte physique de l'usine et les délais de production.

Centenario est aujourd'hui détenu à 100 % par Eramet, depuis le rachat des parts de son partenaire Tsingshan en octobre 2024. Ce projet s'inscrit dans une démarche

responsable, structurée autour des standards de la certification IRMA, avec un fort impact local. En 2024, le projet a généré une contribution économique directe de 256 M€ en Argentine, plus de 2 500 emplois, et a permis de mener plusieurs projets sociaux dans la province de Salta, pour répondre aux besoins identifiés au sein des communautés locales.

Avec un coût de production parmi les plus compétitifs au monde, Centenario devrait jouer un rôle clé dans la sécurisation d'un approvisionnement durable en lithium pour l'industrie européenne.

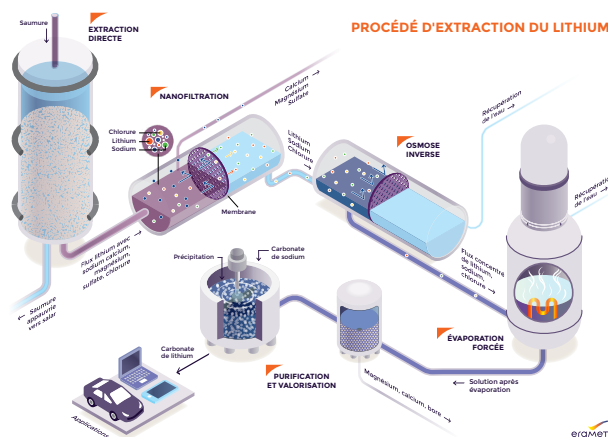


Figure 1 : Infographie simplifiée du procédé d'extraction du lithium (Source : Eramet).

¹Le procédé conventionnel basé sur l'évaporation naturelle de la saumure a, quant à lui, un rendement limité à 40-50 %, avec un temps de production de 12-18 mois.

Strategic metals as the new challenge of the energy transition and reindustrialization

What are the new strategic challenges?

Mineral resources, the foundation for the development of human societies Christophe Poinssot & Philippe Varin.

The development of human societies has been built on the discovery and progressive use of subsoil mineral resources, particularly metals, which have enabled the manufacture of increasingly complex tools, right up to the innovative, high-performance technologies on which today's societies are based. Mineral resources are thus the historical foundation for the development of our complex, technological human societies.

By preferring to relocate these activities to third countries, Europe has allowed a systemic risk to be created that raises a number of issues: issues of sovereignty, given the extent to which our industries and our economy now depend on imports from third countries; issues of acceptability, in order to be able to relocate industrial activities that have received bad press in our territories; ethical issues, in order to assume the risks and impacts of our lifestyles from now on; and scientific issues, in order to be able to invent a new mining, mineralogy and metallurgy industry that is renewed, decarbonized, with low environmental impact, and socially accepted.

Ahead of the various articles detailing the different aspects of this challenge, this introductory article aims to shed light on the importance of these issues for France, and more broadly for Europe.

The importance of mineral resources in our daily lives Bruno Jacquemin.

From the first flints to today's lithium-ion batteries, mineral resources have accompanied humanity and shaped civilizations. Iron, copper, aluminum, lithium, cobalt, rare earths: Each metal tells a story of progress, power, and rivalry. Our cities, transport systems, communications, and healthcare all rely on this invisible, yet decisive, mineral infrastructure. But apparent abundance hides tougher realities: finite deposits, strategic dependencies, environmental impacts, and the urgent need for recycling. Mineral resources are more than a technical foundation: They are a mirror of humanity, reflecting its contradictions and its choices as a society. Placing them at the core of public policies and collective strategies is not a luxury but a condition for building a sustainable future.

Energy transition: A break in the dynamics of global demand for metals?

Emmanuel Hache, Vincent D'Herbement, Louis-Marie Malbec & Candice Roche.

The energy transition has been driving strong demand for critical metals, which are essential for electric vehicles, renewable energy, and hydrogen technologies. An electric vehicle contains six times more critical metals than a conventional model, and low-carbon electricity generation requires more metals per megawatt than fossil-based sources. This high metal intensity raises concerns about increasing pressure on resources. However, for several metals (such as copper, nickel, and cobalt), projected demand growth rates remain in line with historical trends.

Tensions may instead stem from the simultaneous surge in demand across all metals, the international mining context, price volatility, and technological or geopolitical uncertainties. Although recycling and sufficiency policies could help ease the pressure, geopolitical and environmental challenges — including resource governance, social acceptance, and sustainability — will remain central. The transition to a low-carbon economy therefore requires balancing technological acceleration, supply security, and adherence to planetary boundaries.

Metal requirements for the digital sector Erwann Fangeat & Olga Kergaravat.

The characteristics of metals make them indispensable in all industrial sectors and in everyday capital goods: energy, ICT (Information and Communication Technologies), transport, construction.

In the digital sector, metals play an important role in the manufacture of various components and technologies. They are classified into major "families" according to their specific uses. The main families identified include structural metals, magnet metals, battery metals, semiconductor metals, conductive metals, and display metals.

Environmental and social impacts are significant, particularly during the mining and refining phases.

The global mapping of the extraction of metals used in digital equipment shows the strong dependence on certain countries, in particular China, which is the world's leading producer of a large proportion of the metals used in the digital industry.

Tin, silver, ruthenium, nickel, and antimony are considered particularly critical (ADEME, Étude métaux

et Numérique, 2024), given the convergence of social, environmental, and geopolitical risks.

Recycling metals from waste electrical and electronic equipment (WEEE) is essential, but is still very limited, notably due to the dispersal of materials, their small absolute quantities per appliance, and the widespread use of alloys, and has been targeting only the most expensive metals (e.g., gold, silver, copper, platinum).

Value chain needs and supply issues

Needs of the aeronautics industry

Anthony Bourdon.

The geopolitical constraints of recent years have reminded us of our external dependence on the supply of minerals and raw materials. Seen by some as risks, they actually offer real opportunities to develop new value chains, to encourage the circular economy in order to give France and Europe a new industrial direction, while keeping competitiveness and productivity – the spearheads of a sustainable, innovative industry – in our sights.

Aeronautics has always been a high-tech sector. The use of the best materials, *i.e.* with the best mechanical, thermal, and corrosion properties, has always been a *sine qua non* for an industry with the highest levels of performance.

The energy transition, or decarbonization, is a major vector of change for the aerospace industry, calling for a new generation of more frugal aircraft.

The complexity of this industry, in which Europe is always at the forefront, calls for humility, as the field of study can be so vast; it was decided to limit this latest study to current materials and those perceived as being able to contribute to the materials of tomorrow.

We hope you enjoy reading these few lines, but seems important to remember that we're at a pivotal point of "vassalization" or, on the contrary, to see this as an opportune day to reinvent a sovereign and resilient French and European industry; to put to work and put forward the quality of our French engineers, research centers, and scientific-industrial ecosystems.

Critical materials demand in the automotive industry

Rémi Cornubert.

The ongoing electrification in the automotive industry is leading to a sharp increase in demand for critical metals, such as lithium, cobalt, nickel, copper, aluminum, and rare earths. This demand is expected to increase two- to fivefold by 2035, depending on the metals considered. Electric vehicles require more of these materials than combustion engine vehicles, due to their electrified powertrains, batteries, and the need for lightweighting.

This transition highlights Europe's heavy dependence on China, which controls a large part of the production and refining of these critical materials. To secure its supplies and reduce this dependence, Europe must accelerate its strategic initiatives: enter into long-term agreements with friendly countries or non-Chinese mining players, invest in European mining & refining

capacity projects, and finally invest heavily in recycling to conserve the initially captured feedstock.

Introduction to the concept of mineral value chains and commodity markets

Philippe Chalmin & Yves Jégourel.

The definition of a raw material is a complex one, in which the economic criteria of product homogeneity, price variability, and marketing on vast export markets prevail. Similarly, a raw material chain assumes three main functions, which are often underestimated: Adapting the product as it appears upstream of the chain to the industrial needs expressed downstream, adding value to the product thus transformed at the various stages of the value chain, and spreading and diluting the risks, and in particular the price risk, involved in transferring this product. This last function explains why the markets for many metals are financialized, *i.e.*, why stock exchanges play a central role in setting prices and managing price risk.

The copper value chain for a highly strategic metal

Mathieu Leguérinel & Johann Tuduri.

Copper is one of the world economy's most strategic raw materials, crucial to key sectors, such as electronics, automotive, construction, and, above all, energy. Demand is particularly strong in the field of renewable energies (solar panels, wind turbines), in the development of smart power grids and in the manufacture of electric vehicles, which require up to three times as much copper as combustion engine models. This fundamental role makes copper a critical resource in the global energy and numerical transitions. The copper market is strongly conditioned by economic, geopolitical, and technological dynamics. Global production is concentrated among a few major players, mainly Chile – which accounts for around a quarter of production, and holds just under a third of the world's reserves – Peru, China, and the United States.

Value chain for electric mobility metals

Louis-Marie Malbec & Alice Marie.

Europe has been developing its own industry for lithium-ion batteries and permanent magnets, structured around the critical materials they contain: lithium, nickel, cobalt, manganese, graphite, and rare earths. Currently this value chain is dominated by China, with more than 70% of global capacities at each step: refining, component manufacturing, assembly, and recycling. The European announcements show a delay at the intermediate stages between mining and assembly, raising three challenges: global stress on production capacities, access to technical skills, and need for economic competitiveness. Recycling is key to building up sovereign secondary resources, and has brought up questions regarding the securing of material flows, the uncertainty on battery chemistries, and the competitiveness with primary material. Regulations and innovative players continue to establish themselves on the European stage, which doesn't lack assets to address the challenges of the materials for electric vehicles value chain.

The current state of the European Union's dependency and its policies

Peter Handley.

“Europe’s strategic autonomy is about reducing dependence on others for things we need the most: critical materials and technologies, food, infrastructure, security, and other strategic areas”^a.

^a EUROPEAN COMMISSION (2020), *A New Industrial Strategy for Europe*.

China's key role in critical mineral value chains

John Seaman.

China today holds a dominant position in critical mineral value chains, from extraction to processing and downstream technologies. Built on decades of industrial policy, this supremacy gives Beijing significant leverage over global supply security, particularly for the European Union. China has leveraged upstream strengths to enhance downstream competitiveness, yet remains vulnerable due to its heavy reliance on imports of several minerals it considers as strategic. Since 2023, Beijing has introduced export controls on raw materials and technologies, exploiting chokepoints to advance broader geopolitical aims. These measures have heightened European efforts to diversify supply, though success has been hindered by China’s capacity to influence availability, prices, and overseas investments.

The role of the race for strategic metals in current conflicts

Marc-Antoine Eyl-Mazzega.

Critical metals are the object of such rivalries that we must be prepared for power struggles for their control to turn into armed conflict, potentially destabilizing regions and even States. The cases of the Democratic Republic of Congo and Burma are symptomatic of these developments. In the long term, the risks also weigh on the broader value chains linked to metals, and in particular the logistics segment, which is essential, and represents a major point of vulnerability potentially exploitable by organized crime, armed organizations, and/or States.

Mineral intelligence for a better understanding of value chains

Stéphane Bourg.

In the global race for critical metals, essential for energy, digital technology, aeronautics, and defense, value chains appear to be a fragile link in our sovereignty. Fragmented, globalized, and interconnected, they expose Europe to multiple dependencies, whether in terms of mining resources, processing technologies, or opaque markets. Faced with these vulnerabilities, national and European observatories have been emerging as true watchdogs. Their role: to analyze risks, identify weak links, and propose levers for action. In France, OFREMI embodies this new model of public-private cooperation, where industry and public authorities combine data,

expertise, and innovative methods to anticipate shocks. In a tense geopolitical context, this collective intelligence is becoming an essential tool for resilience.

The current state of strategic metals recycling and of French industrial projects

Olga Kergaravat.

With the energy transition, France will need to mobilize more metals, some of them critical and strategic, for wind turbines, photovoltaic panels, or batteries for electric vehicles.

To meet this rising demand, optimizing recycling in France and Europe is an essential lever for contributing to metal resource sovereignty. The development of recycling concerns all processing stages, including collection and sorting, with, in particular, the increasing automation of sorting operations, such as alloy-by-alloy sorting.

Recycling of strategic metals from end-of-life products is still underdeveloped at European level, due to a number of factors, including the heterogeneity and constant evolution of the deposit, the complexity of the products, the mixture of alloys, and the lack of knowledge of their composition.

The dynamic development of recycling supported by manufacturers and illustrated in this article is encouraging, but in view of the challenges and constraints to be overcome, government support for virtuous recycling and the incorporation of recycled raw materials (RWM) is essential to reduce dependence on primary metals, and boost the competitiveness of national industry in the face of global competition.

Last but not least, the undertaking would not be complete without action to diversify supplies from primary and secondary sources, to work on extending the lifespan of products containing metals, on eco-design of products, but also to activate sobriety levers by continually questioning essential needs to reduce material consumption.

Innovation in urban mine recycling

Stéphane Pellet-Rostaing, Yannick Ménard, Dr Jean-Christophe P. Gabriel & Solène Touzé.

Urban mining offers a sustainable alternative to traditional mining, giving access to resources without mining rights or major environmental risks. While recycling of base metals like copper, zinc, and aluminum is efficient, critical metals remain difficult to recover due to waste heterogeneity and unknown composition due to lack of adapted sampling methods. Accurate waste characterization is essential, yet sampling errors and inadequate standards hinder progress. Research has been driving innovative pre-treatment (AI-based dismantling, selective sorting) and advanced recovery processes (hydro-, pyro-, solvo-, iono-, electro-, and bio-metallurgy), aiming to improve yields, reduce waste, and enable modular, eco-efficient recycling. No single method suffices; robust recycling requires tailored, combined approaches integrating mature and emerging technologies.

Recycling: An essential contribution, but certainly limited to secured supplies

Yannick Ménard & Stéphane Bourg.

After nearly five decades of patient and gradual construction, the Turkish and South Strategic metals (lithium, cobalt, nickel, gallium, germanium, rare earth elements) are essential to both the energy and digital transitions. They are used in the production of batteries, magnets, semiconductors, and optical fibers, but their extraction raises significant geopolitical, environmental, and social challenges. Recycling is often presented as a solution to reduce pressure on primary resources, limit impacts, and strengthen strategic autonomy (UNEP, 2011). However, the availability of recycled metals remains low due to technical, economic, and structural constraints. In this article, we analyze the barriers hindering the development of a viable recycling sector, and propose pathways toward more sustainable and sovereign management of critical resources (IEA, 2024).

Mining and urban mining

A new inventory of mineral resources to strengthen France's sovereignty

Dr. Blandine Gourcerol & Karim Ben Slimane.

In the face of rising international tensions over raw materials and increasing demands linked to the energy and digital transitions, securing the supply of mineral resources has become a national priority. Half a century after the first inventory of the French subsoil, France, driven by the State and supported by the BRGM, is launching an ambitious program to update national geological knowledge. The aim is to identify, map, and characterize areas favorable to the presence of mineral substances, using the most innovative acquisition and analysis methods available.

Mining permit applications: From exploration to production

Jean-François Gaillaud.

In view of the supply issues at stake, the question of how to make the most of the country's mining resources is at the heart of the government's concerns, as it seeks to optimize the exploitation of strategic mineral resources, while safeguarding the country's long-term interests.

The Mining Code enables the State to manage mineral deposits, which belong to the nation. The State may grant a company exclusive rights to explore for or extract a requested substance, following a selection process based on technical, financial, and environmental criteria.

The Mining Code was modernized following the Climate and Resilience Act of August 22, 2021 and the ordinances of April 13 and November 10, 2022, supplemented by the decree of August 27, 2025^a, to take better account of the necessary protection of environmental interests, and to strengthen public participation and consultation of local authorities in decisions con-

cerning mining activities. The stability and predictability of this new regulatory framework will be key factors in attracting the capital needed to develop large-scale mining projects.

^a <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000052142340> ; https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000052195450

The scientific and technical challenges of responsible sourcing of mineral resources

Gaël Bellenfant.

Responsible sourcing of critical and strategic metals must reconcile technical, environmental, and social constraints throughout the mine lifecycle, from exploration to post-closure. Declining ore grades, growing waste volumes, and increasing pressure on water and energy have highlighted the need for innovation and rigorous impact management. Beyond the extraction site, responsibility extends to global supply chains to ensure sustainability, fairness, and social acceptability.

The challenges of responsible mining standardization

Christophe Didier, Mercè Ferrés Hernandez & David Krupka.

The redeployment of an extractive industry on the national territory requires taking into account the growing sensitivity of populations to environmental, social, and governance issues. It is therefore essential to define and promote a framework for the deployment of a "responsible mine", enabling the development of an efficient and sovereign economic activity, while preserving the environment and promoting social and economic equity. This article illustrates the advantages and challenges of standardization in meeting this challenge. After a brief presentation of the principles of standardization, the essence of which is to promote best practices in terms of techniques and organization, the main challenges of current and future work are presented, along with the framework best suited to their implementation.

The social acceptability of public interest projects: scale and focus

Corinne Gendron, Alice Friser & Stéphanie Yates.

The strategic metals mining sector invokes its contribution to the national energy transition to build social acceptability. However, this rhetoric is not very effective insofar as the relevance of a project is first and foremost assessed at the local level. The interest of a project is debated on the basis of a series of factors combining interests and values, which go beyond the proclaimed contribution to the higher interests of the nation, even if it is recognized by an institutional statute. This is why participatory processes are essential to building the social acceptability of energy transition mining projects, as they help consolidate their relevance in the eyes of local populations.

Public policies

French policy on strategic minerals and metals

Benjamin Gallezot.

Strengthening security of supply is one of the cornerstones of industrial sovereignty. This challenge is all the greater in that several decades of internationalization and cost-based optimization of value chains have greatly increased manufacturers' dependence on supplies from outside Europe. The case of strategic ores and metals is an archetypal example of this, as the articles in this issue of *Annales des Mines* abundantly analyze.

Financing tools mobilized to support the critical metals industry

Massimiliano Picciani.

The dependence of new technologies for energy transition to critical metal supplies is now identified as a major problem, not only geopolitical but also economic.

The need to avoid certain sources of supply for raw or refined minerals, particularly from China or from sectors controlled by Chinese players, has been leading French and European manufacturers to deal with a difficult economic equation: expenses to develop new processes, securing the value chain and the profitability of each production stage, and validating significant and risky investment choices.

In this context, and to de-risk industrial initiatives necessary for economic sovereignty, but presenting uncertain profitability, France has undertaken a significant effort to support companies in the sector, through State aid with non-dilutive financing, a tax credit, and a dedicated investment fund.

Energy security at the heart of critical minerals and metals diplomacy

Maël Le Bail.

Critical minerals and metals represent a major geopolitical issue. Market distortions, coupled with strategies of predatory exploitation and the "weaponization" of mineral resources, have been complicating the landscape.

France's critical metals diplomacy is an essential lever for economic and industrial sovereignty. By leveraging a European strategy, mobilizing its diplomatic networks, and forging balanced partnerships, France has been positioning itself against powers already deeply engaged in the battle for resources.

France must help ensure a multilateral approach, countering the emerging temptations of brutal and transactional protectionism. It has been recognized as a reliable and willing partner on the international stage, but this strategy can only succeed if it is sustainable, equitable, and aligned with commitments to the ecological transition. The challenges of recycling, innovation, and the circular economy will be crucial in reducing extractive pressure on primary resources.

The challenge of renewing skills

Judith Sausse.

Future mining engineers will need to master the entire value chain of mineral resources, from exploration to recycling, including extraction, processing, and valorization. ENSG (for in French the National Graduate School of Geology), among others and historically, offers initial and continuing training built on a shared scientific foundation, enriched with technical, digital, economic, societal, and ethical specializations. The competence-based approach relies on practice, notably through field schools, to develop both technical skills and interpersonal capacities. Meeting the expectations of young graduates, seeking careers with strong societal impact that emphasize CSR (for Corporate Social Responsibility) and innovation, is a major challenge in the face of demographic decline and the risk of decreasing interest in scientific fields. This requires drawing on new talent pools, developing innovative pathways, and fostering international mobility. Finally, effective and accessible communication remains essential to raise awareness and recognition of these professions.

Why strengthen French R&D to meet the challenges of metal supply?

Damien Goetz & Patrick D'Hugues.

To support France's strategy of securing its supplies of critical and strategic metals, ambitious and coordinated research, development, and innovation (RDI) initiatives are essential. In this article, we offer an overview of current initiatives, while highlighting major shortcomings, particularly in the fields of exploration and mining and mineral processing. A number of non-exhaustive courses of action are suggested to strengthen these areas in the service of a more responsible mining industry. They will complement efforts already underway, and contribute to a global approach covering the entire lifecycle of metals, from mining to recycling. Beyond the technological dimension, it is essential to integrate the economic, environmental, social, and governance dimensions to guarantee responsible supplies.

Key projects

Completing the battery value chain in France with the industrial project of Orano and XTC New Energy (Neomat)

Philippe Hatron.

Today, it is a strategic challenge for France and Europe to build a sovereign industry for the manufacture and recycling of cathode-active materials (CAM), in order to reduce their dependence on imports from Asia of highly technological materials that are absolutely key to the proper functioning of batteries.

Carester - Caremag: Rare earth expertise for European sovereignty

Frédéric Carencotte.

Carester, founded in 2019 by this author, supports players in the rare earth sector by advising them on process development. At the same time, the company deploys its industrial know-how via Caremag, a subsidiary dedicated to the separation and recycling of rare earths. Together, Carester and Caremag form a coherent ecosystem, from consulting to production, with the ambition of strengthening European sovereignty in critical materials.

Introducing the Emili project

Alan Parte.

Emili is a project to produce lithium for the European electric vehicle battery market, from a world-class source located on an existing mining site in Auvergne-Rhône-Alpes (Allier department), where kaolin is mined by Imerys, world leader in specialty minerals and advanced materials for industry.

The Lithium de France project: Geothermal heat and lithium production in the Rhine valley

Romain Millot.

At the heart of the Rhine valley in Alsace, the Lithium de France project embodies a dual ambition: to accelerate the energy transition, and position France as a key player in electric mobility, while at the same time making the most of local natural resources. This pioneering project is based on the exploitation of geothermal waters, naturally rich in lithium and heat, to meet two major challenges: decarbonizing industry, and securing supplies of lithium – a strategic metal for electric vehicle batteries.

Eramet's Centenario project

Fabien Burdet.

Eramet's Centenario project, operated by its subsidiary Eramine in Argentina, marks a major strategic step forward for French sovereignty in critical metals.

Located in the province of Salta, the Centenario lithium source is one of the world's largest, with reserves estimated at 15 Mt LCE (lithium carbonate equivalent). By deploying for the first time outside China a direct lithium extraction (DLE) process developed in France and protected by 12 patents, Eramet becomes with this project the first European company to produce lithium on an industrial scale.

**Issue editor:
Christophe POINSSOT**

Ont contribué à ce numéro



Gaël BELLENFANT

est ingénieur en géologie avec une spécialité en géotechnique et environnement ainsi qu'une thèse dans le domaine du stockage des déchets (couverture, bilan hydrique). Après avoir travaillé en bureau d'études dans le domaine des sites en sols pollués et du stockage des déchets, il a rejoint le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) en 2006 comme ingénieur de

recherche stockage à la fois sur les projets de recherche, des projets d'appui aux politiques publiques (ministère chargé de l'Environnement) et des projets internationaux.

En 2011, il a rejoint le département pour la prévention et la sécurité minière du BRGM, avec un rôle transverse d'appui aux équipes en charge de la gestion opérationnelle de l'après-mine (surveillance et travaux des sites sous la responsabilité de l'État français).

De 2014 à 2024, il a coordonné les projets de recherche, publics et internationaux, sur tout le domaine de l'après-mine au BRGM, tout en conservant un rôle de chef de projet (projets européens). Ces projets touchent à tout le domaine de l'après-mine (études environnementales, géotechnique, hydrogéologie, géochimie, gestion des données, etc.).

Depuis 2025, il a rejoint la direction des ressources minérales du BRGM pour coordonner le sujet de la mine responsable.

Il est expert pour l'ISO depuis 2020 sur l'après-mine et la chaîne d'approvisionnement responsable.

Karim BEN SLIMANE

est ingénieur civil des mines (ENSMSE 85), il a plus de trente-neuf ans d'expérience en études et expertise dans l'utilisation et l'exploitation du sous-sol, tant pour l'analyse des risques associés que pour la qualification de la ressource ou de la performance, pour les domaines du stockage souterrain du CO₂ ou des déchets radioactifs, de la géothermie et des ressources minérales. Depuis 2024, il est directeur du projet d'inventaire national des ressources minérales, et préfigurateur de la filiale BRGM Explore.



Anthony BOURDON

est ingénieur ECAM Lyon. Il a débuté sa carrière chez des équipementiers du secteur industriel automobile. Pendant plus de douze ans, il a œuvré à différents postes de direction dans le management de programme, le pilotage des opérations aux niveaux français et européen, en gardant en permanence le sens de l'efficacité et de l'excellence opérationnelle. Il a ensuite rejoint la belle

ETI familiale française, Lisi Group, plus particulièrement sa filiale Aerospace dans laquelle il a passé neuf ans. Pendant ces années-là, il a occupé différents postes de directeur

industriel et directeur d'une *business unit*, où il a pu mettre à profit ses connaissances pointues du monde automobile au bénéfice de l'automobile. Il a, notamment, participé à la construction du système interne d'amélioration continue de Lisi Group.

Depuis 2019, Anthony Bourdon a rejoint le Gifas en tant que directeur des Affaires industrielles. Dans ses nombreuses activités – industrielle, digital, qualité, navigabilité – liées au monde industriel, on peut noter qu'il est à l'origine, en 2020, de la démarche Aero Excellence, portée au sein de la filière Aéronautique, Défense et Spatial.



Stéphane BOURG

a rejoint le BRGM en 2022 pour prendre la direction de l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI), après vingt-trois ans au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA).

Impliqué depuis plus de dix ans sur la problématique des matières premières critiques et de leurs chaînes

d'approvisionnement, notamment dans le cadre de la transition énergétique, il a animé de 2016 à 2023 le réseau européen d'experts sur les matières premières critiques (SCRREEN), qui accompagne la Commission européenne dans l'évaluation de leur criticité.

Chimiste de formation, il s'est lancé dans la gestion de projets en 2008, principalement en charge de projets de recherche européens ou internationaux liés au Forum GEN IV (réacteur à sels fondus). Il est auteur ou co-auteur de plus de trente publications scientifiques, intervient régulièrement dans les conférences européennes ou internationales, et continue d'intervenir dans les formations scientifiques au niveau master.

L'OFREMI accompagne le gouvernement français dans les industries françaises stratégiques des secteurs de l'énergie, du numérique, de l'aéronautique et de la défense, en assurant à la fois une veille sur les matériaux stratégiques (évaluation de leur criticité) et une analyse des risques par le biais de stress tests.



Fabien BURDET

est directeur Procédé de la *business unit* Lithium d'Eramet. Ingénieur chimiste et docteur en chimie de coordination, il consacre sa carrière depuis 2005 à développer des procédés hydro-métallurgiques pour la séparation et la récupération de métaux stratégiques comme le lithium, les terres rares, le nickel ou l'uranium.

Il a travaillé six ans comme ingénieur de recherche au Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), avec comme spécialité l'extraction par solvants des actinides et produits de fission pour les cycles du combustible nucléaire du futur.

Il a rejoint Eramet en 2012 pour contribuer au développement du projet lithium. Il y a occupé différents postes jusqu'à celui de directeur Procédé de la BU Lithium. À ce titre, il a piloté les travaux de R&D et d'industrialisation ayant conduit à la mise au point du procédé d'extraction directe du lithium (DLE), une technologie innovante protégée par 12 brevets dont il est co-auteur.



© Alban Lafitte

Frédéric CARENCOTTE

ingénieur chimiste diplômé de l'Institut de Chimie et Physique Industrielles de Lyon, a consacré plus de vingt ans de sa carrière au sein du groupe Rhône-Poulenc / Solvay, d'abord comme expert en génie chimique, puis dans les terres rares, en France et en Chine. Il y a exercé des fonctions clés, notamment celles de directeur d'usine à La Rochelle, et directeur des opérations de l'entité Terres Rares.

Il termine son parcours chez Solvay en tant que directeur général de l'activité surfactants.

En 2019, animé par la volonté de pérenniser le savoir-faire français dans le raffinage des terres rares, il fonde Carester avec cinq experts mondialement reconnus dans le domaine, autour de trois piliers : conseil indépendant ; transmission des compétences ; et construction d'une usine en France pour recycler et séparer les terres rares. Ce dernier objectif, le plus ambitieux, allait donner naissance à Caremag. Ensemble, les deux entités forment un écosystème intégré, allant de l'expertise scientifique à la production responsable, pour soutenir la transition énergétique.

Sa conviction profonde – « l'expertise est la source du progrès » – guide l'ensemble de son action depuis le premier jour. En créant Carester, puis Caremag, Frédéric Carencotte souhaite démontrer qu'il est possible de construire en France une industrie responsable, fondée sur la compétence, la transmission et la performance environnementale.

Entouré d'une équipe soudée et engagée, dont une vaste majorité est aujourd'hui actionnaire de Caremag, il œuvre à faire émerger une nouvelle filière industrielle, au service de la transition énergétique et de la relocalisation des savoir-faire.



D.R.

Philippe CHALMIN

est Professeur émérite d'histoire économique à l'Université Paris-Dauphine, et a été directeur du Master 212 « Affaires internationales ».

Il est fondateur et président depuis 1985 de CyclOpe, la principale structure de recherche et d'études en France sur les marchés internationaux ; chroniqueur économique dans la presse écrite (*Les Échos*, etc.) en radio et télévision ; résident de l'Observatoire de la formation des prix et des marges alimentaires auprès du ministre de l'Agriculture et du ministre de l'Économie et des Finances de 2010 à 2023.

Par ailleurs, il est auteur ou directeur d'une cinquantaine de livres et de très nombreux articles scientifiques ; consultant auprès de la Banque mondiale et de l'Union européenne ; et conférencier.

Il a été de 1998 à 2000 président de la Société d'Économie Politique, dont il est aujourd'hui président d'honneur. Il est membre de l'Académie des sciences d'outremer et de l'Académie d'agriculture.

Philippe CHALMIN est diplômé de HEC (1974), agrégé d'histoire (1977), Docteur ès lettres et sciences humaines – doctorat d'État d'histoire (1981).

Il suit tout particulièrement depuis la fin des années 1970 les évolutions des marchés mondiaux de matières premières et de commodités, avec une attention particulière pour les problématiques agricoles.



D.R.

Rémi CORNUBERT

est le fondateur de Strat Anticipation, un cabinet de conseil en stratégie et innovation créé il y a quatre ans et focalisé sur la mobilité durable, la transition énergétique, l'économie circulaire et les matériaux associés.

Il est également *senior advisor* du fonds Métaux critiques opéré par Infravia Capital Partners, qui a été créé à la suite du rapport de Philippe Varin.

Il a plus de trente ans d'expérience dans le conseil en stratégie et en opérations dans des grands cabinets américains, principalement chez Oliver Wyman.

Son expertise de l'industrie automobile sur toute la chaîne de valeur s'est développée grâce aux nombreux projets qu'il a menés pour tout type d'acteurs.

Il a aussi une très bonne connaissance des différentes motorisations, en particulier électrifiées ou à base de nouveaux carburants.

Il a également mené des projets dans les secteurs des polymères, des composites, de l'acier, de l'aluminium, pour des acteurs des batteries, de l'automobile, de l'aéronautique, du ferroviaire et de l'électronique.

Il a ainsi travaillé pour des constructeurs, des équipementiers et des producteurs de plein d'autres matériaux différents.

Son expertise sectorielle couvre l'automobile, les camions et les bus, la chimie, l'aéronautique, le ferroviaire, le maritime, l'énergie et la mobilité légère.

Rémi Cornubert a commencé sa carrière dans la recherche chez Bertin & Cie pendant huit ans où il a développé un logiciel de simulation pour optimiser la combustion dans les moteurs thermiques.

Il est un ancien élève de l'École normale supérieure et titulaire d'un doctorat en physique et d'un MBA de l'INSEAD.



D.R.

Vincent D'HERBEMONT

est économiste-prospectiviste à IFP Énergies nouvelles. Il est diplômé de l'École des Mines de Paris, avec une spécialisation dans le domaine de l'énergie. Il travaille sur les questions de prospective énergie-matière et sur leur intégration dans des modèles technico-économiques. Il est également expert à l'Observatoire des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI).



Patrick D'HUGUES

est microbiologiste de formation. Il obtient son diplôme d'ingénieur en Microbiologie industrielle et appliquée à l'Université de Provence en 1992. À partir de 1993, il réalise une thèse sur la biolixiviation appliquée au traitement des minerais, puis part en post-doctorat en Angleterre, à l'Université de Warwick (1997). Jusqu'en 1999, il travaille comme ingénieur R&D au sein de LaSource

SAS, sur le développement de procédés appliqués à la mine et à l'environnement.

Il rejoint le BRGM en 1999, et mène des activités de R&D en biotechnologie, biogéochimie et écologie microbienne. En 2000, il participe au démarrage de l'installation industrielle de Kasese (Ouganda), destinée à la production de cobalt par biohydrométallurgie. À partir de 2004, il intervient dans de nombreux projets de R&D européens (BioMinE, ProMine), et coordonne le projet de recherche du 6^e PCRD, Bioshale.

De 2010 à 2018, Patrick d'Hugues assure la responsabilité de l'unité de R&D « Déchets et Matières premières » du BRGM, dont l'activité principale est le développement et l'analyse environnementale d'écotechnologies dans le domaine des ressources minérales (primaires et secondaires) et des déchets (recyclage).

En 2019, il devient directeur du programme scientifique du BRGM dédié aux ressources minérales et à l'économie circulaire. À ce titre, il a contribué à la création de l'OFREMI, l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles. Depuis janvier 2025, il est directeur des Ressources minérales au BRGM. Il est également membre de différents comités scientifiques (direction des énergies du CEA, Ademe) et président du comité exécutif de l'association européenne Prometia (*Mineral Processing and Extractive Metallurgy for Mining and Recycling*).



Christophe DIDIER

ingénieur diplômé de l'École des Mines de Paris, dispose d'une trentaine d'années d'expérience dans le domaine de la gestion des ressources et des risques liés au sol et au sous-sol. Expert en mécanique des roches, il porte son domaine d'intervention principalement sur une approche intégrée et transdisciplinaire de thématiques comme la sécurité minière, la prévention des risques

liés à l'après-mine ainsi que l'énergie en sous-sol (géothermies, hydrocarbures non conventionnels).

Aujourd'hui directeur scientifique adjoint du BRGM, il s'est également largement investi depuis plus d'une dizaine d'années dans les enjeux de normalisation internationale sur le sujet de la mine responsable. Il préside ainsi, depuis 2017, l'ISO/TC 82/SC 7, qui regroupe les initiatives en lien avec la mine et l'après-mine responsables. Depuis 2024, il préside également le Critical Minerals Coordination Committee de l'ISO, qui vise à coordonner l'ensemble des initiatives de normalisation internationale en lien avec la gestion des métaux critiques.

Auteur d'une dizaine de guides méthodologiques nationaux et internationaux et d'une trentaine d'articles, il a piloté plusieurs expertises collectives pour le compte des pouvoirs publics ou de société savantes (Société Internationale de Mécanique des Roches, notamment).



Marc-Antoine EYL-MAZZEGA

est nommé directeur du Centre énergie et climat de l'Institut français des Relations internationales (Ifri) à partir du 1^{er} septembre 2017. Auparavant, il a travaillé six ans à l'Agence internationale de l'énergie (AIE), où il a notamment été en charge de la recherche sur la Russie et l'Afrique subsaharienne, s'occupant plus particulièrement des analyses concernant le gaz et

le pétrole dans ces zones, ainsi que des relations institutionnelles. Il a également travaillé à la Fondation Robert Schuman, où il a animé un observatoire sur l'Ukraine. Ayant la double nationalité française et allemande, il est docteur de l'Institut d'études politiques de Paris.



Erwann FANGEAT

est coordinateur technique au sein du service Sobriété numérique dans la direction Économie circulaire à l'Ademe depuis 1998. Référent sur la filière des déchets électriques et électroniques pendant dix ans, il a ensuite piloté de nombreuses études, notamment, sur les questions d'allongement de la durée d'usage des produits, de réparation, d'obsolescence programmée ou de

reconditionnement ainsi que des évaluations environnementales ACV d'équipements et de services. Il a co-piloté avec le CGDD la création et la mise en œuvre des indices de réparabilité et de durabilité en France.

Il travaille depuis cinq ans dans le secteur du numérique, notamment en pilotant des études d'évaluation multicritères de l'impact environnemental (impact environnemental du numérique en France, de l'audiovisuel...). Il a également piloté une étude sur les besoins en métaux dans le secteur du numérique en France, sortie en novembre 2024. Il pilote des travaux en cours visant à évaluer les impacts nets de solutions numériques permettant de décarboner d'autres secteurs économiques *via* des analyses ACV conséquentielles, et participe au programme Alt impact géré par l'Ademe avec l'INRIA et le CNRS sur la sobriété numérique.

Mercè FERRÉS HERNÁNDEZ

est titulaire d'un doctorat en Sciences de la Terre obtenu à l'Université de Genève. Elle a rejoint l'Organisation internationale de Normalisation (ISO) en 2002, où elle occupe le poste de responsable de programmes techniques. À ce titre, elle accompagne plusieurs comités ISO dans le développement de normes internationales, en particulier dans les domaines de la métrologie, du transport et des activités minières.

Depuis 2021, elle assure également le secrétariat du groupe de coordination ISO sur les « Métaux critiques », contribuant ainsi à structurer les efforts internationaux autour de ces ressources stratégiques.



Alice FRISER

est professeure agrégée au département des sciences administratives de l'Université du Québec en Outaouais. Titulaire d'un Ph.D. en administration des affaires et d'une maîtrise en sciences de l'environnement, elle s'intéresse à la responsabilité sociale des organisations, à la question de l'acceptabilité sociale et aux trajectoires des controverses socio-techniques. Lauréate du prix de la meilleure thèse de l'Association internationale de management stratégique 2020, elle collabore aujourd'hui avec le Centre de recherche en droit public (Université de Montréal), le groupe de chercheurs en responsabilité sociale et développement durable (UQAM) et le Réseau Inondations InterSectoriel du Québec.

Elle dirige la collection « Apprendre de la controverse » aux Presses de l'Université du Québec, et s'investit à titre de rédactrice associée dans plusieurs revues à comité de lecture dont la *Revue Internationale de cas en gestion*, la *Revue de l'Organisation Responsable* et la *Revue nationale de psychosociologie et de comportements organisationnels*.



Dr. Jean-Christophe P. GABRIEL

est directeur de recherche et *senior fellow* du CEA dans le domaine de l'économie circulaire des matières. Il est également actuellement Professeur invité à l'Université NTU, où il occupe le poste de codirecteur de l'alliance NTU Singapore CEA Alliance for Research in Circular Economy (SCARCE). Que ce soit à Sacaly ou à Singapour, son équipe travaille actuellement sur

le développement de procédés pour la récupération des métaux critiques et matériaux perdus de la mine urbaine. Il a rejoint le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) en 2007. D'abord responsable du programme « Beyond CMOS » de l'institut CEA/LETI, il a ensuite été directeur adjoint du programme Nanosciences du CEA. En parallèle, de 2013 à 2018, il a été co-coordonateur du projet ERC advanced REE-CYCLE, sur le développement de nouveaux procédés d'extraction / recyclage des terres rares.

Ancien élève de l'École normale supérieure à Paris, il a obtenu son doctorat à l'Université d'Orsay et son habilitation à diriger des recherches à l'Université Joseph Fourier de Grenoble. Sa carrière est à la fois universitaire et industrielle. Il a en effet débuté sa carrière au CNRS à l'Institut Jean Rouxel de Nantes, puis a passé six ans dans la start-up californienne Nanomix, où il a travaillé au transfert de technologies dans le domaine des nanomatériaux et des nanotubes de carbone. Il y a aidé à la levée de 34 millions de dollars de capital-risque, et, avec son équipe, a été le premier à commercialiser un dispositif électronique intégré à base de nanotubes (un capteur d'hydrogène, en 2005).



Jean-François GAILLAUD

diplômé de l'École des mines d'Alès (2000), exerce depuis près de vingt ans au sein des ministères en charge de l'Environnement et de l'Industrie. Son parcours professionnel l'a conduit à se spécialiser dans l'accompagnement des entreprises.

À cet égard, il fut notamment conseiller développement durable et industrie au sein du service économique de l'Ambassade de France aux Pays-Bas de 2011 à 2015, adjoint au chef du bureau des éco-industries à la direction générale des Entreprises de 2015 à 2019, où il fut en charge des sujets relatifs à l'utilisation efficace des ressources et pris part aux travaux d'élaboration de la feuille de route économie circulaire.

Depuis 2020, Jean-François Gaillaud est chef du bureau de la politique des ressources minérales au sein du ministère de la Transition écologique. Il anime et évalue les politiques relatives à la recherche et à l'exploitation des substances minérales non énergétiques, et contribue à l'élaboration et la mise en œuvre des politiques relatives aux ressources minérales destinées à assurer la sécurité des approvisionnements. À ce titre, il s'est particulièrement investi dans les travaux ayant conduit à réformer le code minier (2021-2025). Il est membre du conseil d'administration de la Société d'Industrie Minérale et de divers groupes de travail européens et internationaux.

Benjamin GALLEZOT,

ancien élève de l'École normale supérieure (1994), est depuis janvier 2023 délégué interministériel aux approvisionnements en minerais et métaux stratégiques (services du Premier ministre). Il était directeur adjoint du cabinet du Premier ministre de janvier 2021 à mai 2022, directeur adjoint du cabinet civil et militaire du ministère des Armées de juin 2017 à janvier 2021, adjoint au Directeur général des Entreprises et chef du service de l'industrie de mai 2012 à mai 2017, conseiller industrie et énergie à la présidence de la République de mars 2010 à mai 2012, conseiller pour les affaires industrielles au cabinet du ministre de la Défense de janvier 2009 à mars 2010, sous-directeur des marchés de l'énergie au ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie de 2007 à 2009, rapporteur à la Cour des Comptes de 2003 à 2007, chef du bureau de la construction navale à la délégation générale pour l'armement de 1998 à 2002, et préalablement ingénieur d'études.



Corinne GENDRON

est professeure titulaire au département de Stratégie, Responsabilité sociale et environnementale de l'École des sciences de la gestion à l'Université du Québec à Montréal (UQAM), et dirige le groupe des Chercheurs en responsabilité sociale et en développement durable (CRSDD). Elle a consacré sa carrière à l'analyse de la responsabilité sociale et du développement durable et s'intéresse plus spécifiquement aujourd'hui à l'acceptabilité sociale.

Outre ses nombreuses publications, elle collabore avec des organisations publiques et privées au Québec et en France

à divers titres, et préside, notamment, le Comité des Parties Prenantes du groupe Excelia. Elle est membre de la Société Royale du Canada ainsi que membre de l'Académie des technologies et Chevalier de la Légion d'honneur de France.



Damien GOETZ

est Professeur à Mines Paris-PSL, et expert des questions de ressources minérales, en particulier des aspects techniques et économiques de leur exploitation et transformation, et des enjeux liés à leurs marchés et leur rôle dans la transition écologique.

Après un premier poste dans l'industrie sur un projet de développement d'une exploitation souterraine de métaux de base (gisement de Guemassa au Maroc), l'essentiel de sa carrière s'est déroulé dans l'enseignement supérieur et la recherche à Mines Paris PSL, où il a en particulier été directeur adjoint en charge de la recherche et directeur de l'Institut Carnot MINES de 2012 à 2016.

Rattaché au centre de Géosciences de l'école, il concentre ses activités d'enseignement aujourd'hui sur l'option Ressources minérales pour les transitions du cycle ingénieur civil, option qui fait l'objet d'un partenariat avec l'EMINES-School of Industrial Management de l'Université Mohamed 6 Polytechnique au Maroc (école qui propose un parcours équivalent à ses étudiants de dernière année du cycle ingénieur). Par ailleurs, son activité de recherche se développe essentiellement dans le cadre de deux chaires de mécénat portées par la Fondation Mines Paris : la chaire Minaumet - du minerai au métal, soutenue par Prony Resources New Caledonia ; et la chaire Ressources minérales pour la transition énergétique, menée en collaboration avec l'UM6P et soutenue par l'OCP au Maroc.



Dr. Blandine GOURCEROL

est cheffe de projet et experte scientifique au BRGM. Elle a obtenu son doctorat à l'Université Laurentienne en Ontario, Canada. Elle a précédemment participé à de nombreux projets de recherche nationaux et internationaux, ainsi qu'à des initiatives de soutien aux politiques publiques, avec un accent particulier sur les métaux critiques et stratégiques. Depuis 2024, elle est adjointe à la direction de

l'inventaire national des ressources minérales et responsable de l'innovation et de la valorisation dans ce domaine.



Emmanuel HACHE

est adjoint scientifique à IFP Énergies nouvelles (IFPEN). Il est Docteur en Sciences économiques (Université Paris I), habilité à diriger des recherches (Université Paris-Nanterre) et également diplômé en Géopolitique et Prospective de l'Institut de Relations internationales et stratégiques (IRIS). Il travaille sur les questions de prospective

énergétique, et plus précisément sur les ressources naturelles nécessaires à la réalisation de la transition écologique. Il est chercheur associé à Economix (Economix-CNRS, Université Paris Nanterre) et directeur de recherche à l'IRIS. Il est également expert à l'Observatoire des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI).

Il est l'auteur du livre *Géopolitique des énergies* (Eyrolles, 2022) ; de *Métaux, le nouvel or noir* (avec B. Louvet ; Éditions du Rocher, 2023) et *Géopolitique des matières premières* (Eyrolles, 2025) ; et de plus de 70 articles dans des revues académiques françaises et internationales.



Peter HANDLEY

Consultant specialising in sustainability and resilience as founder of PHASE32. External senior advisor with McKinsey & Company. Senior fellow with the European Initiative for Energy Security. Strategic advisor with the Hague Centre for Strategic Studies. Senior associate with the Cambridge Institute for Sustainability Leadership. Special advisor to the Global Council for

Responsible Transition Minerals.

Former European Commission official - deputy director and head of unit responsible for energy-intensive industries and raw materials at DG Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (DG GROW).



Philippe HATRON

est diplômé d'une maîtrise en finance de l'Université de Rouen et d'un Executive MBA de l'Université de Georgetown (USA). Il démarre sa carrière en 1988 chez Price Waterhouse et devient manager en 1993. Il intègre ensuite en 1995 la direction Financière de COGEMA.

En février 1998, il est nommé aux États-Unis, vice-président et directeur financier de

Transnuclear, Inc. En 2001, toujours aux États-Unis, il est nommé directeur financier de la *business unit* Mesures Nucléaires, dont il a également assuré la direction des ressources humaines de 2003 à 2005. En 2006, il prend les fonctions d'executive-vice-président et directeur financier d'AREVA North America. Deux ans plus tard, il est nommé directeur de l'Audit d'AREVA.

En mars 2012, Philippe Hatron est nommé directeur des Ventes Mines et Amont, adjoint du directeur général adjoint, en charge du Commercial. Puis en mai 2016, basé à Pékin, il est directeur Chine, Taïwan et Corée du Sud pour le groupe Orano.

Depuis fin 2024, il est directeur des activités Batteries du groupe Orano et président d'Orano Batteries. Il siège aussi au conseil d'administration de la co-entreprise Neomat CAM.



Bruno JACQUEMIN

est délégué général d'A3M (Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux) depuis 2020. Ingénieur civil des mines (Nancy 86), il est un spécialiste reconnu des écosystèmes industriels et des relations entre entreprises, pouvoirs publics et territoires.

Après une première expérience entrepreneuriale originale dans l'événementiel, il a été le collabora-

teur d'André Rossinot, maire de Nancy et ministre de la Fonction publique, puis a dirigé pendant quinze ans plusieurs Chambres de commerce et d'industrie (CCI Alsace, CCI Loiret), qu'il a profondément transformées. Il a ensuite fondé un cabinet de conseil et d'investissement dédié aux dirigeants, fonds d'investissement et accélérateurs de start-ups.

Il est également délégué permanent du Contrat Stratégique de Filière Mine et Métallurgie au sein du Conseil national de l'Industrie.

À la tête d'A3M, Bruno Jacquemin porte une ambition claire : bâtir une alliance « souveraineté – métaux – climat – industrie ». Son action vise à préserver et renforcer le socle minier et métallurgique-sidérurgique, garant de la prospérité nationale et du développement des territoires. Promoteur d'une industrie de solutions, il œuvre à donner toute sa place à l'industrie de base pour répondre aux défis de la transition écologique, de la réindustrialisation et de la souveraineté économique. Il s'attache ainsi à sécuriser les chaînes de valeur stratégiques, promouvoir des projets miniers et sidérurgiques durables, et articuler innovation technologique (IA, robotique, procédés bas-carbone) avec impératif écologique.



Yves JÉGOUREL

est depuis 2022 professeur titulaire de la chaire « économie des matières premières et des transitions durables » du Conservatoire national des arts et métiers, où il dirige le département Économie, Finance, Assurance Banque (Efab). Il était précédemment Professeur d'université à l'Université de Bordeaux. Il est également professeur associé à Mines Paris –

PSL, *senior fellow* au Policy Center for the New South, chroniqueur (*Le Point*, *Géo*), ainsi que co-directeur du cercle CycloOpe, *think-tank* français de référence sur les marchés mondiaux de matières premières. Il participe à l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (Ofremi). Il est enfin *senior advisor* pour la société de gestion Infravia Capital Partners sur les questions relatives aux ressources minérales.

Yves Jégourel est l'auteur d'articles dans des revues à comité de lecture, et d'ouvrages sur les matières premières. Il co-dirige ainsi le rapport CycloOpe sur les marchés mondiaux de matières premières, dont la 39^e édition est parue aux éditions Economica en mai 2025.



Olga KERGARAVAT

diplômée d'un doctorat dans le domaine de l'hydrogéologie et de la pollution des nappes souterraines, rejoint l'ADEME en 2003 en tant que chef de projet pour la dépollution des sites pollués à responsabilité défaillante (dont la dépollution est confiée par l'État à l'ADEME). Depuis dix ans, elle est coordinatrice scientifique et technique au sein du service Éco-conception

et Recyclage dans la direction Économie circulaire de l'ADEME, et elle se consacre à la filière batteries et plus largement à la filière du recyclage des métaux.

Son appétence pour les sujets d'innovation et de recherche l'amènent à suivre plusieurs projets de thèses par an, co-financées par l'ADEME, dans les domaines des métaux et des batteries. Elle instruit et suit des projets d'innovation ainsi que des projets industriels permettant de mieux recycler, récupérer et réincorporer des matières métalliques, dans le cadre des projets France 2030 (Plan d'Investissement de l'État) et des appels à projets lancés par l'Ademe dans le cadre du Fonds Économie circulaire (AAP ORMAT). Elle a piloté l'étude du potentiel d'amélioration du recyclage des métaux en France (étude de référence sur le recyclage de l'acier, de l'aluminium et du cuivre), publiée en mars 2024, et plus récemment l'étude sur le besoin en métaux dans le secteur du numérique (novembre 2024).



David KRUPKA

diplômé en master des relations internationales et affaires européennes de la Sorbonne à Paris, est responsable Développement au sein d'Afnor Normalisation. Il est en charge d'accompagner les politiques publiques et les stratégies d'entreprises sur le volet « Normalisation ».

Depuis plus de douze ans, il intervient dans la rédaction de référentiels techniques sur les métaux et minéraux aux niveaux national, européen et international. Pendant plus de dix ans, il a été le secrétaire du comité international « ISO/TC 79 - Métaux légers » (Aluminium, Titane et Magnésium). Il a créé la commission française A59A « Lithium » et a lancé l'initiative française de création d'un comité technique international sur les métaux et minéraux critiques et de spécialité, avec le soutien de l'État français.

Au sein d'Afnor Normalisation, il a été le responsable du pôle en charge de la normalisation sur les équipements, l'ingénierie industrielle et les matériaux. À cette occasion, il a suivi l'ensemble de la normalisation internationale sur le nickel et ses alliages au travers de l'ISO/TC 155 confié à AFNOR Normalisation.

David Krupka est expert référent auprès de la Commission européenne sur les questions de minéraux critiques et stratégiques. Il est membre du Comité des Métaux Stratégiques auprès du ministère français de la Transition écologique.



Maël LE BAIL

ingénieur de formation, spécialisé en énergie, est actuellement chef du pôle énergies à la direction de la diplomatie économique du ministère de l'Europe et des Affaires étrangères. Il pilote les dossiers stratégiques liés à la transition énergétique, au nucléaire civil, aux hydrocarbures ainsi qu'aux minerais et métaux critiques. À ce titre, il est chargé de la mise en

œuvre de la diplomatie des métaux pour le compte de la Délégation interministérielle aux approvisionnements en minerais et métaux stratégiques (DIAMMS), contribuant à la sécurisation des chaînes d'approvisionnement et à la transition énergétique. À l'interface entre diplomatie économique et politique industrielle, son action s'inscrit dans une vision globale de la souveraineté énergétique française et européenne.

Son parcours allie diplomatie scientifique, coopération internationale et expertise sectorielle. Au ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, comme en poste à l'étranger (Bruxelles et Hong Kong), il a animé des coopérations bilatérales, contribué à la mise en œuvre de la stratégie internationale scientifique et universitaire de la France. Il a œuvré à renforcer les liens entre la France et ses partenaires dans des domaines tels que l'hydrogène, les agritechs ou l'intelligence artificielle, et organisé des événements de haut niveau et débats d'idées réunissant ministres, chercheurs et industriels.

Son action vise à articuler soutien à l'export, souveraineté énergétique et coopération scientifique, en intégrant les enjeux de formation, d'innovation et de développement durable.



Mathieu LEGUÉRINEL

est diplômé d'un master en géologie et management des ressources minérales au sein de l'École nationale d'application des géosciences (ENAG) à l'Université d'Orléans. Il a intégré le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) en 2017. Au sein de l'équipe d'intelligence minérale, il s'est spécialisé dans l'analyse et le suivi de plusieurs métaux dont le

graphite, le cuivre ou les métaux précieux. Il s'intéresse à la chaîne de valeur de ces métaux, de leur extraction à leur recyclage, pour le compte des ministères de tutelles ou d'acteurs privés, et enseigne dans plusieurs universités dont Orléans et Rennes. Il effectue également des missions à l'international, notamment en Guinée, en tant que géologue des ressources minérales. Pour l'OFREMI, il est, entre autres, en charge d'animer le groupe de travail sur le cuivre.



Louis-Marie MALBEC

est économiste-prospectiviste à IFP Énergies nouvelles. Il est Docteur en Énergétique et Environnement (Université d'Orléans). Il travaille sur les questions de prospective énergétique, avec une spécialisation dans le déploiement d'une économie de l'hydrogène et dans les besoins en ressources minérales de la transition énergétique. Il est également expert à l'Observatoire des ressources

minérales pour les filières industrielles (OFREMI).

Alice MARIE

est diplômée de Centrale Nantes, et ingénieure chercheuse au CEA. Au sein de l'institut du LITEN, elle est cheffe de projet et référente matériaux critiques. Elle contribue à l'OFREMI (Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles) depuis ses débuts, et y pilote les travaux sur les matériaux critiques des batteries et des aimants permanents.



Yannick MÉNARD

docteur ingénieur en génie des procédés, bénéficie de plus de vingt ans d'expérience dans le développement de techniques innovantes pour le traitement des matières premières primaires (minerais, résidus miniers, rejets de traitement) ainsi que dans le recyclage des matières premières secondaires (déchets issus de la métallurgie extractive, déchets de construction, déchets électroniques). Co-auteur d'une trentaine de publications scientifiques et inventeur de cinq brevets, il possède une expertise reconnue dans plusieurs domaines clés : la fragilisation et la fragmentation des matériaux, le développement de procédés physiques et physico-chimiques pour le traitement des sols pollués, des déchets et des minerais, la conception de bioprocédés en métallurgie extractive, ainsi que la mise au point de pilotes multi-échelles pour le traitement des minerais et des déchets. Par ailleurs, il intervient également dans l'évaluation environnementale des produits et procédés.

Depuis janvier 2025, Yannick Ménard occupe le poste de directeur adjoint de la direction des Ressources minérales au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) à Orléans. Cette direction a pour mission d'étudier de manière globale et pluridisciplinaire les différents aspects du cycle de vie des minerais, géomatériaux et ressources minérales, qu'ils soient primaires, extraits du sous-sol, ou secondaires, issus du recyclage. Elle s'intéresse ainsi à toutes les étapes des chaînes de valeur, depuis les mécanismes de formation des gisements, l'exploration et la caractérisation des roches et minéraux, jusqu'au traitement des minerais et des déchets, en intégrant les dimensions géopolitique, économique, environnementale et sociétale des filières.



Romain MILLOT

Ph.D., docteur en géochimie (IPGP, Université Paris 7, 2002), est actuellement le directeur scientifique de Lithium de France, premier opérateur indépendant de chaleur et de lithium géothermal en France. Créée en 2020, l'entreprise vise à accélérer la transition énergétique en fournissant de la chaleur bas-carbone aux entreprises et aux agriculteurs et en produisant du lithium souverain

pour les batteries de véhicules électriques. Il supervise les activités scientifiques de Lithium de France, coordonne les projets scientifiques et joue un rôle crucial dans la sécurisation des partenariats et des financements. En outre, il gère la feuille de route numérique de l'entreprise, stimulant les avancées technologiques et l'innovation pour maintenir Lithium de France à la pointe de l'industrie.

Il a publié 80 articles scientifiques, dont 22 en tant que premier auteur, et possède un H-index de 43.

En 2013, il a obtenu l'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) de l'Université d'Orléans. En 2024, il a obtenu un certificat de l'École polytechnique – Executive Education en gestion avec le *big data* et l'intelligence artificielle.



Alan PARTE

diplômé de Mines Paris – PSL en 2006, puis de l'INSEAD en 2009, débute sa carrière dans le conseil en stratégie chez McKinsey & Company à Paris, se focalisant sur le secteur industriel. En 2012, il rejoint Imerys en tant que responsable Stratégie et Développement pour la division Minéraux Réfractaires. En 2016, il est nommé directeur des Opérations des activités Andalousite, puis

en 2019, directeur des Achats pour la branche Réfractaires, Abrasifs et Construction. Début 2021, il prend la responsabilité de vice-président des Projets Lithium chez Imerys, position depuis laquelle il développe et pilote le projet EMILI (Exploitation de Mlca Lithinifère par Imerys) ainsi que le projet British Lithium au Royaume-Uni.



Stéphane PELLET-ROSTAING

est directeur de l'Institut de Chimie Séparative de Marcoule (ICSM), unité mixte de recherche CEA/CNRS/UM/ENSCM dont l'ambition est de mener une recherche fondamentale de haut niveau en Chimie Séparative, nécessaire au recyclage des matières et appliquée particulièrement au cycle du combustible nucléaire. Directeur de

recherche au CNRS et titulaire d'un doctorat de Chimie de l'Université de Lyon, il a tout d'abord intégré la société FUTURASE comme Ingénieur de Recherche, avant de rejoindre l'Institut de Chimie et Biochimie Moléculaire et Supramoléculaire (ICBMS) de Lyon, pour se consacrer au développement de méthodologies de synthèse de

molécules bioactives, de catalyseurs organo-métalliques et de systèmes chélatants pour la chimie séparative.

Stéphane Pellet-Rostaing rejoint ensuite l'ICSM en 2009 pour y apporter son expertise dans le domaine des architectures moléculaires pour l'optimisation des procédés hydrométallurgiques de tri ionique, avec une orientation dans la compréhension des mécanismes moléculaires et supramoléculaires d'extraction associés. Responsable de l'équipe « Tri ionique par des Systèmes Moléculaires auto-assemblés » de l'ICSM, il a également été Responsable Scientifique et Technique du Laboratoire d'Excellence « Chemisyst » (LabEx Chimie des systèmes) et participe actuellement à la coordination de l'axe « métaux stratégiques » du PEPR « recyclage, recyclabilité et réutilisation des matières ».

Co-auteur de 170 publications et 45 brevets, il est à l'origine de nombreuses collaborations académiques et industrielles, et s'implique dans l'enseignement en formation initiale et en formation continue dans les domaines de l'énergie, du cycle du combustible nucléaire, de la chimie verte et de l'économie circulaire à l'Université de Montpellier, à l'École supérieure de chimie physique électronique de Lyon, à l'IMT d'Albi ainsi qu'au Cnam de Paris.



Massimiliano PICCIANI

a rejoint le Commissariat à l'Énergie Atomique, après un diplôme en Génie nucléaire au Politecnico di Milano et des études de physique à l'École polytechnique, pour y mener une thèse en physique statistique appliquée aux matériaux sous irradiation. Il a ensuite poursuivi sa carrière en tant qu'ingénieur de recherche dans le centre

R&D du groupe Saint-Gobain.

À partir de 2016, il s'est dédié au financement public de projets de recherche et innovation à l'Agence Nationale de la Recherche, notamment sur les programmes nationaux et européens pour les matériaux et les métaux critiques. Il est à présent responsable sectoriel à la direction de l'Innovation de Bpifrance, en charge des programmes de financement du plan d'investissements France 2030 dédiés aux secteurs des métaux critiques et au développement des réacteurs nucléaires innovants.



Christophe POINSSOT

est depuis 2020 le directeur général délégué du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) où il a également été directeur scientifique de 2020 à 2024. Dans ce cadre, il est, notamment, très impliqué dans les actions de soutien à la politique publique de sécurisation des approvisionnements en ressources minérales.

Il est également le représentant du BRGM au *board* de l'association des services géologiques européens EuroGeoSurveys, qu'il a présidé en 2023 et 2024.

Ancien élève de l'École normale supérieure où il a suivi un double cursus en géologie et physique, il est titulaire d'une thèse de doctorat en physique / sciences des matériaux (1997) et d'une HDR en chimie (2007).

Il a d'abord travaillé durant vingt-cinq ans au CEA, où il a notamment développé une expertise reconnue dans l'aval du cycle électronucléaire (gestion des déchets, recyclage des combustibles, empreinte environnementale, soutenabilité) tout en prenant des responsabilités managériales croissantes. Après dix ans à Saclay, où il a dirigé les équipes travaillant sur le stockage des déchets, il a rejoint en 2008 le centre de Marcoule, où il a dirigé de 2011 à 2018 le département de R&D chargé de développer les procédés de recyclage des combustibles et d'extraction de l'uranium.

Christophe Poinsot est nommé en 2018 conseiller nucléaire à l'Ambassade de France en Chine (Pékin), où il participe activement aux discussions intergouvernementales sur le nucléaire civil tout en accompagnant les industriels.

Il a été élu à l'Académie des Technologies en novembre 2024, et nommé par le gouvernement en juillet 2025 membre de la commission nationale d'évaluation sur les recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs.

Il est Chevalier de la Légion d'honneur et Officier des Palmes académiques.



D.R.

Candice ROCHE

est économiste-prospectiviste à IFP Énergies nouvelles. Elle est diplômée de l'ENS Paris-Saclay, avec une spécialisation dans le domaine de la transition énergétique. Elle travaille sur la géopolitique de la transition énergétique et la sécurisation des approvisionnements en métaux. Elle collabore aux travaux de l'Observatoire des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI).



D.R.

Judith SAUSSE

est Professeur des universités à l'École des Mines de Nancy, et mène ses activités de recherche au sein du laboratoire GeoRessources (UMR CNRS 7359) de l'Université de Lorraine.

Spécialiste reconnue en géophysique des réservoirs, réservoirs fracturés, exploration géothermique et modélisation géologique 3D, elle

est, notamment, experte des systèmes géothermiques stimulés (EGS), de l'exploration géothermique profonde et de la pétrophysique. Ses travaux ont donné lieu à 38 publications scientifiques.

Directrice de la Formation « Ingénieur Civil des Mines » de l'École des Mines de Nancy de 2011 à 2017, elle est, depuis 2018, directrice de l'École nationale supérieure de géologie (ENSG), où elle pilote, en collaboration avec l'équipe pédagogique, la stratégie des formations d'ingénieurs et leur évolution, en lien étroit avec le monde socio-économique et la recherche. Ses actions portent sur l'ensemble des disciplines des géosciences, avec

une attention particulière au cycle complet de l'Industrie minérale. Chaque année, l'ENSG forme environ 120 ingénieurs géologues, dont environ un quart se spécialise dans le domaine des matières premières minérales.

Judith Sausse est également membre fondatrice de la chaire Industrie Minérale & Territoires, et préside son comité d'orientation. Elle siège également au conseil scientifique du BRGM et au conseil d'administration de la Société de l'Industrie Minérale (SIM).



D.R.

John SEAMAN

est chercheur au sein du centre Asie de l'Institut français des Relations internationales (Ifri) depuis 2009. Spécialiste de la Chine, il étudie comment sa transformation économique et l'évolution de ses ambitions mondiales influencent son rôle sur la scène internationale, notamment dans ses relations avec

les États-Unis et l'Europe. Depuis quinze ans, il analyse la place de la Chine dans les chaînes de valeur des minerais critiques, en particulier celle des terres rares. Il est Co-fondateur et coordinateur du European Think-tank Network on China (ETNC), et contribue aux projets Digital Power China et ReConnect China (Horizon Europe). Diplômé de Sciences Po Paris et de Seattle University, il a étudié à Pékin en tant que boursier David L. Boren, et a travaillé au sein de la délégation des États-Unis auprès de l'Otan. Il a également été deux fois Chercheur invité à Tokyo, dans le programme « Énergie et environnement » du Canon Institute for Global Studies (CIGS).



D.R.

Solène TOUZÉ

est ingénieure en génie des procédés de l'Université de Technologies de Compiègne (UTC). Elle travaille depuis 2002 au BRGM, et coordonne des projets de développement technologique collaboratifs (H2020, ANR) et commerciaux. Ses compétences scientifiques couvrent l'échantillonnage et les procédés physiques et

physico-chimiques de traitement de la matière solide. Elle travaille plus particulièrement sur les ressources dites secondaires (déchets miniers, déchets électroniques, déchets du bâtiment, mâchefer, etc.). Un de ses thèmes majeurs porte sur la caractérisation de DEEE. Elle travaille à l'échelle laboratoire et pilote. Au sein du laboratoire, elle gère également une partie des prestations de recherche commerciale avec les industriels sur les études de traitement physique et d'échantillonnage.



Johann TUDURI

est géologue et directeur du programme scientifique « Ressources minérales et économie circulaire » au BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), basé à Orléans. Titulaire d'un doctorat en géosciences et également habilité à diriger des recherches (HDR), il s'est spécialisé dans la géologie des ressources minérales avec

un intérêt particulier pour les systèmes métallogéniques renfermant des éléments stratégiques, tels que les terres rares, le lithium, le cuivre ou encore l'argent.

Il a consacré une part importante de sa carrière à la formation, notamment au sein de BRGM Campus, tout en menant des études approfondies sur des gisements métallifères en Europe et en Afrique du Nord. Ses travaux scientifiques portent sur la genèse des gîtes minéraux, leurs contrôles structuraux et les dynamiques géologiques profondes à leur origine. Engagé dans les enjeux contemporains liés à la transition énergétique et à l'économie circulaire, il explore les problématiques de criticité des matières premières. Il s'attache, notamment, à intégrer les notions de flux et stocks lithosphériques dans les analyses de flux de matières (MFA), afin d'éclairer les décisions stratégiques en matière de gestion des ressources.

En tant que directeur de programme, il joue un rôle central dans la définition et la mise en œuvre de la stratégie du BRGM, contribuant ainsi à renforcer l'autonomie stratégique de la France et de l'Europe en matière de ressources minérales. Il participe activement à la diffusion des savoirs scientifiques auprès du grand public, des décideurs et du monde académique, à travers des formations, conférences, des publications et des collaborations interdisciplinaires.



Philippe VARIN

est un dirigeant industriel français, diplômé de l'École polytechnique et de l'École des Mines de Paris. Il a occupé plusieurs fonctions de premier plan, notamment comme directeur général du sidérurgiste Corus, président du directoire de PSA Peugeot Citroën (2009-2014), puis président des groupes nucléaires Areva et Orano. Il a également

présidé le conseil d'administration de Suez (2020-2022) ainsi que France Industrie, et a siégé au Conseil national de l'industrie.

Il est aujourd'hui président de la Chambre de commerce internationale (ICC) et du World Materials Forum, et contribue aux réflexions sur la sécurisation des approvisionnements en matières premières critiques. Ses responsabilités et engagements lui ont valu d'être distingué Officier de la Légion d'honneur, Chevalier de l'ordre national du Mérite et Commander of the British Empire (CBE). Il est également président de l'association C'Possible, dédiée à l'insertion professionnelle des lycéens professionnels.



Stéphanie YATES


est professeure au département de communication sociale et publique de l'UQAM depuis quinze ans, membre du Labfluens – Laboratoire sur l'influence et la communication – et du groupe de recherche en communication politique. Ses travaux s'inscrivent dans le champ de la communication politique. Politologue (Ph.D.

science politique, Université Laval, 2010), elle étudie le lobbying, la participation publique et la communication stratégique déployée par les acteurs souhaitant influencer les politiques publiques (groupes d'intérêt ou associations, *think tanks*, coalitions), particulièrement dans des cas de controverses environnementales ou soulevant des enjeux d'acceptabilité sociale, entre autres, liés à la transition socioécologique.

Avec de nombreuses publications sur ces sujets, elle intervient fréquemment comme formatrice, consultante et experte sur ces questions. Elle est par ailleurs directrice de la collection « Communication stratégique et relations publiques » aux Presses de l'Université du Québec, et responsable du programme de baccalauréat en communication, politique et société à l'UQAM.


Les Annales des mines, c'est 4 revues

RÉALITÉS INDUSTRIELLES



Publie des dossiers thématiques sur des enjeux importants pour le développement industriel et économique

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT



Publie des dossiers thématiques sur l'écologie, le développement durable, et notamment l'énergie et le changement climatique

GÉRER & COMPRENDRE



Revue académique pluridisciplinaire à comité de lecture dédiée à la gestion et à l'étude des organisations et du travail

ENJEUX NUMÉRIQUES



Publie des dossiers thématiques sur la transition numérique en croisant les regards technologiques, économiques et sociétaux

nous assurons une présence sur



Notre site

<https://annales-des-mines.org/>



LinkedIn

<https://www.linkedin.com/company/page-des-annales-des-mines/?viewAsMember=true>



Mastodon

<https://mastodon.social/@AnnalesdesMines>



Instagram

<https://www.instagram.com/annalesdesmines/>



X (ex twitter)

<https://twitter.com/AnnalesdesMines>



YouTube



Youtube

<https://www.youtube.com/@lesannalesdesmines7238>