



HAL
open science

Matières premières, métaux critiques, terres rares : Contexte international et enjeux

Jean-Pierre Damiano

► **To cite this version:**

Jean-Pierre Damiano. Matières premières, métaux critiques, terres rares : Contexte international et enjeux. 2022. hal-03737187

HAL Id: hal-03737187

<https://hal.science/hal-03737187>

Submitted on 23 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Matières premières, métaux critiques, terres rares : **Contexte international et enjeux**

Raw materials, critical metals, rare earths: context and issues

Jean-Pierre DAMIANO

Ancien ingénieur de recherches (Université Côte d'Azur CNRS)

jean-pierre.damiano@univ-cotedazur.fr

Résumé

Les métaux stratégiques ou critiques dont les terres rares, grâce à leurs propriétés physico-chimiques particulières, sont à la base de la fabrication de produits de haute technologie. Les secteurs civil et militaire sont concernés avec les domaines de l'industrie numérique, de la transition énergétique, de la mobilité électrique, des télécommunications, de la santé, du nucléaire, de l'aérospatial, de la défense, etc. L'extraction de ces métaux est le plus souvent localisée dans des pays non-membres de l'Union européenne (Chine, Brésil, Viêt Nam, Russie, Inde, Australie, Chili, etc.). Les ressources minérales du Groënland font l'objet de la convoitise de nombreux pays. Les enjeux sont donc environnementaux et sociétaux mais aussi stratégiques (sécurisation de l'approvisionnement afin de préserver la souveraineté industrielle et économique). Cet article, non exhaustif, présente le contexte international et les enjeux, les initiatives européennes et françaises, la nature des matériaux et leurs domaines d'utilisation. Les images ou figures présentées sont la propriété de leurs auteurs cités. Le contenu de l'article est fondé sur l'ensemble des références données à chaque chapitre. Des références complémentaires en fin d'article sont proposées afin d'approfondir le sujet.

Mots-clefs

Terres rares, lanthanides, aimants permanents, matières premières, métaux critiques, métaux stratégiques, transition énergétique, environnement, ressources naturelles, pollution, minerais, extraction minière, rareté, recyclage, hydrométallurgie, pyrométallurgie, agromine, substitution, approvisionnement, production, sécurité, durabilité, résilience, enjeux, économie, société, stratégie, industrie, numérique, nucléaire, santé, spatial, défense.

Abstract

Strategic or critical metals, including rare earths, thanks to their particular physical properties, are the basis for the manufacture of high-tech products. The civil and military sectors are concerned with the digital industry, energy transition, electric mobility, telecommunications, health, nuclear, aerospace, defense, etc. The extraction of these metals is most often located in non-EU countries (China, Brazil, Vietnam, Russia, India, Australia, Chile, etc.). Greenland's mineral resources are coveted by many countries. The stakes are therefore environmental and societal, but also strategic (securing the supply in order to preserve industrial and economic sovereignty). This non-exhaustive article presents the international context and the challenges, the European and French initiatives, the nature of these materials and their fields. The images or figures presented are the property of their cited authors. The content of the article is based on the set of references given at each chapter. Additional references are provided at the end of the article to further explore the subject.

Keywords

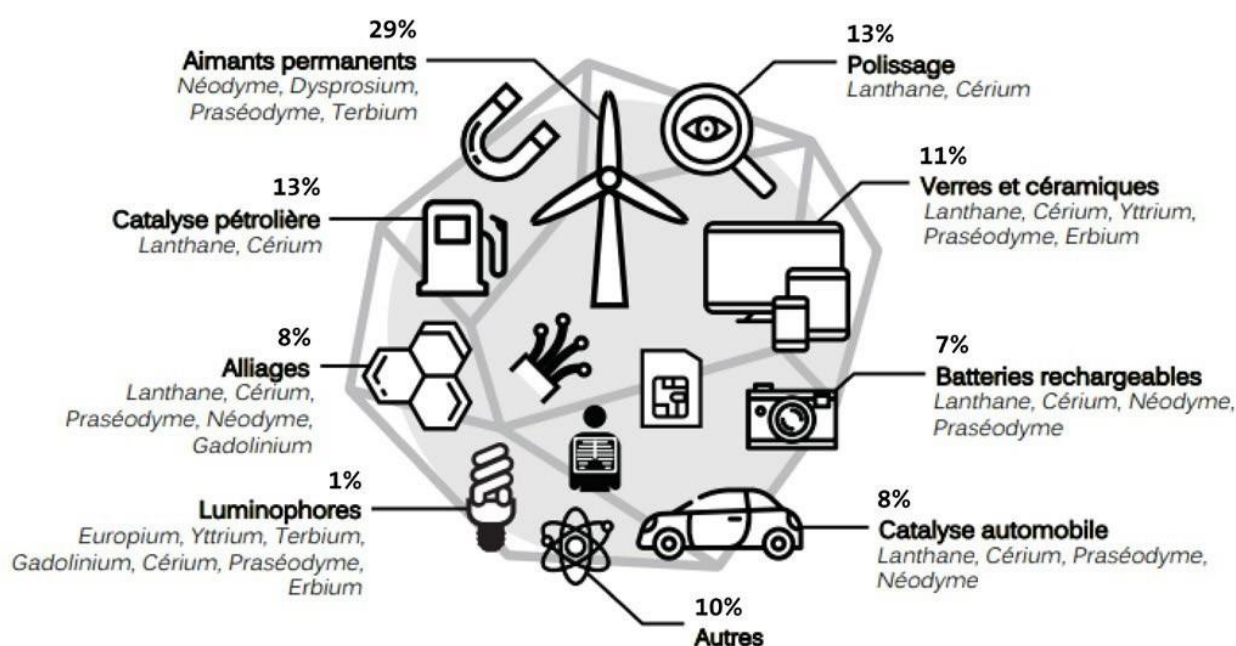
Rare earths, lanthanides, permanent magnets, raw materials, critical metals, strategic metals, energy transition, environment, natural resources, pollution, ores, mining, scarcity, recycling, hydrometallurgy, pyrometallurgy, agromining, substitution, supply, production, security, sustainability, resilience, issues, economy, society, strategy, industry, digital, nuclear, health, space, defense.

Le contexte international et les enjeux

Nos sociétés se développent grâce aux matières premières qui accompagnent nos modes de vie (alimentaire, industrielle, énergétique, etc.). Leur caractère stratégique engendre des enjeux sociétaux, économiques et environnementaux au cœur de la géopolitique mondiale.

C'est le cas pour l'eau, par exemple, vitale pour l'humanité mais aussi essentielle aujourd'hui pour la fabrication des semi-conducteurs, par exemple, entre autres dispositifs !*

Les matières premières minérales, sont indispensables à la production d'une large variété de biens et de services dans les secteurs civil et militaire, pour leur usage dans de nombreux domaines - industrie high-tech, industrie numérique, transition énergétique, mobilité électrique, télécommunications, santé, nucléaire, aérospatial, défense, etc. Elles contribuent à la fabrication de produits de haute technologie - semi-conducteurs, lasers, smartphones, panneaux solaires, rotors d'éoliennes, composants de véhicules hybrides, batteries, appareils d'imagerie médicale, systèmes de guidage de missile, équipements des avions de chasse, etc.

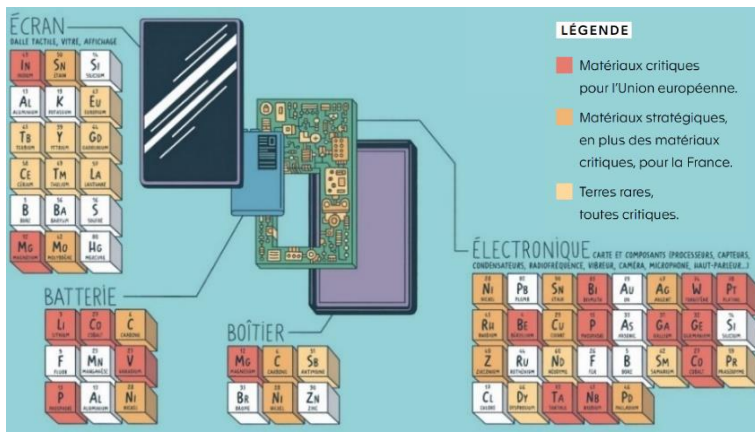


Bureau de Recherches Géologiques et Minières © [BRGM](#)

Les métaux occupent une place essentielle dans l'économie. D'une vingtaine utilisée il y a quarante ans, l'émergence de nouvelles technologies en a presque quadruplé le nombre. Grâce à des qualités naturelles et des propriétés exceptionnelles (chimiques, magnétiques, catalytiques, spectrales, etc.), les terres rares occupent ainsi une place de choix, à côté de métaux bien connus comme le fer, l'aluminium, le manganèse ou l'argent, par exemple.

Pour les batteries des véhicules électriques et le stockage de l'énergie, l'Union européenne (UE) prévoit qu'elle aurait besoin de 18 fois plus de lithium et de 5 fois plus de cobalt en 2030, de 60 fois plus de lithium et 15 fois plus de cobalt en 2050, par rapport à son approvisionnement de 2020. Dans le même sens, la demande de terres rares pour la technologie des aimants permanents présents dans les véhicules électriques, les éoliennes, etc. serait multipliée par 10 d'ici 2050. Dans le cas des éoliennes offshore, les aimants à base de néodyme permettent de réduire significativement la masse des moteurs, des générateurs, etc. Les aimants à base de dysprosium ou de terbium permettent de conserver un niveau de performance sous de fortes contraintes thermiques.

**Les ressources en eau sont l'un des défis majeurs du 21^{ème} siècle : le programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) exploratoire [OneWater - Eau bien commun](#), co-piloté par le [CNRS](#), le [BRGM](#) et l'[INRAE](#), a été lancé le 16 mars 2022. Il est financé dans le cadre du [PIA 4](#) et du plan [France Relance](#). Il a vocation à mettre les recherches sur les ressources en eau au cœur de la transition durable des territoires.*



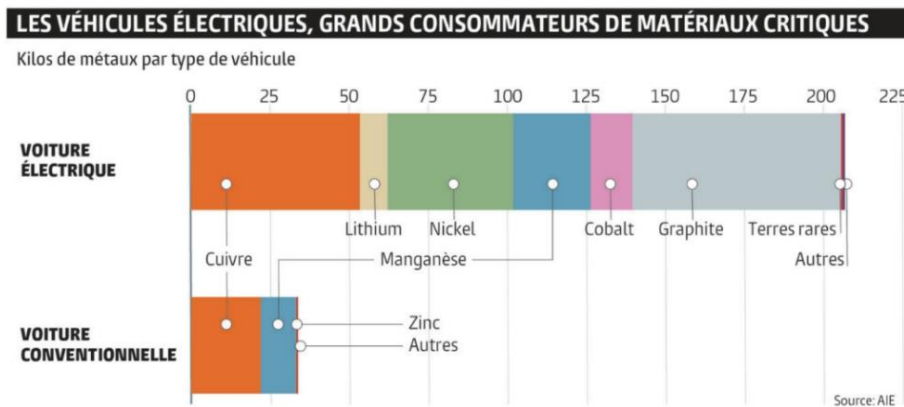
Pour un seul smartphone :

- 70 kg de matières premières pour le produire, l'utiliser et l'éliminer
- Environ 60 matières premières présentes dont une vingtaine sont recyclables
- 15 % des smartphones mis sur le marché sont recyclés

Source : [Les matières premières d'un smartphone](#) © J.Perrodeau, Défis du CEA, 27 juillet 2021

Si un smartphone ne contient en moyenne que 3 g de terres rares, une voiture peut en contenir jusqu'à quelques Kg et une éolienne offshore quelques centaines de Kg selon sa puissance.

En prenant comme exemple les voitures conventionnelle et électrique, on a une meilleure vision des matières nécessaires à leur élaboration dont certaines sont dites critiques :



Voiture électrique ou conventionnelle et les matériaux critiques

Source : [Les terres rares font leur retour comme opportunité d'investissement](#), LeTemps.ch, 26 mai 2021
Crédit IEA / [AIE](#)

La criticité de certaines matières premières dont les terres rares, est liée à la difficulté de l'approvisionnement (risques géologiques, techniques, géopolitiques, etc.), au caractère de vulnérabilité à une pénurie éventuelle avec une envolée des cours et aux impacts industriels ou économiques préjudiciables importants.

Faisant suite au différend territorial de 2010 entre la Chine et le Japon, concernant les îles Senkaku, la Chine avait décrété un embargo sur l'exportation des terres rares vers le Japon et mis en place une politique de quotas pour l'exportation de ces matières. La Commission européenne a alors décidé de renforcer son plan d'action en dressant, depuis 2011, une liste de matériaux critiques, tous les trois ans. Elle en compte 45. Le nombre et le type de matériau peuvent varier, d'une session à l'autre :

Antimoine / Baryte / Bauxite / Béryllium / Bismuth / Borate / Caoutchouc naturel / Charbon à coke / Cobalt / Gallium / Germanium / Graphite naturel / Hafnium / Indium / Lithium / Magnésium / Niobium / Platinoïdes / Phosphate naturel / Phosphore / Scandium / Silicium métal / Spath Fluor / Strontium / Tantale / Titane / Tungstène / Vanadium	<i>Terres rares légères :</i> Cérium / Lanthane / Néodyme / Praseodyme / Prométhium / Samarium / Scandium	<i>Terres rares lourdes :</i> Dysprosium / Erbium / Europium / Gadolinium / Holmium / Lutécium / Terbium / Thulium / Ytterbium / Yttrium
--	--	---

Dans le cas où un matériau est indispensable à la politique économique, énergétique et à la défense d'un Etat ou d'une entreprise ou d'un domaine sensible (aéronautique, nucléaire, énergie, électronique, télécommunications, etc.), la qualification de stratégique lui est associée. Au vu de ce constat, le Comité pour les matériaux stratégiques ([COMES](#)) de la France, en ajoute 13 à la liste européenne. *Métaux qualifiés de stratégique :* Argent / Carbone / Chrome / Cuivre / Étain / Molybdène / Nickel / Palladium / Rhénium / Rhodium / Sélénium / Tellure / Zirconium.

Le COMES participe à l'élaboration et à la mise en œuvre de la politique de gestion des métaux stratégiques, en vue de renforcer la sécurité d'approvisionnement nécessaire à la compétitivité durable de l'économie.

Pour mémoire, [les principaux producteurs de matières premières critiques](#) sont :

- Chine : 86 % des terres rares, 89 % du magnésium, 80 % du bismuth, gallium et germanium ;
- Afrique du Sud : 93 % du ruthénium, 80 % du rhodium et 71 % du platine ;
- République Démocratique du Congo (RDC) : 59 % du tantale et 64 % du cobalt ;
- Etats-Unis : 88 % du béryllium ;
- Brésil : 92 % du niobium ;
- Chili : 44 % du lithium ;
- France : 49 % de l'hafnium (utilisé notamment dans les réacteurs nucléaires des sous-marins).

La **Chine** a donc une position de quasi-monopole sur l'extraction et le traitement des terres rares qu'elle veut développer avec son projet de Nouvelle route de la soie, *Belt and Road Initiative* ([BRI](#)) : politique de constructions d'infrastructures portuaires, ferroviaires, terrestres dans le bassin méditerranéen, qui lui permettra de s'approvisionner en matières premières. Elle est devenue le premier partenaire commercial du Brésil et elle s'intéresse de très près à l'Inde et au Viêt Nam, parmi les principaux détenteurs de terres rares. Selon une publication du site portail allemand, [Statista](#), spécialisé dans l'analyse de données du secteur économique, la Chine verrait son monopole sur les terres rares diminuer. En effet, des pays disposant de gisements de terres rares commencent à en intensifier l'extraction : le Brésil, le Viêt Nam, la Russie, par exemple, disposant d'un gros potentiel minier encore largement inexploité. Les États-Unis et l'Australie ont augmenté leur production depuis une dizaine d'années et le Myanmar et la Thaïlande ont commencé à en extraire de grosses quantités.

Chine actualités :

- Parmi les initiatives récentes, il faut signaler que, le 23 décembre 2021, la [China Rare Earth Group Co. Ltd](#), entreprise publique, a été officiellement créée à Ganzhou, dans l'est de la Chine. C'est la plus grande initiative de ce genre au monde : conglomérat de certains des principaux producteurs industriels, y compris les unités de terres rares de trois des "Big Six" entreprises d'état - Aluminium Corporation of China ([CHALCO](#)), [China Minmetals Corporation](#) et [Ganzhou Qiangdong Rare Earth Group Co., Ltd](#) et deux sociétés de recherche - China Iron & Steel Research Institute Group ([CISRI](#)) et [Grimm Group Corporation Ltd](#). Cela représente environ 62 % des approvisionnements nationaux en terres rares lourdes. Un autre projet est d'en créer une autre, dans le nord, concentrée sur les terres rares légères. Le gouvernement pourrait regrouper tous ses acteurs mineurs et transformateurs de terres rares dans ces deux conglomérats. [Source : [China Merges Three Rare Earths State-Owned Entities to Increase Pricing Power and Efficiency](#), China Briefing, 12 janvier 2022].
- Pour conserver son monopole, la Chine a lancé, le 2 janvier 2022, un satellite de chasse aux minéraux pour explorer la planète à la recherche de nouvelles ressources : le Ziyuan-1 02E (satellite optique) dans le but d'identifier les zones du monde riches en minéraux de terres rares. Il serait capable de prendre des photos du sol avec une résolution de cinq mètres. [Source : [La Chine lance un satellite de chasse aux minerais pour maintenir son monopole sur les terres rares](#), Astrounivers, 4 janvier 2022].

Les **BRICS** (Brésil, Russie, Inde, Chine et l'Afrique du Sud), les États-Unis et l'UE se livrent à une guerre stratégique et d'influence (gouvernements, organisations non-gouvernementales, organismes financiers, fonds d'investissements, entreprises privées et publiques, etc.). L'UE est encore le premier partenaire commercial du continent africain, mais la Chine s'impose comme le principal fournisseur de marchandises pour plus de 30 nations africaines, ainsi que le premier investisseur étranger en Afrique. Pour ses richesses minières, l'Afrique est au cœur de cette guerre. Certains états, en échange de financement pour la construction d'infrastructures locales, acceptent de livrer des barils de pétrole ou des minerais stratégiques, primordiaux pour l'industrie des énergies renouvelables. Il ne faut pas oublier qu'une grande partie des échanges de matières premières se négocie sur les marchés financiers, ouverts à la spéculation et à la fluctuation des prix.

Un exemple pertinent est celui concernant les ressources minérales du **Groënland**, qui font l'objet de la convoitise de nombreux pays (Chine, Australie, Etats-Unis, etc.). Son sous-sol contient de grandes réserves de terres rares, mais aussi d'uranium, de pétrole, de gaz, de zinc, de plomb, de molybdène, d'or, de diamants, etc. La glace recouvre 80% de l'île, mais le changement climatique la fait fondre à grande vitesse.

Podcast : [un village d'Inuits lutte contre l'extraction d'uranium au Groënland](#)



La ville de Tasiilaq au Groënland © filip gielda / unsplash
14 août 2020

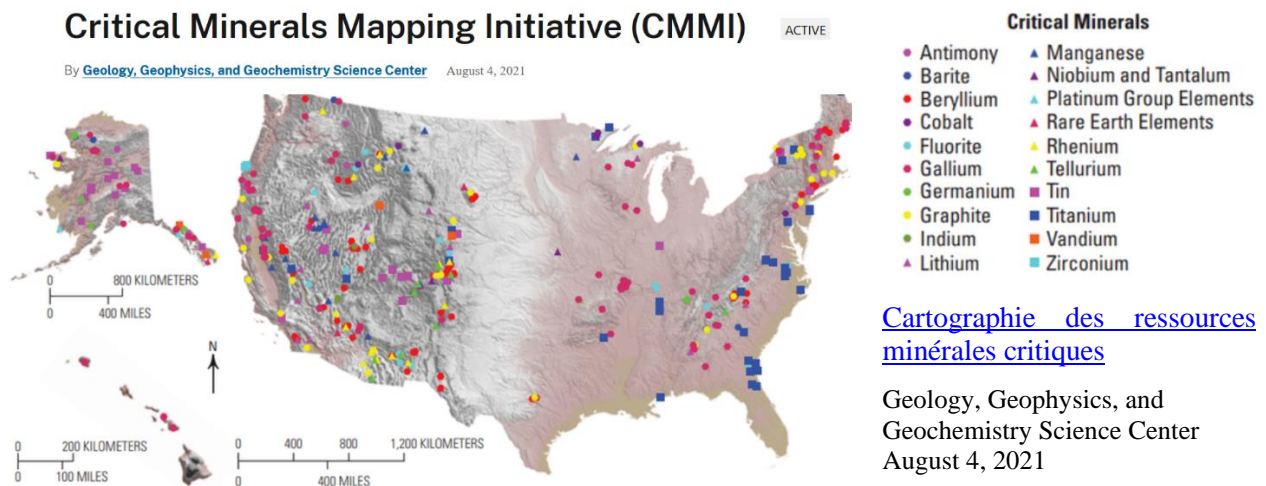
L'extraction des terres rares, souvent énergivore et polluante, est le plus souvent localisée dans des pays non-membres de l'UE comme la Chine, le Brésil, le Viêt Nam, la Russie, l'Inde, l'Australie, le Chili, le Burundi, etc. Par exemple, le lithium est surtout extrait en Australie, au Chili, en Bolivie et en Argentine. Le manganèse, le lithium, le cobalt ou le nickel, ont fait l'objet d'importants contrats miniers signés par la Chine avec les pays détenteurs, comme la République Démocratique du Congo qui fournit, à elle seule, plus de la moitié des besoins mondiaux en cobalt.

Selon le [BRGM](#), l'Europe possède des gisements primaires, repérés en Scandinavie, à Norra Kärr en Suède, par exemple. Le Groënland, pays constitutif du royaume du Danemark et aussi territoire d'outre-mer associé à l'Union européenne, ne contiendrait pas moins de 12% des réserves mondiales exploitables de terres rares. Des gîtes secondaires existent en Bohême, en Grèce et même en France (Bretagne, zone méditerranéenne). A l'heure actuelle, excepté le site russe de Lovozero, aucune mine d'extraction de terres rares n'est active sur le Vieux Continent. Alors que l'Europe importe plus de 90% de ses terres rares depuis la Chine, une prise de conscience a émergé visant à sécuriser les approvisionnements.

Depuis la fin de l'époque soviétique, la **fédération de Russie** a fait des terres rares un produit d'exportation, au même titre que de nombreux métaux (platinoïdes, nickel, cuivre, vanadium, etc.) s'assurant ainsi d'une rente, comme dans le cas du gaz ou du pétrole. Concernant les terres rares, [Rostec](#), société d'État russe fondée en 2007, est à la tête d'un conglomérat actif dans le développement, la production et l'exportation de produits industriels de haute technicité destinés aux secteurs civil et militaire. Elle rassemble environ 700 entités constituant 14 sociétés dont 11 sont dans le domaine de l'industrie de la défense. Les réserves russes sont considérables (environ 20% du total mondial) et classe la Russie au 3^{ème} ou 4^{ème} rang derrière la Chine et le Brésil, selon l'évaluation des réserves du Danemark avec le Groënland. La Russie fournit 25 % des terres rares consommées en Europe.

Aux Etats-Unis, selon les propos rapportés par [La Tribune](#) du 15 janvier 2022, deux sénateurs américains veulent réduire la dépendance du pays à l'égard de la Chine en ce qui concerne les terres rares, en déposant un projet de loi au Sénat, recommandant, notamment, la création d'une réserve stratégique de terres rares d'ici à 2025. Diverses mesures ont déjà été adoptées pour renforcer cette indépendance stratégique du pays vis-à-vis de la Chine comme la réouverture, en 2017, de la seule mine américaine spécialisée dans l'extraction de terres rares, un temps fermée et de nouveau active : Mountain Pass, en Californie, qui fournit 15% de la production mondiale. En 2018, un décret présidentiel a été rédigé pour renforcer les capacités d'extraction et de raffinage de minéraux sur le sol national, de même en 2020 un autre décret relatif aux minerais rares d'urgence nationale et à la construction de mines américaines par le Département de la Défense a été adopté. En 2021, dans le plan d'investissement, sont prévus 140 M\$ de subventions programmées pour créer un démonstrateur aux Etats-Unis d'usine de séparation des terres rares.

L'Institut d'études géologiques des États-Unis (*United States Geological Survey, USGS*) en association avec Geoscience Australia et la Commission géologique du Canada, a formé la *Critical Minerals Mapping Initiative (CMMI)* en 2019 afin de combiner l'expertise et les recherches sur les ressources minérales critiques. L'objectif est de développer la construction d'usines de minage et de raffinage et de diversifier l'approvisionnement du pays en s'appuyant sur les pays alliés plutôt que sur la Chine. Mais le coût écologique de l'extraction et du raffinage des minerais stratégiques doit être considéré dans cette approche.



Ne disposant pas de ressources minières terrestres exploitables, le **Japon**, second consommateur mondial de terres rares, a développé une politique stratégique à grande échelle nommée *Genso Senryaku (Project of Strategic Advanced Materials ou Projet de Matériaux Stratégiques Avancés)* pour sécuriser l'approvisionnement de son industrie en terres rares et matières premières stratégiques. En effet, le Japon a mis en œuvre, depuis de très nombreuses années, des systèmes d'intelligence économique et stratégique performants afin de transformer les données environnementales et économiques en connaissance efficace, opérationnelle et sécurisée en prenant soin de détecter les menaces et d'en exploiter les vulnérabilités en vue d'agir à bon escient.

Des programmes interministériels de promotion de l'innovation stratégique ont ainsi vu le jour. Ils concernaient, entre autres, l'exploitation des ressources minérales marines de prochaine génération (dépôts hydrothermaux, encroûtements de cobalt et les terres rares) y compris la sécurisation des ressources minérales, la recherche et le développement de technologies de recyclage des métaux critiques à partir de produits en fin de vie et de procédés industriels, etc.

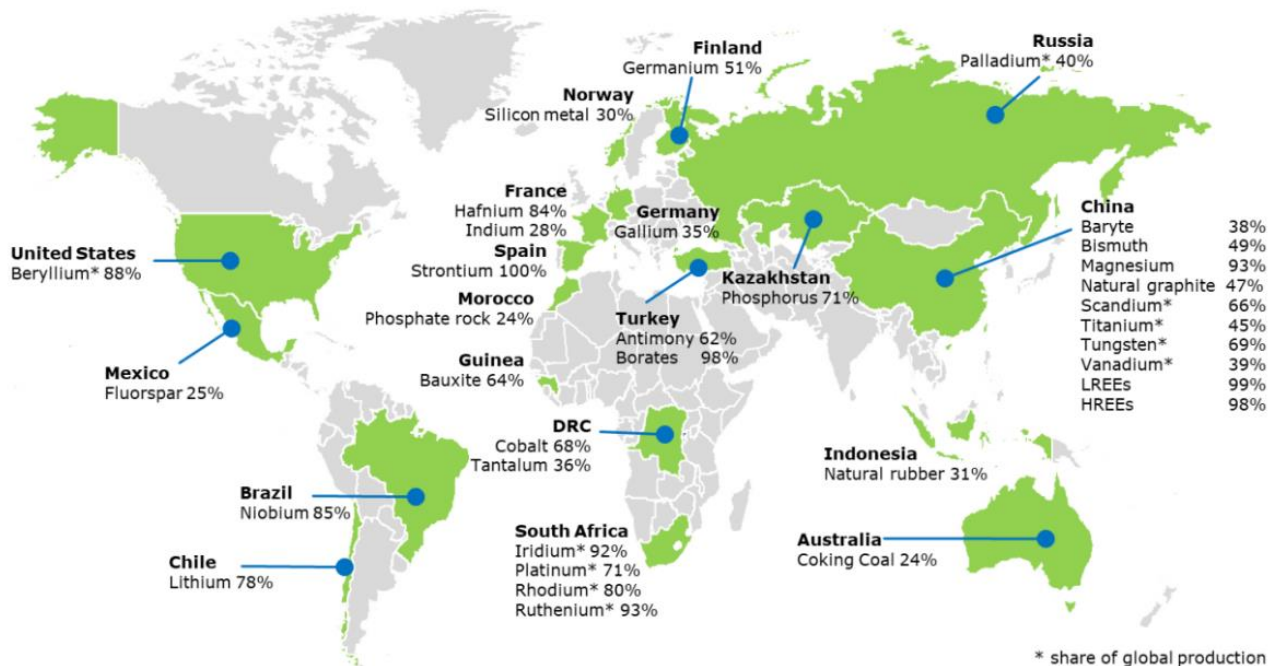
La *Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)* en tant qu'institution administrative indépendante du gouvernement japonais, a pour mission d'assurer un approvisionnement stable en pétrole, gaz naturel, métaux non-ferreux et ressources minérales. Son rôle est aussi de veiller à la constitution de stocks nationaux de trente éléments identifiés comme stratégiques en fonction des besoins du pays et des stratégies et besoins des États-Unis et de l'Union Européenne.

Le Japon s'est aussi engagé dans la prospection sous-marine, pour devenir le premier fournisseur mondial de terres rares car il affirme avoir découvert une importante réserve de minéraux au large de l'île de Minamitori : près de 16 millions de tonnes de terres rares (yttrium, dysprosium, europium, etc.), soit plusieurs centaines d'années de production, selon [Business Insider](#). Les minéraux ont été découverts dans des carottes de 10 mètres de profondeur prélevées dans les sédiments du fond marin.

[Sources : [Recherche et développement au Japon au service de l'autosuffisance en terres rares](#), D. Lecellier, S. de Bentzmann, Ambassade de France au Japon, Service pour la Science et la Technologie, avril 2019 ; [Les enjeux de la recherche et l'intelligence économique et stratégique](#), J.-P. Damiano, Techniques de l'Ingénieur, Octobre 2019].

Au sujet de l'Union européenne, entre 75 et 100 % de la plupart des métaux que les écosystèmes industriels d'importance stratégique utilisent, proviennent de pays non-membres de l'UE (Chine, Brésil, Pays africains, Asie centrale, etc.). La Chine fournit 98 % de notre approvisionnement en terres rares. L'UE ne représente qu'un peu moins de 5 % de la production mondiale de matières premières minérales.

Les matières premières pas ou peu produites en UE servent pourtant à fabriquer des produits consommés par les européens : la Chine pour le silicium, le lithium et les terres rares. Mais aussi d'autres pays producteurs, comme le Chili pour le lithium, la RDC pour le cobalt, etc. exportent ces matières premières vers les pays de l'UE. La dépendance de l'UE et de la France aux matières critiques et aux terres rares plus particulièrement est inquiétante. Avec les meilleures prévisions et initiatives européennes dans ce domaine, on ne peut espérer que l'UE soit en capacité de produire plus de 30% des besoins européens, d'ici 2030. Le risque de pénurie semble bien réel.



Les principaux pays fournisseurs de matières premières critiques* à l'UE
 Source : [Rapport de la Commission européenne sur l'évaluation de la criticité en 2020](#)

Selon l'étude prospective de la Commission européenne et l'avis du Comité économique et social européen (CESE) sur la résilience des matières premières critiques, l'UE représente moins de 5 % de la production mondiale de matières premières minérales. La Chine fournit à elle seule 66 % des batteries au lithium finies, alors que l'UE en fournit moins de 1 %. Un autre exemple est celui des piles à combustible : l'UE en produit moins de 1 %.

Les batteries sont un élément stratégique de la transition propre et numérique de l'Europe ainsi qu'une technologie habilitante indispensable à la compétitivité du secteur automobile, à la mobilité à faibles émissions, au stockage de l'énergie et à la stratégie économique de l'Europe. L'Union européenne (UE) cherche à rattraper le Japon, la Chine, la Corée du Sud et les États-Unis sur la fabrication de batteries pour véhicules électriques (VE) et autres dispositifs.

Mais le positionnement de l'Europe devrait changer avec la mise en service par le groupe suédois de batteries électriques [Northvolt](#) de sa giga-usine de batteries *Northvolt Ett* en Suède.

Pour rappel, ci-après, un petit mémo sur ce thème : *Extrait [Source : [Stockage d'énergie électrique : un regard sur les enjeux et les défis technologiques](#), J.-P. Damiano, IESF, 2022]*

Dès 2017, la Commission européenne, avec les pays de l'UE, l'industrie et la communauté scientifique, a lancé l'alliance européenne pour les batteries ([EBA](#)) dans la production et l'utilisation durables des batteries. Il s'agissait de créer une filière européenne autonome de production de batteries. Des constructeurs connus comme Fiat Chrysler Automobiles, BMW, Rimac Automobili et Tesla en font partie. De très nombreuses collaborations ont été initiées entre des acteurs privés, des universités et des organismes publics.

Au côté du projet d'« Airbus des batteries », (décembre 2019), pour la construction d'une filière de production de batteries sur le modèle du géant aéronautique Airbus, un second projet a été lancé en janvier 2021 : "Innovation européenne dans la batterie" ([European Battery Innovation](#)). Le premier a levé 3,2 milliards d'euros (3,2 Md€) d'argent public (7 États concernés dont l'Allemagne et la France) pour un consortium de 17 entreprises. Le second porte sur l'ensemble de la chaîne des batteries : versement d'une aide publique de 2,9 Md€ par 12 États-membres : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, la Croatie, l'Espagne, la Finlande, la France, la Grèce, l'Italie, la Pologne, la Slovaquie et la Suède. Cela devrait permettre de mobiliser 9 Md€ supplémentaires en investissements privés. En deux ans seulement, [l'Europe](#) est devenue la première place mondiale en termes d'investissements dans les batteries.

En juin 2021, la Commission européenne et l'Association de Partenariats Européens pour les Batteries ([BEPA](#)) ont signé un protocole d'accord de recherche et développement (partenariat public-privé) à travers le programme [BATT4EU](#) afin d'accroître la compétitivité européenne sur la production de batteries lithium-ion. Le projet, dans le cadre d'[Horizon Europe](#) (programme-cadre de recherche et d'innovation de l'UE), a pour objectif de réduire le prix des batteries destinées aux transports de 60% et d'augmenter leur capacité également de 60%, avec une commercialisation pour 2030 et une mobilisation de 925 millions d'euros (M€).

BATT4EU s'inscrit dans le [Pacte vert pour l'Europe](#) qui est un ensemble d'initiatives politiques pour lutter contre le changement climatique et faire de l'Europe, le premier continent neutre en émissions de CO₂ d'ici à 2050. D'autant que l'extraction du lithium et du cobalt nécessaires à la production de batteries demeure polluante : [Reporterre](#) met en exergue les 200 millions de litres d'eau quotidien utilisés sur le site d'Atacama au Chili. *Il s'agit de chercher de nouvelles techniques d'extraction de matières premières et leur transformation en matériaux avancés, la production de cellules et de systèmes de batteries mais aussi leur recyclage et leur durabilité.*

L'Airbus des batteries et BATT4EU font partie des projets importants d'intérêt européen commun (PIIEC) dont le but est de stimuler l'innovation et de positionner l'UE sur des secteurs d'avenir stratégiques comme celui des batteries Li-ion. Toutes ces initiatives permettront à l'UE de réduire sa dépendance vis-à-vis des pays asiatiques en situation de quasi-monopole de batteries Li-ion pour l'industrie automobile ou de la société américaine Tesla. L'UE envisage d'atteindre 25 % du marché mondial des batteries d'ici 2030, en ouvrant de nombreuses gigas-usines de production.

Le groupe suédois de batteries électriques [Northvolt](#) a annoncé, le 29 décembre 2021, avoir lancé la production de sa giga-usine de batteries *Northvolt Ett*. Northvolt a été fondé, il y a cinq ans par des anciens de Tesla, le suédois Peter Carlsson et l'italien Paolo Cerruti.

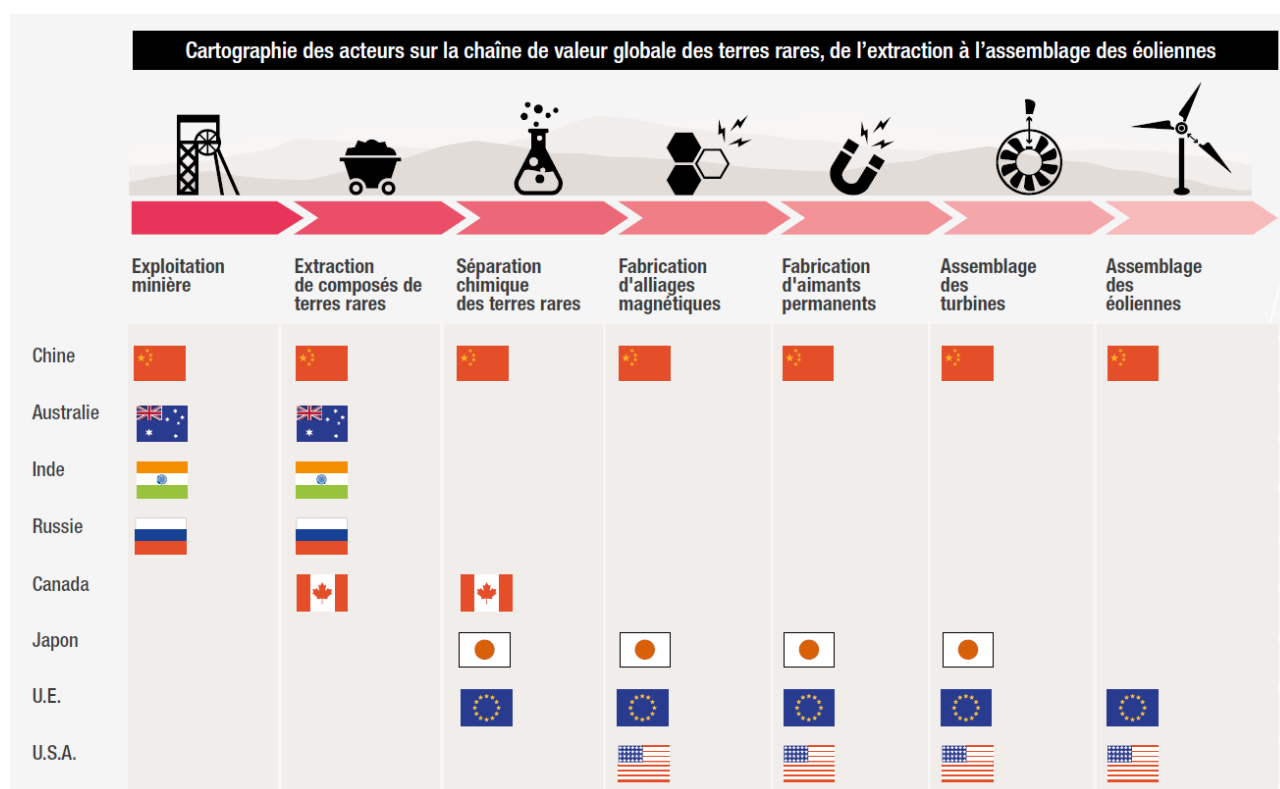


Usine de Northvolt, établie à Skellefteå, haut lieu suédois de l'industrie durable à faible impact climatique

Fabricant de cellules de batteries à la base, il propose des cellules Li-ion haute performance basées sur la chimie propriétaire Lingonberry NMC, des composants modulaires et des systèmes complets de batteries évolutifs. L'usine est située à [Skellefteå](#), une petite ville industrielle de la principale zone minière du Nord de la Suède. Elle emploie 500 salariés et devrait atteindre les 3000 à pleine capacité. Elle est dimensionnée pour équiper annuellement en batteries un million de véhicules électriques. Sa capacité de production serait de 60 gigawattheures (GWh) / an.

Northvolt a reçu des commandes de plusieurs constructeurs pour un montant de 30 Md\$: [BMW](#), [Fluence](#), [Scania](#), [Volkswagen AG](#), [Volvo Cars](#) et [Polestar](#) (filiale du groupe Geely et de Volvo Cars). Il vise au moins 20 à 25% du marché européen d'ici 2030, et rivaliserait ainsi avec des groupes tels que l'américain Tesla qui doit lancer sous peu sa première usine en Europe ou les producteurs asiatiques de batteries [Panasonic](#), [LG Chem](#), [CATL](#) ou [BYD Company](#). L'Europe ambitionne 25% du marché en 2030, avec plusieurs autres ouvertures d'usine. [Source, [Le Figaro](#), 29 déc. 2021].

Dans le cas du domaine éolien, selon les analyses du cabinet de conseil et d'analyse, [PwC](#), la maîtrise de la chaîne de valeur, depuis l'exploitation minière, jusqu'à la fabrication des aimants permanents suivie de l'assemblage des turbines et donc des éoliennes, était encore récemment assurée par la Chine qui possède les outils industriels nécessaires. L'UE doit être présente sur les deux premiers postes pour se positionner sur la scène internationale.



[Tendances de la transition énergétique, Les terres rares, le cas de la production des éoliennes](#)
[PwC](#), mars 2019, n°6

La sécurisation des approvisionnements en matières premières métalliques ne peut s'opérer au seul niveau national ; elle doit être réalisée au niveau européen à travers de nombreuses actions et initiatives. De manière plus générale, la sécurité énergétique est plus que jamais au cœur des enjeux géopolitiques, stratégiques, financiers, environnementaux et sociétaux - depuis l'inventaire des gisements, l'extraction du minerai ou plutôt des minerais de terres rares nécessitant des techniques de traitement bien adaptées, jusqu'à la transformation en produits de haute valeur ajoutée.

En septembre 2020, la Commission européenne a présenté un [plan d'action](#) sur les matières premières critiques :

- Développer des chaînes de valeur résilientes pour les écosystèmes industriels de l'UE ;
- Réduire la dépendance vis-à-vis des matières premières critiques primaires grâce à l'utilisation circulaire des ressources, des produits durables et de l'innovation ;
- Renforcer l'approvisionnement domestique de matières premières dans l'UE ;
- Diversifier l'approvisionnement auprès des pays tiers et éliminer les distorsions du commerce international, en respectant pleinement les obligations internationales de l'UE.

Ci-après, sont listés des engagements que la Commission européenne devra réaliser à plus ou moins long terme renforçant la résilience et l'autonomie stratégique ouverte de l'Europe :

- Établir une alliance européenne des matières premières : *The European Raw Materials Alliance (ERMA) a été créée dès septembre 2020 avec comme objectif la diversification des chaînes d'approvisionnement, la création d'emplois, l'attraction d'investissements, l'encouragement à l'innovation, la formation de jeunes talents, le soutien à l'économie circulaire ;*
- Élaborer des critères de financement durable pour les secteurs minier, extractif et de la transformation ;
- Lancer la recherche et l'innovation sur les matières premières essentielles, sur le traitement des déchets, les matériaux avancés et la substitution ;
- Cartographier l'approvisionnement potentiel de matières premières critiques secondaires à partir des stocks et des déchets de l'UE et identifier les projets de valorisation viables d'ici 2022 ;
- Identifier les projets d'extraction et de transformation dans l'UE qui peuvent être opérationnels d'ici 2025 ;
- Développer l'expertise et les compétences dans les technologies d'exploitation minière, d'extraction et de traitement dans les régions en transition ;
- Utiliser le programme d'observation de la Terre [Copernicus](#) pour améliorer l'exploration des ressources, les opérations et la gestion de l'environnement, etc. ;
- Utiliser le programme d'observation de la Terre [Copernicus](#) de l'UE pour améliorer l'exploration des ressources, les opérations, la gestion de l'environnement, etc. : *un des enjeux de Copernicus est la réutilisation des données par les entreprises, les scientifiques et les entités publiques, à l'image des Etats. La société [ACRI-ST](#) du groupe ACRI, à Sophia-Antipolis, est partie prenante de cette opération. Le groupe ACRI implante un [centre de recherche spatiale à vocation internationale](#) sur le plateau de Roquevignon (Grasse, ancien site du CERGA). Il pourra développer ses activités dans le traitement, la distribution et l'archivage des données issues de l'observation spatiale par les satellites (geodata) ;*
- Développer des projets de recherche et d'innovation Horizon Europe sur les processus d'exploitation et de traitement des matières premières critiques ;
- Développer des partenariats internationaux stratégiques et les financements associés pour garantir un approvisionnement diversifié et durable en matières premières essentielles ;
- Promouvoir des pratiques minières responsables pour les matières premières critiques grâce au cadre réglementaire de l'UE et à la coopération internationale.

Dans le cadre des initiatives de l'UE, les projets importants d'intérêt européen commun ([PIIEC](#)), déjà initiés en 2014, ont eu leurs [règles](#) modifiées récemment. Leur mécanisme vise à promouvoir l'innovation dans des domaines industriels stratégiques et d'avenir, au travers de projets européens transfrontières de rupture en matière d'innovation et d'infrastructure. Les pouvoirs publics des États membres peuvent financer des initiatives au-delà des limites de la réglementation européenne.

Actuellement, plusieurs PIIEC sont en cours de réalisation, de finalisation ou en préparation.

- Le PIIEC relatif au [domaine de la microélectronique](#) (2018) s'intègre au [plan français Nano 2022](#) pour la production de nouvelles générations de composants électroniques - automobile, communications 5G, objets connectés, intelligence artificielle embarquée, aérospatial et sécurité.
- Un premier PIIEC sur les [batteries électriques](#) (décembre 2019) est initié pour soutenir le développement de technologies hautement innovantes et durables pour les batteries Li-ion (à électrolyte liquide et à semi-conducteurs). Il couvre l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries et les domaines de recherche : les matières premières et les matériaux avancés, les cellules et les modules, les systèmes de batteries et enfin la réaffectation, le recyclage et le raffinage. Il permettra ainsi à la [coentreprise créée par Saft, PSA et Opel](#) de produire, d'ici fin 2023, à Douvrin des cellules et modules de batteries automobiles.
- Le deuxième PIIEC sur les batteries, [European Battery Innovation](#), élaboré et notifié par 12 Etats européens, a été approuvé en [janvier 2021](#) par la Commission européenne. Il couvre l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries, contribuant au développement d'innovations technologiques, y compris des formulations chimiques différentes pour les batteries et des processus de production nouveaux, ainsi que d'autres dans la chaîne de valeur des batteries, en allant plus loin que le premier PIIEC de 2019.
- Dans le cadre du PIIEC sur [l'hydrogène](#), développé avec 23 États membres de l'UE et la Norvège, la [carte](#) des quinze projets français sélectionnés vient d'être publiée : déploiement de *gigafactories* autour de la mobilité lourde (trains, piles à combustible, réservoirs, matériaux...) et production d'hydrogène à grande échelle pour décarboner l'industrie notamment. L'opération compte plus de 120 projets dont 15 français pour construire des usines d'électrolyse et financer la décarbonation de certaines industries.
- Le PIIEC sur [la santé](#) est demandé par 16 Etats européens par un manifeste en date du 3 mars 2022 afin de soutenir l'innovation, d'améliorer la qualité et l'accès aux soins des patients européens.

Parmi les nouvelles propositions, on peut citer :

- Un PIIEC sur le cloud pour répondre aux besoins de services du *Cloud à l'Edge* (analyse des données au plus près de l'objet connecté) et avoir un stockage de données véritablement souverain. Cela permettra de financer plus de 60 projets, avec 180 entreprises européennes participantes. La part de marché des acteurs européens ne fait que baisser depuis plusieurs années. AWS, Microsoft Azure et Google contrôlent ainsi 69% du *cloud computing* de l'UE et le numéro un européen, Deutsche Telecom, doit se contenter de 2%.
- Dans l'objectif de diversifier l'approvisionnement des industriels européens, [ERMA](#) a identifié 14 projets d'extraction ou de recyclage des terres rares en Europe (1,7Md€ d'investissement estimés). Elle recommande fortement et soutient la mise en place d'un PIIEC pour les aimants permanents, pour lequel des Etats sont déjà intéressés. Cela permettrait d'assurer 20 % de la demande européenne en 2030.

Parmi ces projets, est présente une jeune société lyonnaise, [Carester](#), qui développe des procédés innovants pour le traitement des terres rares. Elle réunit un savoir-faire unique au monde sur des problématiques pointues. Son fondateur, Frédéric Carencotte, ingénieur chimiste, diplômé de l'Institut de Chimie et Physique Industrielles de Lyon, possède vingt-deux ans d'expériences au sein de Rhône Poulenc / Solvay. Son positionnement est le bienvenu suite à la fermeture, en 2016, de l'usine de Solvay à la Rochelle qui était la seule unité européenne de recyclage de terres rares.

[Sources : [Transformation numérique](#), inCyber, 11 février 202 ; [Les Echos](#), 13 janvier 2022 ; [L'Usine Nouvelle](#), 1^{er} octobre 2021 ; [IndustriAll](#) 129/2021, 10 juin 2021 ; [Flottes Automobiles](#), 9 décembre 2019 ; [Solvay renonce au recyclage des terres rares](#), Myrtille Delamarche, Usine Nouvelle, 26 janvier 2016].

La Commission européenne a adopté une série de propositions visant à adapter les politiques de l'UE en matière de climat, d'énergie, de transport et de fiscalité en vue de réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre d'au moins 55 % d'ici à 2030 par rapport aux niveaux de 1990 ([Pacte vert pour l'Europe](#)) : le [Fit for 55](#). L'objectif est de faire de l'Europe le premier continent au monde à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. Dans le cadre de cette transition écologique, tous les pays doivent faire face à d'importants investissements, mais aussi au risque de dépendre cette fois-ci des minerais ou métaux stratégiques indispensables à la neutralité carbone souvent importés, de Chine. [Source : [La mise en œuvre du Pacte vert européen à l'horizon 2050 : ambitions et contraintes](#), Jacques Percebois, Vie publique, 19 janvier 2022].

En décembre 2021, comme pour répondre aux initiatives chinoises des routes de la soie, la Commission européenne et le haut représentant de l'UE pour les affaires étrangères et la politique de sécurité lancent la nouvelle stratégie européenne, [Global Gateway](#), visant à développer des liens intelligents, propres et sûrs dans les domaines du numérique, de l'énergie et des transports et à renforcer les systèmes de santé, d'éducation et de recherche dans le monde entier. Cette opération vise à mobiliser 300 Md€ entre 2021 et 2027, issus à la fois des fonds européens, des États membres et de fonds privés, dans des secteurs clés de l'économie. Cinq secteurs principaux ont été ciblés par l'Europe : le numérique, le climat et l'énergie, les transports, la santé, l'éducation et la recherche.

Le plan Global Gateway inscrit sa stratégie dans la continuité des objectifs de développement durables et de l'Accord de Paris. La présidente de la Commission européenne, Ursula von der Leyen, déclarait : « *Nous soutiendrons les investissements intelligents dans des infrastructures de qualité, qui respectent les normes sociales et environnementales les plus élevées, conformément aux valeurs et aux normes de l'UE. La stratégie « Global Gateway » offre un modèle de la manière dont l'Europe peut établir des liens plus résilients avec le monde.* »

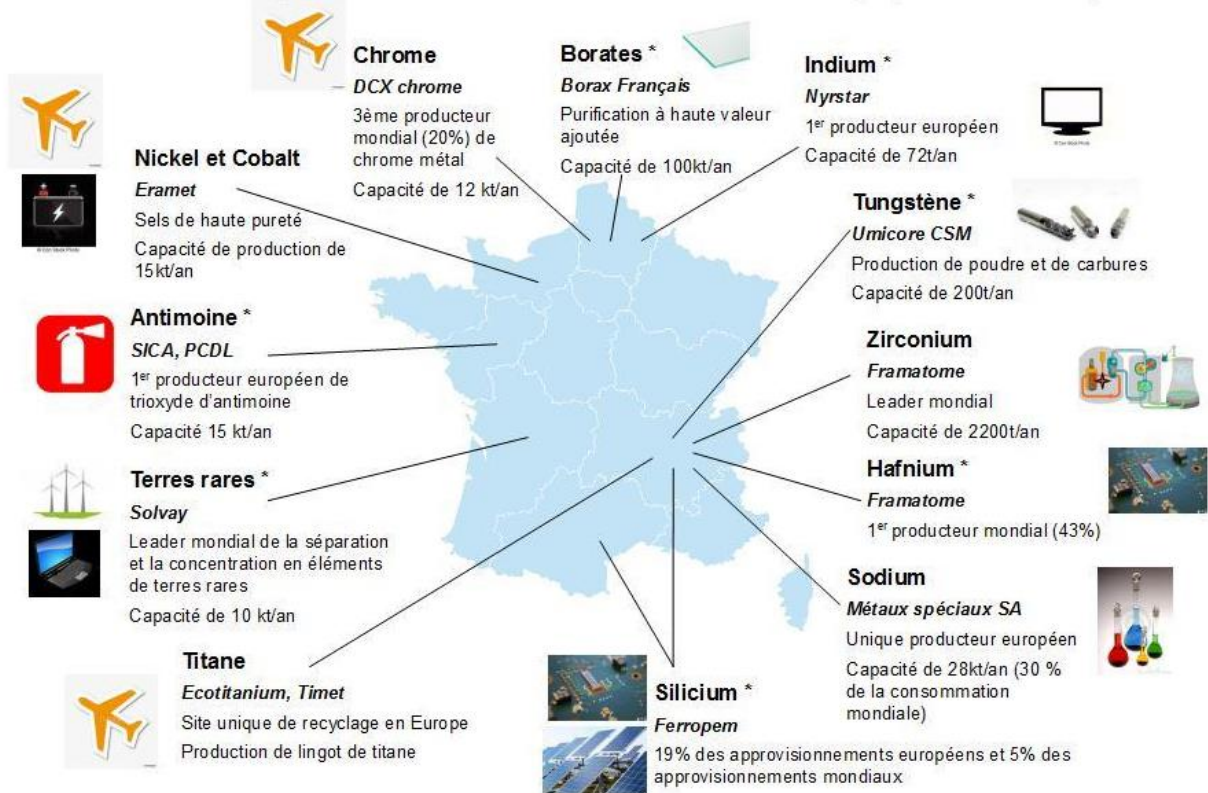
Cependant, cette stratégie s'inscrit dans le cadre de l'initiative internationale pilotée par les États-Unis, [Build Back Better World](#), initiée en juin 2021, regroupant tous les pays du G7 (Allemagne, Canada, États-Unis, France, Italie, Japon et Royaume-Uni). Son objectif est de combler le retard d'investissement dans les infrastructures des pays émergents : une estimation de près de 40 000 Md\$.

En **France**, le 10 janvier 2022, Barbara Pompili, ministre de la Transition écologique, et Agnès Pannier-Runacher, ministre déléguée chargée de l'Industrie, ont reçu [le rapport sur la sécurisation de l'approvisionnement de l'industrie en matière premières minérales](#), confié en septembre 2021 à Philippe Varin, ancien président de France Industrie et du groupe PSA. M. Varin s'est appuyé sur les contributions des comités stratégiques de filières [Automobile](#), [Nouveaux systèmes énergétiques](#) et [Mines et Métallurgie](#), ainsi que des responsables d'institutions scientifiques ([BRGM](#), [CNRS](#), [CEA](#)) et de nombreuses personnalités qualifiées. Le rapport a ciblé, dans un premier temps, les métaux des batteries (nickel, cobalt, lithium, graphite) et les aimants permanents (terres rares), avec trois objectifs : l'évaluation avec les industriels, du niveau de sécurité des approvisionnements en métaux, l'expression de leurs besoins et la proposition d'une organisation du travail des acteurs privés et publics pour améliorer la résilience aux métaux critiques des chaînes de production.

Parmi les actions retenues par le Gouvernement à la suite de la remise du rapport Varin, il a été décidé de créer auprès du Bureau de recherches géologiques et minières ([BRGM](#)), l'un des plus grands acteurs mondiaux dans la connaissance et la maîtrise du sous-sol, un observatoire des métaux critiques. Constitué en lien étroit avec le [Comité stratégique de la Filière \(CSF\) Mines et Métallurgies](#), ses objectifs sont de rassembler les compétences et les moyens des industriels et des administrations et permettre de fournir aux pouvoirs publics et aux industriels français une veille stratégique de haut niveau sur l'ensemble des chaînes de valeur minérales afin d'anticiper les filières futures d'approvisionnement et de renforcer ainsi la résilience des filières industrielles françaises. *Ce CSF rassemble les acteurs de l'extraction, de la production, de la transformation et du recyclage des métaux autour des organisations professionnelles [A3M](#), [Aluminium France](#), [Fédération Forge Fonderie](#) et de l'Union des industries et métiers de la métallurgie ([UIMM La fabrique de l'Avenir](#)).*

Le gouvernement français a lancé le plan d'investissement [France 2030](#) doté de 30 Md€ déployés sur 5 ans dont 8 Md€ pour le secteur de l'énergie, 4 Md€ pour les transports du futur, 2 Md€ pour une nouvelle révolution de l'alimentation saine, durable et traçable, 3 Md€ pour le secteur de la santé, 2 Md€ pour l'espace et les fonds marins, le domaine culturel, etc. Ce plan doit permettre au pays de réaliser sa transition énergétique et numérique, en restant compétitif sur le plan industriel. Il s'ajoute aux précédents plans et cible des secteurs industriels pour leur rôle central dans les transitions à venir.

Production primaire et secondaire de métaux stratégiques en Métropole



Métaux précieux (or, argent, palladium), de base (acier, zinc, aluminium, plomb), ferroalliages et autres métaux (lithium, vanadium, cadmium...)

* : métaux critiques pour l'Europe (2017)

comes minéralinfo
Comité pour le métal stratégique

Ce plan reprend ainsi des recommandations du rapport Varin, compte tenu de l'excellence des universités françaises, des écoles d'ingénieurs et la force de leurs liens avec les organismes nationaux de recherche, des capacités industrielles certaines (savoir-faire et infrastructures) :

- Création d'un fonds d'investissement public/privé dans les métaux stratégiques avec pour objectif de sécuriser l'approvisionnement des usines de productions de batteries, environ 1Md€ (Douai, Douvrin et une dans le sud-est).
- Développement de deux plateformes industrielles, l'une à Dunkerque pour regrouper les acteurs de la filière batteries électriques, l'autre à Lacq pour celle des aimants permanents, le raffinage, la fabrication des précurseurs des batteries (cathodes, anodes), la formation, le recyclage, etc.
- Mise en synergie des industriels et des scientifiques pour contribuer efficacement à innover, avec l'aide du Bureau de recherche géologique et minières (BRGM), du CNRS ou du CEA.

Le BRGM, dans le cadre de sa contribution au rapport [CyclOpe 2021](#), a publié son expertise sur l'évolution des marchés de 27 « petits métaux » en 2020. Cette contribution confirme cette dépendance européenne sur ces marchés.

Les défis pour la France sont évidemment de sécuriser les chaînes d'approvisionnement des métaux stratégiques, d'être en capacité de maîtriser les chaînes de valeur par diverses initiatives (la prise de parts dans des mines, la création de stocks stratégiques, le développement du recyclage et celui des produits de substitution, une relocalisation des industries de la transformation, etc.).

Actualités / informations d'intérêt

- La Compagnie des Métaux Rares ([CDMR](#)), société financière basée à Genève, créée en 2014, est spécialisée dans le conseil et l'investissement en métaux rares. Elle conseille le [Fonds Métaux Rares](#) qui est le seul fonds au monde à être entièrement investi en métaux rares physiques. Il bénéficie d'une gestion active et comporte un portefeuille de 10 à 30 métaux rares. Les métaux sont assurés et stockés de manière sécurisée dans des entrepôts spécialisés aux Pays-Bas.
- Centre d'expertise de réputation mondiale dans le domaine des matériaux et des géosciences, la ville de Nancy a vu se concrétiser un accord entre la CDMR et l'École nationale supérieure des mines de Nancy ([Mines Nancy](#)). Les objectifs sont d'accroître la compréhension mutuelle des problématiques liées aux métaux rares, de croiser la connaissance du marché des métaux rares et de ses enjeux avec les compétences scientifiques de l'École et d'augmenter la pertinence de la formation offerte aux étudiants. Récemment a eu lieu une journée de formation et d'échanges « [Métaux stratégiques : au cœur des enjeux du 21^{ème} siècle](#) » à Nancy, le 29 mars 2022.
- Le Laboratoire d'Excellence Ressources21 ([LabEx R21](#)), financé dans le cadre du programme national français "Investissements d'Avenir" ([PIA](#)) est un projet stratégique pour la France. Il a été créé en 2011 et renouvelé pour la période 2019-2024 avec un budget global d'environ 13 M€. Il encourage les approches structurantes autour du cycle de vie des métaux stratégiques, de la géométallurgie, du développement d'outils portables d'exploration et d'analyse et de l'intégration sociale, économique et territoriale du projet minier. La conservation de la biodiversité, la surveillance et la remédiation de l'environnement sont intégrées afin de favoriser l'émergence de nouvelles stratégies minières. Les projets globaux du LabEx R21 visent à mieux comprendre le cycle géochimique des terres rares, du nickel, du lithium et de l'or avec un focus particulier sur la Guyane, département français d'outre-mer où la prospection aurifère rencontre notre expertise transversale. Le LabEx s'est entouré d'une équipe de chercheurs pluridisciplinaires issus du pôle scientifique de l'Observatoire Terre et Environnement Lorraine ([OTELo](#)) qui comprend quatre laboratoires : le [LIEC](#), [GeoRessources](#), le [LSE](#) et le [CRPG](#).
- L'Institut des sciences chimiques de Rennes ([ISCR](#)) et la société [Olnica](#) ont créé le laboratoire commun [ChemInTag](#) (*Chemical inorganic taggants*) pour développer des solutions de traçabilité basées sur des marqueurs luminescents de nouvelle génération, constitués de polymères de coordination à base de terres rares, qui ont des propriétés de luminescence intenses et modulables pour lutter contre la fraude et la contrefaçon avec une authenticité garantie et la protection de la propriété intellectuelle sur l'ensemble des produits concernés partout dans le monde. Ces solutions présentent également un très grand intérêt dans le domaine du recyclage des matériaux. Le marqueur proposé est luminescent, c'est-à-dire un marqueur qui émet de la lumière visible en réponse à certains stimuli, par exemple une irradiation aux rayons ultraviolets. Ainsi ce traceur élaboré à base de terres rares, permet un encodage plus fiable et à plus gros volume, soit 1,3 milliard de signatures uniques, toutes impossibles à copier. Il est aussi distinctif que l'ADN mais beaucoup plus robuste, résiste à la lumière, aux fortes températures et autres conditions extrêmes et reste stable dans le temps. [Sources : [Des marqueurs luminescents pour lutter contre la contrefaçon et mieux recycler les matériaux](#), The Conversation, 24 février 2022 ; [Le GhostPrint System d'Olnica révolutionne le marquage industriel invisible pour une traçabilité inviolable des produits](#), [Entreprendre.fr](#), 28 mai 2021].

Ainsi donc, au niveau de l'UE et de la France évidemment, l'enjeu de réduction de la dépendance vis-à-vis des pays producteurs et celui du développement de l'accès aux matières premières critiques sur le sol européen, devront être tenus pour éviter les pénuries d'approvisionnement. Il s'agit de favoriser l'extraction et la transformation de ces matières premières dans les pays de l'UE tout en respectant l'environnement et les conditions sociales. Cela s'accompagne aussi du recyclage des matières premières en Europe pour éviter leur fuite faute de rentabilité économique immédiate.

Il s'agira aussi de développer la recherche de produits de substitution, afin de privilégier les métaux abondants ou de limiter le recours à des métaux non essentiels. Les efforts devront cibler aussi le développement de solutions alternatives (en diminuant ou supprimant l'apport de terres rares, dysprosium ou néodyme, etc. dans les aimants permanents, pour ne citer que cet exemple) adaptables aux besoins et durables garantissant ainsi la sauvegarde de l'environnement et la retombée des revenus issus des extractions minières en direction des populations des pays producteurs.

Dans ce contexte, tout projet minier devrait donc faire appel aux techniques de géoméallurgie combinant la géologie, les géostatistiques et la métallurgie extractive afin de tenir compte des ressources minérales, du procédé d'extraction, des enjeux sociétaux, environnementaux et économiques tout en minimisant les risques techniques.

Sources :

- [Terres rares : L'Afrique, terrain d'une guerre d'influence entre l'Europe et la Chine](#), Novethic, 18 février 2022 ;
- [Les insuffisances européennes et françaises face à l'approvisionnement en minerais stratégiques](#), Pierre-Marie Durier, Portail-IE, 8 février 2022 ;
- [Le monopole de la Chine sur les terres rares s'amenuise](#), Tristan Gaudiaut, Statista, 8 février 2022 ;
- [L'essentiel sur ... Les matières premières critiques](#), CEA, 2 février 2022 ;
- [FRANCE 2030 pousse l'industrie vers le futur](#), Livre blanc, Techniques de l'ingénieur, janvier 2022 ;
- [Stockage d'énergie électrique : un regard sur les enjeux et les défis technologiques](#), IESF Côte d'Azur, Bull. n°1, p.10-22 (2022) ;
- [Ressources en terres rares de l'Europe et du Groënland : un potentiel minier remarquable mais tabou ?](#) Nicolas Charles, Johann Tuduri, Gaetan Lefebvre, Olivier Pourret, Fabrice Gaillard, Kathryn Goodeneough, *In* : Boulvais P. & Decrée S. (Eds), Ressources métalliques : cadre géodynamique et exemples remarquables. ISTE Science Publishing Ltd-Wiley, 2021 ;
- [L'énergie racontée à travers quelques destins tragiques](#), Jacques Percebois, Éditions Campus Ouvert, 2^{ème} édition, septembre 2021 ;
- [La Géopolitique des Terres rares](#), Christopher Coonen, Geopragma, 12 juillet 2021 ;
- [L'autonomie stratégique européenne concerne aussi les matières premières critiques. Quel bilan dix ans après la crise des Terres Rares ?](#) Maxime Berri, Diploweb.com, La revue géopolitique, 10 juillet 2021 ;
- [Terres rares contre semi-conducteurs : une course de fond technologique aux enjeux géopolitiques](#), Anne Kraatz, Senior Fellow de l'Institut Open Diplomacy, 2 juillet 2021 ;
- [Garantir un approvisionnement durable en matières premières en Europe](#), Bruxelles, 10 juin 2021, IndustriAll 129/2021 ;
- [Résilience des matières premières critiques : la voie à suivre pour un renforcement de la sécurité et de la durabilité](#), 24 mars 2021, Réf. CCMI/177-EESC-2020 ;
- [Les terres rares et autres matériaux critiques et stratégiques, au cœur des conflits de demain ?](#) Jean-François Guilhaudis, Jacques Fontanel, Paix et sécurité européenne et internationale, université Côte d'Azur 2021 ;
- Rapport CycloPe : extraits sur le portail français des ressources minérales non énergétiques ([Mineralinfo.fr](#)), chap. « [Métaux Electriques](#) » et « [Petits Métaux](#) ». 35^{ème} rapport - [Les Marchés Mondiaux 2021](#), Ed. Economica. ;
- [Les « terres rares », au cœur des conflits économique-politiques de demain](#), Jacques Fontanel, Conflits et guerres économiques, ILERI, Paris, janvier 2021 ;
- [La guerre des terres rares aura-t-elle lieu ?](#) Camille Bortoloni, Le Monde diplomatique, juillet 2020 ;
- [Résilience des matières premières critiques : la voie à suivre pour un renforcement de la sécurité et de la durabilité](#). Bruxelles, le 3.9.2020 COM (2020) 474 final, § 1. La communication, est complétée par une très substantielle Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) Final Report ;
- [Matières premières et nouvelles dépendances](#), Responsabilité et environnement, Annales des Mines, n°99, juillet 2020 ;
- [Métaux rares, stratégiques et critiques : de quoi parle-t-on exactement ?](#) Hélène Bouillon-Duparc, Pollutec Learn & Connect, 6 novembre 2019 ;
- [Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques](#), Rapport de M. Patrick Hetzel, député et Mme Delphine Bataille, sénatrice, fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, n° 617, tome I (2015-2016) - 19 mai 2016 ;
- [La guerre des terres rares](#), Régis Poisson, L'actualité chimique, n°369, p.47-54, décembre 2012 ;
- [Rapport sur la gestion durable des matières premières minérales](#) déposé par la mission d'information au nom de la commission du développement durable et de l'aménagement du Territoire, présenté par les députés Christophe Bouillon et Michel Havard, Assemblée nationale le 26 octobre 2011, n° 3880, 164 p.

Les terres rares

Quelques premières découvertes

Les terres rares (*Rare-Earth Elements* ou *REE* ou *REY*) ont d'abord été découvertes au XVIII^{ème} siècle, en Suède, en terrain granitique, dans un gisement de minerais situé près du village d'Ytterby. Certaines portent un nom issu de ce lieu : l'yttrium, le terbium, l'erbium et l'ytterbium.

Le chimiste français [Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran](#) (1838-1912) découvrit le gadolinium, nommé ainsi par référence au chimiste finlandais [Johan Gadolin](#) (1760-1852) qui avait consacré sa vie à l'étude des terres rares : il découvrit, en 1794, le premier élément chimique du groupe des terres rares, l'yttrium dans le minerai *ytterbite*, roche noire découverte par [Carl Axel Arrhenius](#) (1757-1824). L'yttrium était très utilisé dans les années 1960, pour ses capacités à transmettre des courants électriques à très haute fréquence ou encore à améliorer les propriétés du verre, par exemple.

Le terbium, métal blanc assez lourd, a été découvert, en 1843, par le chimiste et professeur suédois [Carl Gustav Mosander](#) (1797-1858). Grâce à ses travaux de recherches, il découvrit aussi le lanthane et l'erbium. D'autres terres rares ont un nom dérivant de la Scandinavie comme l'holmium ou encore le thulium. Le français Lecoq de Boisbaudran publia, en 1874, [Spectres lumineux. Spectres prismatiques et en longueurs d'onde destinés aux recherches de chimie minérale](#), un des ouvrages fondateurs de la spectroscopie. Puis entre 1875 et 1886, il met en évidence les indices de l'existence du gallium, isole le samarium et découvre le dysprosium.



Le dysprosium est utilisé en aéronautique dans des alliages de magnésium, etc.

© Tomihahndorf, CC by-sa 3.0, et U.S. Department of Defense Current Photos, CC by-nc 2.



Le gadolinium est dans la composition des tubes cathodiques pour obtenir la phosphorescence et pour les alliages supraconducteurs. Il est utilisé en IRM.

© JN, CC by-sa 3.0, et Tomáš Vendiš, GFDL



Le cérium est le plus abondant des terres rares. Il est utilisé en médecine, pour le polissage du verre, la protection contre l'ionisation, etc.

© Jurii, CC by 3.0 et Alex Proimos, CC by 2.0



Le thulium est la plus rare des terres rares, utilisé comme source de rayonnement dans certains lasers, les céramiques magnétiques, etc.

© Alchemist-hp, CC by-nc-nd 3.0, et Milestone Management, CC by-nc 2.0

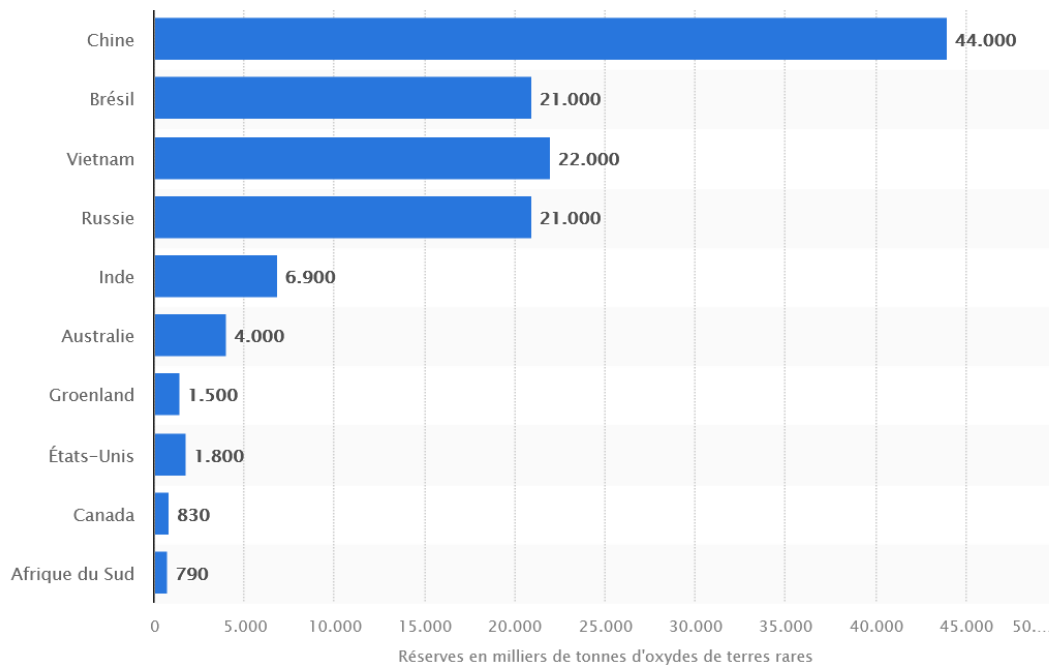
[Terres rares et leur utilisation](#), Futura Sciences, 24 janv.2020

Quelques rappels

Bien qu'appelés terres rares, ces éléments ne sont pas rares car ils sont relativement abondants dans l'écorce terrestre mais les concentrations dans les gisements sont faibles.

Le plus abondant, le [cérium](#), est plus répandu dans l'écorce terrestre que le [cuivre](#) ; le plus rare, le [thulium](#), est quatre fois plus abondant que l'argent. Généralement, ils se présentent commercialement sous forme d'oxydes, de sels ou de métaux, les éléments étant séparés ou pas. Ils possèdent des propriétés uniques (légèreté, résistance, stockage d'énergie, résistance thermique, magnétisme, optique, etc.) qui en ont fait des éléments essentiels dans de nombreuses nouvelles technologies.

Selon l'Union internationale de chimie pure et appliquée (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) - [IUPAC](#), les éléments appartenant aux terres rares réelles sont uniquement les 17 oxydes de terres rares répartis, en raison de certaines propriétés physico-chimiques très similaires, comme suit : le groupe des 15 lanthanides (éléments de numéros atomiques compris entre 57 et 71, du lanthane au lutécium) auquel s'ajoutent, du fait d'autres propriétés chimiques voisines, l'yttrium et le scandium. Un élément est instable : le prométhium, non présent naturellement sur terre à des concentrations significatives, car il est radioactif et obtenu par la fission de l'uranium.



Pays comptant les plus grandes réserves de terres rares en 2021 [Statista 2022](#)

La Chine possède les plus grands [gisements actuellement connus](#) dans le monde, mais des pays comme le Brésil, le Viêt Nam et la Russie disposent aussi d'un gros potentiel minier encore largement inexploité. Les États-Unis et l'Australie ont, quant à eux, augmenté leur production de terres rares à partir des années 2010, quand ces métaux sont devenus indispensables aux nouvelles technologies et, plus récemment, le Myanmar et la Thaïlande ont commencé à en extraire des quantités considérables. L'Australie est aujourd'hui le 6^{ème} pays en termes de réserves de terres rares (3%) derrière la Chine (38%), le Brésil, le Viêt Nam, la Russie et l'Inde. Elle est devant les États-Unis et la Malaisie. Quant à la production de terres rares, elle est en deuxième position (12%) derrière la Chine (77%), mais encore devant les États-Unis (7%). Entre 2013 et 2018, sa production est passée de 1 000 tonnes à 19 000 tonnes par an.

Un minéral de terre rare peut contenir un ou plusieurs éléments de terre rare comme constituants métalliques principaux. Les 18 minéraux de terres rares sont : aeschynite, allanite, apatite, bastnäsite, britholite, brockite, cerite, fluocécrite, fluorine, gadolinite, monazite, parisite, stillwellite, synchysite, titanite, wakefieldite, xénotime, zircon (le nom souligné des minerais désigne ceux qui sont fréquemment les plus extraits).



Bastnäsite



Monazite



Xénotime

Principaux minerais de terres rares utilisés

Ex. la bastnäsite renferme du carbone et du fluor, couplés à du cérium, du lanthane ou de l'yttrium. Du néodyme et du praséodyme sont aussi souvent présents. Les principaux gisements : Mountain Pass en Californie (États-Unis), Bayan Obo en Mongolie intérieure (Chine) et Sichuan (Chine).

Les minéraux de terres rares n'ont pas la valeur stratégique des oxydes de terres rares. Les principaux états producteurs de minéraux de terres rares sont la Russie, l'Inde, la Malaisie et le Burundi. Alors que les principaux états producteurs d'oxydes de terres rares sont la Chine, l'Australie, les États-Unis, la Birmanie et la Russie.

Contenues dans des minerais (monazites diverses, carbonatites, etc.), des alliages ou des argiles de type adsorption d'ions (appelées minerais ioniques), les terres rares doivent être traitées, séparées et purifiées suivant leur utilisation. Pour cette opération de séparation, il est nécessaire de développer des procédés métallurgiques appropriés pour transformer sur place le minerai brut en un concentré utilisable. Compte tenu des technologies à mettre en œuvre, les investissements sont très importants et deviennent rentables sur de longues périodes.

Au départ le minerai ne contient pas que des terres rares, mais aussi de nombreuses impuretés qu'il faut éliminer. L'opération d'enrichissement consiste à faire en sorte que le pourcentage de terres rares soit le plus élevé possible : broyage du minerai en petits morceaux, puis tri des éléments inutiles. Ces opérations sont menées afin d'obtenir une sorte de boue faite de poussières humides contenant les particules de terres rares rendues par un système de filtration emportant toutes les impuretés.



Le gisement de Bayan Obo, en Chine, dépasse des teneurs élevées de 5% en éléments de terres rares (pour en obtenir 50 kg, il faut extraire 1 tonne de roche). © Xinhua/ZUMA/REA



Le site américain de Mountain Pass, en Californie, aux Etats-Unis extrait environ 15 % des terres rares dans le monde. © Steve Marcus/REUTERS



Le mont Weld : site minier en Australie occidentale, parmi les gisements de terres rares les plus riches au monde (néodyme, praséodyme, ...). [Ns Energy](#)



Gakara : la première et la seule mine de minerais de terres rares située au Burundi, en Afrique, avec la plus forte teneur au monde. [Agence Ecofin](#)

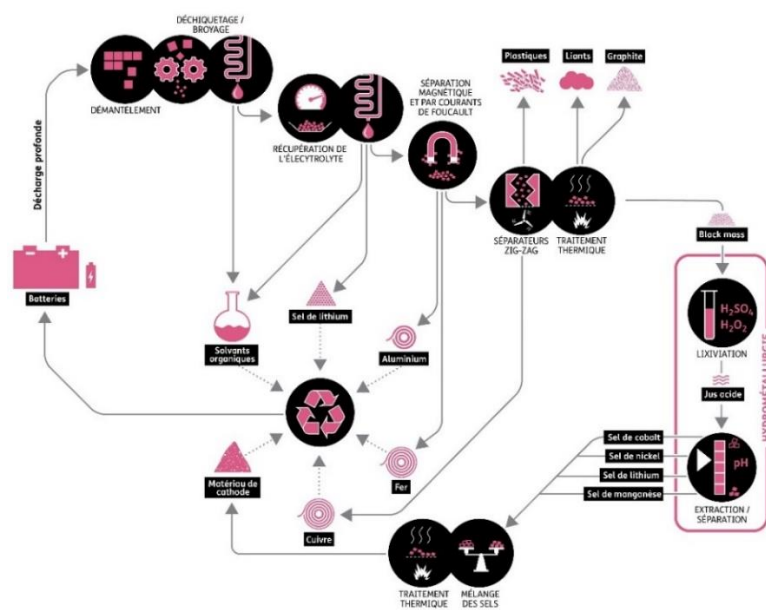
Suivant les applications, la séparation n'est pas nécessaire et il est possible d'utiliser un mischmétal (de l'allemand Mischmetall, alliage métallique), appelé aussi métal d'Auer, en référence au chimiste et industriel autrichien, [Carl Auer von Welsbach](#) (1858-1929), spécialiste des terres rares. Il est composé de l'ordre de 50% de cérium et de 25% de lanthane avec de plus petites quantités de néodyme, de praséodyme et d'autres traces de terres rares constituant l'équilibre. Comme les terres rares s'oxydent et absorbent facilement l'hydrogène et l'azote, il est très difficile de produire un échantillon de mischmétal suffisamment pur pour en tester les propriétés mécaniques et électriques. Il est dans la préparation de pratiquement toutes les terres rares.

Pour des applications plus contraignantes, il importe d'utiliser des terres rares bien identifiées, et dont la qualité est garantie, ce qui tient en grande partie à leur purification. Leur séparation, à partir des minerais ou des alliages, repose alors sur différentes techniques comme l'hydrométallurgie, la pyrométallurgie ou des procédés de chimie fine extractive et séparative.

Parmi les techniques appropriées, on note que :

- L'hydrométallurgie est l'une des techniques les plus intéressantes de purification des métaux. Elle consiste à mettre en solution les différents métaux contenus dans un minerai ou un concentré afin de les séparer pour les valoriser : opérations de lixiviation ou de dissolution, de séparation (purification) et enfin récupération du métal voulu sous forme métallique (électrolyse). Les différents métaux ainsi traités sont le zinc, le nickel, le cuivre, le cobalt, l'uranium, le chrome, le manganèse. L'Institut européen d'hydrométallurgie (IEH), de Marcoule, est une structure unique permettant la récupération des terres rares, dans les minerais ou les déchets technologiques. Dans le cas de recyclage en boucle fermée, c'est la dissolution sélective des métaux qui peut être utilisée ; elle se fait par des micro-organismes. Les sels de métaux récupérés à la cathode peuvent être réutilisés pour la synthèse de nouveaux matériaux actifs.

Cette technique est très utilisée dans le domaine du recyclage. Elle intervient après plusieurs opérations préalables, qui requièrent un savoir-faire industriel difficile à maîtriser : décharge profonde, démantèlement, déchiquetage et broyage (à sec ou par voie humide). Puis diverses étapes de récupération de l'électrolyte, de séparation magnétique par courants de Foucault sont nécessaires pour récupérer la majorité du fer et de l'aluminium. A l'issue des étapes de broyage et de séparation, une masse noire (« *black mass* ») contenant les matières métalliques à récupérer, est obtenue, contenant le carbone hydrophobe et les oxydes de métaux hydrophiles.



Exemple de procédé de recyclage des batteries au lithium par hydrométallurgie en boucle fermée (les sels de métaux récupérés de la cathode peuvent être réutilisés pour la synthèse de nouveaux matériaux actifs).

[Source : Dossier [Le stockage de l'énergie électrochimique en technologie lithium-ion](#), CultureSciences-Chimie, ENS, avril 2021]

« Il faut aussi considérer l'avantage de pouvoir traiter des minerais à faible teneur (comme les terres rares), de permettre un meilleur contrôle des coproduits et d'avoir un plus faible impact environnemental avec notamment une facture énergétique réduite... Ainsi l'industrie métallurgique œuvre pour le développement de procédés hydrométallurgiques plus adaptés aux défis actuels, plus efficaces, économiques et respectueux de l'environnement capables d'extraire des métaux dans des matrices polymétalliques de plus en plus complexes et pauvres et dont la composition peut varier au cours de l'exploitation, est réel et partagé... Le développement de telles technologies nécessite le regroupement de compétences transversales en géologie, minéralurgie, chimie et ingénierie. » [Source : GdR CNRS [Prométhée](#)].

Le recyclage en boucle fermée consiste en l'utilisation du matériau secondaire pour un usage et une destination identique, sans perte fonctionnelle de la matière (ex. recyclage d'une bouteille plastique en une nouvelle bouteille du même plastique). Le recyclage en boucle ouverte produit de la matière pour une destination différente, avec perte fonctionnelle de la matière, mais en substitution d'une matière première vierge (ex. recyclage d'une bouteille plastique en fibre polaire pour l'habillement).

Parmi les groupements de recherche spécialisés, le Groupement de Recherche [Prométhée](#) (*Procédés hydrométallurgiques pour la gestion intégrée des ressources primaires et secondaires*) contribue à la recherche française pour une meilleure gestion des ressources minérales non énergétiques issues des activités minières et du recyclage. Il compte 140 chercheuses et chercheurs issus de 27 laboratoires du [CNRS](#), du [CEA](#), de l'[IFPEN](#) et du [BRGM](#). Le CNRS, via l'Institut de Chimie ([INC](#)), contribue à son financement. Les domaines concernés sont la minéralurgie, la modélisation, la chimie moléculaire, la physicochimie des solutions, la matière molle, la chimie analytique, la mise en œuvre des procédés, etc.

- La pyrométallurgie constitue souvent une approche concurrente ou complémentaire. C'est une technique ancienne qui consiste à récupérer les métaux par voie thermique. Trois étapes sont nécessaires : le grillage, la réduction du métal et l'affinage.

Dans le cas de recyclage, on peut d'abord faire fondre, en conditions réductrices, des téléphones portables et récupérer les métaux les plus intéressants dans une phase de cuivre en fusion. En ce qui concerne la récupération des matériaux métalliques d'une batterie, les procédés à haute température (entre 800 et 1300° C) fondent les différents métaux et permettent leur récupération sous forme d'alliages qui sont ensuite affinés pour obtenir des composants métalliques plus purs.

Selon la configuration des fours utilisés (possédant plusieurs zones de préchauffage, de pyrolyse, de fonte pour la réduction des oxydes de métaux, etc.), il est possible d'introduire des modules entiers de batterie. Cette étape est cependant très énergivore.

Cependant, les procédés pyrométallurgiques présentent généralement une faible capacité, une forte consommation d'énergie et une efficacité de recyclage limitée, en plus du fait qu'ils sont peu flexibles.

- Une combinaison des deux types de procédés est tout à fait possible pour avoir une meilleure séparation physique des éléments recherchés.

La Société de l'industrie minérale ([SIM](#)), en partenariat avec le BRGM, organise une [Journée technique sur la filière française du recyclage des DEEE](#), le jeudi 12 mai 2022 à Orléans.

(DEEE ou D3E : déchets électroniques et électriques)



Organisé par la Société de l'industrie minérale ([SIM](#)) à Marseille, 18-21 octobre 2022

Carrefour international de l'industrie minérale et des mines urbaines



Vienne (Autriche) & en ligne, du 23 au 27 mai 2022

Union européenne des géosciences / *European Geosciences Union* ([EGU](#))
Géoscientifiques du monde entier couvrant toutes les disciplines
des sciences de la Terre, des planètes et de l'espace.

Le recyclage : quelques actions du BRGM

Selon un rapport rédigé sous l'égide des Nations Unies, seulement 20% des 45 millions de tonnes de déchets électroniques sont recyclés. Contrairement à des éléments communs comme le fer ou le cuivre, les métaux rares sont peu recyclés car les quantités récupérées sont souvent très faibles et présentent des impuretés. De plus la rentabilité des procédés n'est pas comparable par rapport aux faibles coûts d'extraction de ces métaux dans certains pays.

Parvenir à recycler les métaux, rares ou non, contenus dans les DEEE ou D3E (ordinateurs, smartphones, micro-ondes, par exemple) constitue un enjeu. L'Europe est une importante zone de consommation de terres rares par les produits issus de ses industries à haute valeur ajoutée. De nombreux biens issus des nouvelles technologies sont et ont été consommés, accumulés et amenés en fin de vie. Ils constituent ainsi des ressources secondaires de terres rares car, dans ce cas, le besoin énergétique est bien inférieur à celui nécessaire à l'exploitation des ressources primaires. Divers programmes de recherche européens et nationaux sont en cours de réalisation pour répondre à ces défis technologiques au vu de la difficulté de séparation des éléments.

Financé par des fonds européens, [VALOMAG](#) (*VALOrisation of MAGnets*) est un projet de l'[EIT RawMaterials](#). Il regroupe [SUEZ Groupe SAS](#), le [BRGM](#), le [CEA](#), le Centre de Recherches Métallurgiques asbl (Groupe [CRM](#)), deux universités néerlandaises ([Université de technologie de Delft](#), [Université de Leiden](#)) et l'entreprise allemande [Kolektor Group](#). Lancé en janvier 2020, il a pour objectif de mettre au point des techniques efficaces pour extraire et valoriser les aimants permanents présents dans les éoliennes ou les disques durs (méthode de broyage et de dissolution du matériau). Le projet prend en compte toute la chaîne de traitement depuis la collecte et la caractérisation des déchets, jusqu'à la production de nouveaux aimants pour des utilisations spécifiques, etc.

Deux projets européens auxquels participe le BRGM visent à récupérer les métaux en vue de leur recyclage via des procédés biologiques où les bactéries remplacent les réactifs chimiques car elles produisent elles-mêmes l'équivalent des réactifs chimiques pour dissoudre les métaux. Elles peuvent extraire quasiment 100% du cuivre, 100% du nickel, 100% du cobalt de ces déchets électroniques.

- Le projet européen [H2020 NeMO](#) étudie l'opportunité de récupérer plusieurs éléments présents en faible quantité dans les déchets d'extraction de la mine finlandaise de Sotkamo, afin de pouvoir réutiliser le résidu comme matériau de construction. Les procédés de biolixiviation sont développés pour mettre en solution, entre autres, le nickel, le cobalt et le cuivre résiduels, puis de nouvelles méthodes sont expérimentées afin de récupérer les éléments mis en solution, ainsi que d'éventuelles traces de terres rares, dans les lixiviats obtenus.
- Par ailleurs, dans le cadre du projet [H2020 CroCodile](#), le BRGM développe un procédé de biolixiviation réductrice afin de valoriser le cobalt contenu dans des limonites, matériau pour lequel il existe à ce jour peu de procédés de traitement économiquement viables.

Dans le cadre du [projet de recherche SURFER](#), le [BRGM](#) a mené, avec un cofinancement de l'[ADEME](#) et en association avec le [CNRS](#), une étude sur la faisabilité de la transition énergétique en France au regard des besoins en matières minérales, énergétiques mais aussi en eau et en sols qu'elle génère. Une recherche bibliographique a été effectuée pour identifier des données originales de type « composition matière » pour les technologies de la transition énergétique mais également pour des filières énergétiques classiques (gaz, pétrole, charbon, nucléaire) représentant l'état actuel des technologies. Le BRGM a ainsi produit, entre 2016 et 2020, une importante base de données qui a pour vocation, dans le cadre de ce projet piloté par l'ADEME, d'être utilisée en particulier par le CNRS pour modéliser trois scénarios de mix énergétique à l'horizon 2050 : 90% d'électricité renouvelable, 50% d'électricité d'origine nucléaire et le statu quo.

Sources :

- [Dossier Terres rares / L'Élémentarium](#) : site internet dédié au tableau périodique dont les comportements physique et chimique des 118 éléments, allant de l'hydrogène ¹H à l'oganesson ¹¹⁸Og ;
- L'Institut [UTINAM](#) (Univers, Temps-fréquence, Interfaces, Nanostructures, Atmosphère et environnement, Molécules) ;
- [What is mischmetal ?](#) Blog Greelane [Ressource éducative](#) ;
- [Le recyclage des métaux indispensable à la transformation de l'économie](#), Pascale Megardon-Auzepy, Crédit agricole, podcast 21 janvier 2022 ;
- [Terres rares contre semi-conducteurs : une course de fond technologique aux enjeux géopolitiques](#), Anne Kraatz, 2 juillet 2021 ;
- [Ressources minérales : les terres rares](#), BRGM, 10 juin 2021 ;
- [Comment le recyclage d'une batterie fonctionne-t-il ? Découvrons comment récupérer plus de 95 % d'une batterie au lithium](#), Flash Battery, blog 10 février 2021 ;
- [Que sont les terres rares, ces matières premières stratégiques ?](#) Atlas sociologique mondial, [Atlasocio.com](#), 20 décembre 2019 ;
- [Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques](#), Rapport de M. Patrick Hetzel, député et Mme Delphine Bataille, sénatrice, fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, n° 617, tome I (2015-2016) - 19 mai 2016.

Recyclage des batteries : quelques informations

Les prévisions d'EDF pour 2027 annoncent un volume de 50 000 tonnes de batteries à recycler. Cependant, pour prendre en compte la réglementation européenne, les constructeurs automobiles, les chimistes, les recycleurs plus généralement cherchent à développer la seule technologie qu'ils considèrent adaptée aux nouvelles exigences, l'hydrométallurgie.

Parmi les actions de l'UE, en septembre 2019, elle a retenu le projet de recyclage des batteries en boucle fermée ([ReLieVe](#)), mené par trois grands groupes européens ([Suez](#) et [Eramet](#) pour la collecte des batteries, leur démantèlement et l'extraction des métaux, et [BASF](#) pour la recombinaison des matériaux actifs de cathodes). Ils sont soutenus par l'[EIT RawMaterials](#). [Chimie ParisTech](#) et la [Norwegian University of Science and Technology](#) sont associés pour la partie académique du projet. Plusieurs campagnes de tests ont été menées et ont permis de récupérer l'ensemble des éléments de valeur (nickel, cobalt, lithium et manganèse) et de les transformer en nouveaux métaux de qualité batterie. Les participants ont donc démontré leurs savoir-faire avec un haut niveau de performance.

Pour mémoire, le groupe français [Eramet](#), fort de ses expertises minières, métallurgiques et industrielles, est un acteur minier et métallurgique incontournable de la transition énergétique, présent sur cinq continents. C'est un des principaux producteurs mondiaux de métaux d'alliages (notamment nickel et manganèse) et d'alliages et aciers spéciaux à hautes performances. Eramet étudie ou développe aussi des projets dans de nouveaux métaux à fort potentiel de croissance (lithium, niobium, terres rares, etc.) ainsi que dans le recyclage. Dans le contexte actuel, les besoins en recyclage de batteries lithium-ion seront tels que les recycleurs français devront tripler leurs capacités d'ici 2027. Dans l'objectif de posséder une solution intégrée de recyclage, du démantèlement des batteries jusqu'à la production de sels de nickel, de cobalt et de lithium, Eramet et son partenaire, Suez, devraient construire en France, d'ici 2024, une usine de recyclage en boucle fermée, pour la production de "black mass" (concentré des métaux évoqués précédemment) adapté aux étapes de raffinage par voie hydrométallurgique, pour lesquelles Eramet compte construire un démonstrateur au sein de son centre de R&D.

Dans le but d'accélérer la transition vers une économie circulaire, [Solvay](#) (secteur de la chimie) et [Veolia](#) (secteur de la gestion des déchets) ont créé un consortium d'économie circulaire pour les batteries Li-ion des véhicules électriques en fin de vie, dans le cadre d'un partenariat avec la [Fondation Ellen MacArthur](#). Solvay et Veolia prévoient de mettre en place une installation de traitement des matières premières pour recycler les batteries des véhicules électriques et les déchets de fabrication de certains équipementiers.

La startup [Mecaware](#), spin-off de l'Institut de chimie et biochimie moléculaires et supramoléculaires ([ICBMS](#)), recycle les produits technologiques en fin de vie, comme les batteries Li-ion usagées pour récupérer de manière écologique les métaux stratégiques et les terres rares contenues, par exemple, dans des aimants permanents ou les batteries Ni-MH équipant de nombreux véhicules hybrides. Ce procédé vert, unique au monde, se base sur le captage du CO₂ et répond à deux problématiques environnementales : la réduction du CO₂ et le recyclage des matériaux stratégiques non accessibles mais indispensables à l'industrie des nouveaux outils technologiques.

Source : [Mecaware : une technologie de rupture pour recycler les métaux et terres rares des déchets technologiques](#), Benoît Crépin, Tech. Ing., 14 février 2022

Sources :

- [Stockage d'énergie électrique : un regard sur les enjeux et les défis technologiques](#), IESF Côte d'Azur, Bull. n°1, avril, p.10-22 (2022) ;
- [Le projet d'une usine de recyclage de batteries en France soutient Eramet](#), BFM Bourse, Trading Sat, 17 mars 2022 ;
- Workshop REA 2022 Demain la Chimie, [Le recyclage des batteries lithium-ion](#), 27 janvier 2022, Sophia Antipolis ;
- [Recyclage des batteries lithium-ion : le projet ReLieVe confirme le succès de la technologie développée par Eramet](#), ZoneBourse.com, 18 janvier 2022 ;
- [A propos du consortium. Recyclage des batteries de véhicules électriques](#), Solvay, Actualités, 2022 ;
- [Recyclage des batteries : ruée vers l'hydrométallurgie](#), Aline Nippert, Usine Nouvelle, 11 octobre 2021 ;
- Dossier [Le stockage de l'énergie électrochimique en technologie lithium-ion](#), Ivan Lucas, Antonin Gajan, CultureSciences-Chimie, ENS, avril 2021 ;
- [Tendances de la transition énergétique. Les terres rares, le cas de la production des éoliennes](#), PwC, mars 2019, n°6 ;
- ADEME, Deloitte Développement Durable, Véronique Monier, Mariane Planchon, Alexis Lemeillet, Nada Saïdi, Taylla Scapim-Yamaguchi, [Définition d'orientations prioritaires de recherche-développement de compétences françaises de recyclage des métaux critiques](#). Rapport, 2017, 204 p. ;
- [Valorisation des DEEE par l'extraction des terres rares, métaux précieux et matières plastiques](#), Meryem Kitane, Chouaib Benqlilou, Kacem El Kacimi, El Mostapha Lotfi, Déchets Sciences et Techniques, n°69, Juin 2015 ;
- [Wikipédia](#).

Le recyclage des téléphones portables en France : quelques informations complémentaires

Comme le rapporte [Les Echos](#), l'électrification de l'économie va faire exploser la demande en métaux stratégiques (cuivre, cobalt, gallium, lithium, les terres rares, etc.),

Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ([ADEME](#)), il y aurait entre 54 et 110 millions de téléphones portables stockés dans les placards. Si on ajoute tous les vieux matériels informatiques, cela constitue un vrai gisement de métaux qui est encore très peu exploité : c'est une mine urbaine.

Certains smartphones peuvent être réutilisés après avoir été reconditionnés. Si la réparation est impossible, l'appareil peut être recyclé jusqu'à 80% (métaux, plastique, verre, etc.). Mais seulement 16 % des téléphones faisaient l'objet d'une collecte pour être dépollués, selon un rapport d'information du [Sénat](#).



Image [Shutterstock](#)

Deux éco-organismes ([Ecosystem](#) et [Ecologic](#)) ont pour mission d'acheminer les téléphones portables vers des centres de traitement où ils seront recyclés en vue de la fabrication de nouveaux smartphones.

[Sources : [Les Echos](#), 19 avril 2022 ; [L'Usine Digitale](#), 21 avril 2022 ; [ADEME](#)]

Le recyclage des terres rares : une autre piste de valorisation

Selon l'[ADEME](#), 100 000 hectares de terre sont contaminés aux métaux lourds en France. Face à cet enjeu, les phytotechnologies se développent afin de dépolluer ces sols d'une manière écologique et peu coûteuse, tout en s'inscrivant dans l'économie circulaire. Ces technologies utilisent des plantes vivantes que ce soit pour épurer l'eau, l'air ou pour la dépollution des sols, etc. Les chercheurs de l'[INERIS](#) et du [CNRS](#) expérimentent les plantes dites [hyperaccumulatrices](#). Leur particularité est de survivre sur ces terres contaminées et d'être capables de faire remonter les métaux lourds contenus dans le sol à travers leurs racines pour les stocker dans leurs fibres (feuilles, tiges et troncs). Ainsi un procédé original visant à extraire sélectivement les éléments de terres rares de la plante *Dicranopteris dichotoma* a été développé. Les conditions opératoires des procédés hydrométallurgiques ont permis d'obtenir une pureté de 81,4% des éléments de terres rares et une récupération de 78%. De telles plantes présentent donc des perspectives intéressantes pour résoudre des problèmes liés à la restauration écologique des sites miniers ou à la dépollution des sols. Des études s'avèrent encore nécessaires concernant la physiologie de ces plantes et la compréhension des mécanismes de fractionnement et d'accumulation des terres rares au niveau des plantes. Un tel procédé est [l'agromine](#), connu depuis plusieurs années et des brevets ont été déposés.

L'agromine est une solution fondée sur la nature nécessitant des connaissances et des compétences en botanique et en agronomie, d'une part, et en génie des procédés hydrométallurgiques, d'autre part. Plusieurs laboratoires membres du [Carnot Icéel](#), en particulier le Laboratoire Sols et Environnement ([LSE](#), UMR [Université de Lorraine](#) - [INRAE](#)) et le Laboratoire Réactions et Génie des Procédés ([LRGP](#), UMR [Université de Lorraine](#) - [CNRS](#)) mènent des recherches depuis une quinzaine d'années sur ce thème, et ont démontré la faisabilité de l'agromine pour la récupération du nickel. Ces recherches se situent dans le contexte du Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Friches Industrielles ([GISFI](#)) et du [LabEx Ressources 21](#).

Ainsi le projet Carnot REEcovery a pour objectif d'apporter de nouvelles connaissances sur l'agromine dans le contexte de la récupération des terres rares (TR) et donc de leur valorisation. L'exploitation des terres rares en Chine du Sud a laissé des stériles miniers, qui contiennent encore ces éléments, et sur lesquels se développent des plantes capables de les accumuler, comme la fougère *Dicranopteris linearis* (voir ci-contre).



Mise en commun des savoir-faire de trois laboratoires, le Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux ([LIEC](#), UMR Université de Lorraine - CNRS), le LRGP et le LSE.

Sources :

- [Applicabilité de la filière Agromine aux éléments des terres rares : Verrous à lever et éléments de succès d'un point de vue génie chimique](#) / Expanding agromining to the Rare-Earth Elements: key elements of success from a chemical engineering perspective, Bastien Jally, thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, 22 février 2022 ;
- [Agromining : Farming for Metals. Extracting unconventional resources using plants](#), Ed. Antony van der Ent, Alan J.M. Baker, Guillaume Echevarria, Marie-Odile Simonnot, Jean-Louis Morel. 2nd ed. Springer International Publishing, 2021, Series Title: Mineral Resource Review, (doi :[10.1007/978-3-030-58904-2](#)). ([hal-03079116](#)) ;
- [Synthèse des ateliers du colloque bioéconomie durable](#), ANR, ADEME, 28-29 janvier 2021 ;
- [Extraire des métaux avec des plantes : l'agromine](#), INRAE, 4 mai 2020 ;
- [Les plantes « hyperaccumulatrices », solution d'avenir pour dépolluer les sols ?](#) Les Horizons, 12 novembre 2019 ;
- [Valorisation de terres rares à partir de plantes hyperaccumulatrices](#), Zeinab Chour, thèse de doctorat de l'Université de Lorraine, Génie des Procédés et Produits, 16 octobre 2018 ;
- [Recovery of rare earth elements from Dicranopteris dichotoma by an enhanced ion exchange leaching process](#), Zeinab Chour, Baptiste Laubie, Jean Louis Morel, Yetao Tang, Rongliang Qiu, Marie-Odile Simonnot, Laurence Muhr, Chemical Engineering and Processing, Ed. Elsevier, vol.130, p.208-213, août 2018. (doi : [10.1016/j.cep.2018.06.007](#));
- [Wikipedia](#).

Quelques exemples de produits de substitution de terres rares

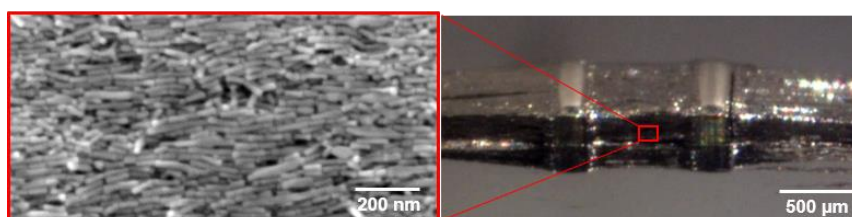
L'utilisation des terres rares dépend des technologies existantes et de leurs évolutions. La demande de matériaux plus efficaces augmente rapidement. Les recherches effectuées dans le domaine de la chimie du solide permettent de concevoir de nouveaux matériaux pouvant se substituer à ceux contenant des terres rares. Suivant les applications, cela peut être très difficile : toutefois, il est nécessaire de suivre la voie de substitution quand c'est possible.

Remplacer une matière première critique par une matière première non critique offrant des performances comparables est donc un autre moyen de réduire la dépendance à l'égard des matières premières critiques et donc d'atténuer le risque de pénurie d'approvisionnement. Cela permet de réduire très notablement les dommages écologiques causés par l'extraction des terres rares, entre autres matières. La recherche de nouveaux matériaux se développe. Par exemple :

- Dans le cas de la luminescence, le remplacement des luminophores par les LED a entraîné de fait une nette diminution de la demande d'europium, d'yttrium et de terbium.
- Dans le domaine de la catalyse, il est proposé de nouveaux catalyseurs bimétalliques à base d'éléments de transition ou pour les accumulateurs alcalins avec la conception de nouveaux matériaux d'anodes sans terres rares, plus légers et résistant bien à la corrosion.
- Les aimants macroscopiques les plus performants sont à base de terres rares et obtenus par des procédés métallurgiques qui ne peuvent répondre aux problématiques d'intégration et de miniaturisation. La structuration de composites polymères magnétiques est une des solutions alternatives. Il est possible de nano-structurer des particules contenant des éléments simples et disponibles (fer, cobalt, carbone, etc.) en vue d'obtenir des propriétés magnétiques comparables à celles d'aimants permanents réalisés à partir de terres rares.

Une équipe de [Siemens Corporate Technology](#) (CT) travaille sur un matériau basé sur un composé de fer et de cobalt, dans lequel des tiges magnétiques de taille nanométrique sont fixées dans une matrice comme un collier de perles : un aimant permanent optimisé, une alternative aux terres rares à long terme.

Les équipes du Laboratoire de physique et chimie des nano-objets ([LPCNO](#), [INSA](#) Toulouse / Univ. Toulouse Paul Sabatier) et du Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes ([LAAS-CNRS](#)), ont développé une méthode alternative de conception d'aimants basée sur l'assemblage de nanobâtonnets de cobalt.



A gauche vue au microscope des bâtonnets de cobalt déposés après évaporation, de telle sorte à constituer un micro-aimant, entre deux plots de nickel (à droite).

Synthétisés par voie chimique et grâce à leur caractère cristallin et leur rapport de forme élevé, ils se comportent chacun comme des nanoaimants.

Crédit Lise-Marie Lacroix, [LPCNO](#)

Sources :

- [Substitution de terres rares par la nanotechnologie](#), Institut für Seltene Erden und Metalle AG (ISE), 2022 ;
- [Des aimants miniatures fabriqués à partir de nanoparticules](#), Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes ([LAAS](#)), 16 avril 2021 ;
- [Magnetophoresis-Assisted Capillary Assembly: A Versatile Approach for Fabricating Tailored 3D Magnetic Supercrystals](#). P. Moritz, A. Gonon, T. Blon, N. Ratel-Ramond, F. Mathieu, P. Farger, J.-M. Asensio-Revert, S. Cayez, D. Bourrier, D. Saya, L. Nicu, G. Viau, T. Leichle, L.-M. Lacroix. ACS Nano. Publié le 23 février 2021. <doi : [10.1021/acsnano.0c10215](#)>. ([hal-03156435](#)) ;
- [Les terres rares, et après ?](#) Michel Latroche, CNRS Le Journal, 9 mai 2019 ;
- [Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques](#), Rapport de M. Patrick Hetzel, député et Mme Delphine Bataille, sénatrice, fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, n° 617, tome I (2015-2016) - 19 mai 2016 ;
- [Les luminophores](#), Universalis.

France : exploration de gisements dans les grands fonds sous-marins

Selon les [propos rapportés](#) de l'interview du géologue de l'[Ifremer](#), Ewan Pelleter, il est encore très difficile de connaître les ressources réelles qui se trouvent dans les grands fonds.

En juillet 2022, le chercheur embarquera pour sa seconde mission d'exploration des grands fonds marins (-4 600 m) dans l'Atlantique Nord, à l'aide du petit sous-marin habité de l'[Ifremer](#), le [Nautile](#) (il avait servi à explorer le Titanic, en 1987). Son équipe va identifier des ressources minières potentielles et observer la biodiversité.

Cette mission, Hermine II, à bord du navire de la flotte océanographique française, le [Pourquoi Pas ?](#) s'effectuera pour le compte de la France sous l'égide de l'Autorité internationale des fonds marins ([AIFM](#)), un organisme onusien chargé d'encadrer les pratiques d'exploration, de prospection et d'exploitation des ressources minières en haute mer.

Source : [Ifremer.fr](#)



Le nouveau robot de l'[Ifremer](#), [Ulyx](#), explorera les grands fonds marins. Ce robot autonome de la flotte océanique française plongera à 6 000 m de profondeur.

Il complètera l'exploration des grands fonds aux côtés du robot téléopéré à câble, Victor 6000, piloté à partir d'un navire support et du sous-marin habité Nautile.

[L'odyssée d'Ulyx au fond des océans](#), Sciences Ouest, n°385, Janv.-Fév. 2021

Les associations environnementales sont inquiètes de l'exploration des grands fonds. Elles soulignent les risques pour les écosystèmes lents à se reconstituer (plusieurs décennies) et pour la biodiversité, liés à une éventuelle exploitation minière des grands fonds marins dans les années à venir. La France souhaite, elle, une meilleure connaissance scientifique.

En janvier 2022, lors de l'audition du directeur du département [Ressources physiques et Ecosystèmes de fond de Mer](#) de l'[Ifremer](#), dans le cadre d'une mission d'information qu'ils menaient sur les fonds marins, les sénateurs ont appris, par exemple, que 10 % des tests PCR sont constitués de molécules extraites de zones situées vers -1 700 mètres de fond. Les ressources minérales sous-marines n'ont été évaluées que dans des zones extrêmement réduites de la surface du globe, dans les régions où l'[AIFM](#) a délivré des permis d'exploration.

La France, deuxième puissance maritime du monde en termes de superficie et première en termes de domaine sous-marin au monde, n'a pas soutenu le moratoire de l'Union internationale pour la conservation de la nature ([UICN](#)) car « Investir dans le champ des fonds marins », est l'un des dix objectifs du plan d'investissement [France 2030](#). La France a étendu son influence au fond des océans, cependant ses droits sur ces zones ne s'exercent que sur le sol et le sous-sol marin et non sur la colonne d'eau, qui reste du domaine international.

Sources :

- [Les associations environnementales inquiètes de l'exploration des grands fonds](#), Muryel Jacque, Les Echos, 9 février 2022 ;
- [Haute mer : il est encore très difficile de savoir les ressources réelles qui se trouvent dans les grands-fonds](#), Aurore Coulaud, Liberation.fr, 9 février 2022 ;
- [La France étend son territoire sous-marin dans l'océan indien](#), Les Echos, 11 juin 2020.

Perspectives

Les terres rares et autres métaux critiques sont devenus indispensables au développement des technologies de pointe par ses propriétés physico-chimiques exceptionnelles et participent à la transition énergétique. Inégalement réparties sur la planète, difficiles à produire et à traiter, les terres rares sont une source de tensions géopolitiques et économiques d'où des enjeux sociétaux et environnementaux tout aussi importants à considérer que les enjeux technico-économiques. En effet, la multiplication des zones d'exploitation minières nécessaires a d'importants impacts sur l'environnement et la santé. Les minerais de terres rares agrègent différents métaux et compte tenu de leurs propriétés chimiques très proches, il est très difficile de réaliser leur séparation et leur purification. Les méthodes utilisées nécessitent, du moins aujourd'hui, des procédés complexes - extraction liquide-liquide, résines échangeuses d'ions, etc. - et notoirement polluants : rejets d'acides, de bases, de solvants, de métaux lourds ou de déchets radioactifs.

Aujourd'hui, l'intérêt stratégique de ces éléments pousse les Etats et les industriels à repenser les modes d'approvisionnement. De même, la recherche de nouveaux procédés chimiques pourra répondre à ces enjeux par des techniques de recyclage et des matériaux de substitution.

Si l'épuisement des ressources minérales avant la fin de ce siècle est très peu probable pour la plupart des matières premières minérales par contre des pénuries sur des durées importantes sont à envisager, faute d'une mise en exploitation suffisamment rapide de nouveaux gisements. En effet, avec la transition énergétique, la demande en métaux pourrait exploser d'ici à 2050 d'autant que les défis environnementaux de la Chine et le durcissement des réglementations pourraient également restreindre les approvisionnements d'ici cet horizon. Les plus fortes tensions devraient porter sur les métaux plus traditionnels comme le cuivre, l'aluminium ou le nickel.

Selon les prévisions d'[Emmanuel Hache](#), économiste à l'Institut français du pétrole et des énergies nouvelles ([IFPEN](#)), dans le cadre des politiques de lutte contre le réchauffement climatique, contrairement au cuivre ou au cobalt, les risques qui pèsent sur les terres rares, tous types confondus, ne sont pas tant géologiques mais plutôt :

- géostratégiques : la Chine domine l'ensemble de la chaîne de valeur, de la production des minerais jusqu'aux activités de séparation des terres rares et de production de produits intermédiaires ;
- économiques : le marché mondial des terres rares dépend de la stratégie chinoise en matière de consommation, de production et d'exportation sur les marchés ;
- environnementaux : les activités de production et de séparation des terres rares engendrent des externalités environnementales et sanitaires importantes (pollutions, etc.). En outre, elles requièrent de grandes quantités d'eau et cette consommation est amenée à croître en même temps que l'offre de terres rares, ce qui impactera directement les pays à fort stress hydrique comme la Chine et l'Australie.

[Guillaume Pitron](#), journaliste et réalisateur de documentaires, auteur de nombreux ouvrages, présente des données chiffrées sur les consommations des métaux nécessaires aux nouvelles technologies. Ainsi concernant l'éolien, il précise que pour fournir l'ensemble de la filière en suivant les développements demandés, il faudrait utiliser des milliards de tonnes d'acier, des centaines de millions de tonnes d'aluminium et des dizaines de millions de tonnes de cuivre. Il rappelle que 8 tonnes de roche sont nécessaires pour produire 1 Kg de vanadium. Il en faut jusqu'à 1 200 tonnes pour produire 1 Kg de lutécium (très cher et 10 tonnes de production annuelle).

En ce qui concerne l'approvisionnement de ces métaux, pour diminuer la dépendance de l'UE aux pays producteurs, il faudra favoriser l'extraction et la transformation de ces matières premières les plus importantes dans les pays de l'UE, en respectant les normes environnementales. Un secteur est très concerné à court terme, celui de l'automobile électrique avec les batteries électriques grandes consommatrices de matières stratégiques (lithium, cobalt, nickel, manganèse, graphite, etc.). La France possède des ressources minières dans son sol et dans la région Pacifique, Polynésie française et Nouvelle Calédonie.

Au sujet du recyclage de ces matières premières, bien qu'il ne puisse pas répondre à l'ensemble des besoins des pays, particulièrement de l'UE, une difficulté existe, c'est le faible développement de ces filières de recyclage. Extraire et recycler les métaux qui composent les montagnes de déchets technologiques que nous créons sans cesse est un enjeu considérable sur le plan technologique. Les procédés développés doivent être respectueux des normes environnementales et sociales.

Aussi l'intérêt stratégique de ces terres rares conduit les Etats et les industriels à chercher des produits de substitution de ces éléments. Des recherches sont menées et proposent des pistes très intéressantes, sans pour autant diminuer les qualités et les performances des produits créés.

Compte tenu du contexte international et du montant des investissements nécessaires ainsi que des impacts environnementaux et sociétaux, la question de la soutenabilité de la transition énergétique au regard des ressources sur lesquelles elle s'appuie directement - les métaux - ou indirectement - les besoins accrus en eau et en énergie, pourrait se poser.

Un changement de la façon de produire, de consommer et de recycler ces ressources doit porter à réflexion. La situation est telle que la création de matériaux toujours plus complexes (alliages, composites, etc.) rend de plus en plus difficile la séparation des métaux assemblés ! Cela peut se traduire par des actions telles que l'utilisation de matériaux renouvelables et recyclables, la conception d'objets modulaires et réparables à base de matériaux simples nano structurés.

L'Etat doit poursuivre et développer son soutien aux industriels, aux grands organismes de recherche, aux grandes écoles, aux laboratoires de recherche, aux jeunes sociétés à travers divers mécanismes de financement nationaux et internationaux. De nouvelles formations sont nécessaires pour éviter la disparition du savoir-faire dont dépend non seulement l'avenir, mais aussi le maintien d'activités industrielles. Un effort important de recherche est donc indispensable tant au niveau national qu'europpéen pour conserver une influence au niveau mondial, en mobilisant toutes les ressources intellectuelles pour répondre à ces enjeux, dans le respect de l'environnement et de l'humain.

Dans le cadre de la Présidence Française de l'Union Européenne ([PFUE](#)), les cinq alliances de recherche regroupant les organismes de recherche et universités françaises autour de cinq thèmes transversaux : énergie, environnement, numérique, santé et sciences humaines et sociales :

- Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie ([ANCRES](#))
- Alliance nationale de recherche pour l'Environnement ([AllEnvi](#))
- Alliance thématique nationale des sciences humaines et sociales ([ATHENA](#))
- Alliance des sciences et technologies du numérique ([ALLISTENE](#))
- Alliance nationale pour les sciences de la vie et de la santé ([Aviesan](#))

ont organisé une conférence « [Europe en transition : les défis pour la recherche et la formation](#) » à Strasbourg le 10 mars 2022.

« Les progrès de la recherche disciplinaire et de l'innovation sont en mesure d'apporter de nombreuses solutions. En revanche, alors que les problèmes sont largement systémiques, les approches de ceux-ci sont souvent menées en silos sectoriels... Les innovations doivent être de plus en plus hybrides, rassemblant un large spectre de technologies et de compétences issues de différentes disciplines. Travailler aux interfaces de différents domaines scientifiques - sciences du vivant, sciences physiques, sciences du numérique, sciences pour l'ingénieur et sciences humaines et sociales - contribuera à dynamiser les innovations systémiques nécessaires pour atteindre une société neutre en carbone et résiliente d'ici 2050 » [Source : [Énergie décarbonée, changement climatique, santé environnementale et biodiversité. Les cinq alliances de recherche s'engagent](#). Alliance Energie, 27 avril 2021].

Sources :

- [Europe en transition : les défis pour la recherche et la formation](#), Alliance Energie, Strasbourg, 10 mars 2022 ;
- [Les insuffisances européennes et françaises face à l'approvisionnement en minerais stratégiques](#), Pierre-Marie Durier, Portail-IE, 8 février 2022 ;
- [Et si les énergies renouvelables signaient le retour en force des mines en France ?](#) Millénaire 3, Veille, La prospective de la Métropole de Lyon, 3 janvier 2022 ;

- [Ressources en terres rares de l'Europe et du Groënland : un potentiel minier remarquable mais tabou ?](#) Nicolas Charles, Johann Tuduri, Gaetan Lefebvre, Olivier Pourret, Fabrice Gaillard, Kathryn Goodeneough, *In* : Boulvais P. & Decrée S. (Eds), Ressources métalliques : cadre géodynamique et exemples remarquables. ISTE Science Publishing Ltd-Wiley, 2021 ;
- [Energie décarbonée, changement climatique, santé environnementale et biodiversité. Les cinq alliances de recherche s'engagent](#), avril 2021 ;
- [Les terres rares dans la transition énergétique : quelles menaces sur les « vitamines de l'ère moderne » ?](#) Emmanuel Hache, Charlène Barnet, Gondia-Sokhna Seck, Les métaux dans la transition énergétique, n° 3, IFPEN, Janvier 2021 ;
- [Les terres rares, et après ?](#) Michel Latroche, CNRS Le Journal, 9 mai 2019 ;
- [Métaux rares : la face cachée de la transition énergétique](#), Guillaume Pitron, TedxLille, 28 juin 2018, (17:08) ;
- [L'épuisement des métaux et minéraux : faut-il s'en inquiéter ?](#) Alain Geldron, Technical Report, Juin 2017, Direction Économie circulaire et déchets - ADEME - Angers ;
- [L'Âge des low tech](#). Vers une civilisation techniquement soutenable, Philippe Bihouix, Essais, Seuil, avril 2014.

Pour le document global, quelques autres sites-sources

- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ([ADEME](#)) ;
- Agence internationale de l'énergie ([AIE](#)) ;
- Benchmark Mineral Intelligence ([BMI](#)) ;
- [Bibliothèque des Rapports publics](#) ;
- Bureau de Recherches Géologiques et Minières ([BRGM](#)) ;
- Conseil en stratégie, cartographie et analyse de données ([Cassini Conseil](#)) ;
- Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives ([CEA](#)) ;
- Centre Technique des Industries Mécaniques ([CETIM](#)) ;
- [Collège de France](#) ;
- Conseil mondial de l'énergie / World Energy Council ([CME](#)) ;
- Centre National de la Recherche Scientifique ([CNRS](#)) ;
- [Futurs énergétiques 2050. Principaux résultats](#), RTE France ;
- [L'Élémentarium](#) ;
- [Industrie & Technologies](#) ;
- Institut français des relations internationales ([IFRI](#)) ;
- Institut français du pétrole et des énergies nouvelles ([IFPEN](#)) ;
- Institut national de l'environnement industriel et des risques ([Ineris](#)) ;
- The International Renewable Energy Agency ([IRENA](#)) ;
- Joint Research Center ([JRC](#)) ;
- Le portail français des ressources minérales non énergétiques [Mineral Info](#) ;
- [Les Echos](#) ;
- National Minerals Information Center ([NMIC](#)) ;
- Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques ([OSFME](#)) ;
- Plateforme d'information des acteurs de l'environnement et de l'énergie, [Pollutec Learn & Connect](#) ;
- [Recherche et Avenir](#) ;
- Réseau de Transport d'Electricité français ([RTE](#)) ;
- Revue de l'Electricité et de l'Electronique ([REE](#)) ;
- [Statista](#), site portail allemand spécialisé dans l'analyse de données du secteur économique ;
- [Techniques de l'ingénieur](#) ;
- [La Tribune](#) ;
- Union des Industries et Métiers de la Métallurgie ([UIMM](#)) - La Fabrique de l'Avenir ;
- [Usine Nouvelle](#) ;
- [Wikipedia](#) ;

Quelques autres références

- [Ressources Transition et métaux rares : vraies et fausses alertes](#), Alternatives Economiques, 31 décembre 2021, Hors-série n°124, 01/2022 ;
- [L'extraction raisonnée : une opportunité pour un recyclage local des métaux stratégiques](#), Thomas Zemb, Jean-Christophe P. Gabriel. *In* : Conférence débat de l'Académie des Sciences, Paris, France, novembre 2021 ;
- [Rapport sur une stratégie européenne pour les matières premières critiques](#) (2021/2011(INI)), Document de séance A9-0280/2021, 12 octobre 2021, Commission de l'industrie, de la recherche et de l'énergie, Hildegard Bentele, Commissions associées - article 57 du règlement intérieur ;
- [Terres rares : défi écologique et géopolitique](#), Cité des Sciences et de l'Industrie, Bibliothèque, Zooms, sept.2021 ;

- [L'Année stratégique 2022](#), Sous la direction de Pascal Boniface, Armand Colin/IRIS éditions, septembre 2021 ;
- [Les états quantiques améliorés par des nanoparticules de terres rares](#), Diana Serrano, CNRS, 24 septembre 2020 ;
- [L'Union européenne espère sortir de sa dépendance aux terres rares ?](#) L.-M. Heusé, Portail-IE, 16 sept. 2020 ;
- [Matières premières et nouvelles dépendances](#), Annales des mines, n°99, juillet 2020 ;
- [Comment sont extraites les terres rares et pourquoi cela pollue autant ?](#) Frandroid, 29 octobre 2019 ;
- [Terres rares : notre ultra dépendance à la Chine](#), Olivier Soria, The conversation, 28 octobre 2019 ;
- [Les matériaux à base de terres rares : histoire, enjeux et perspectives](#), Journée de conférence, Institut de Chimie et des Matériaux Paris-Est, CNRS-UPEC, Thiais, 3 octobre 2019 ;
- [Terres rares](#), Valérie Buissette, Thierry Le Mercier, Techniques de l'ingénieur, n° J6630, 10 mai 2019 ;
- [L'ytterbium, la mémoire quantique de demain](#), Pierre Thouverez, Techniques de l'ingénieur, 20 août 2018 ;

Arctique, Russie

- [Métaux stratégiques : La guerre en Ukraine pourrait freiner la transition écologique de l'Union européenne](#), Novethic, 2 mars 2022 ;
- [Les terres rares en Arctique, un réel enjeu stratégique ?](#) F. Lasserre, A. Lerouge, Revue Diplomatique, Hors-série n°1, L'Arctique, enjeux et perspectives d'un nouveau pôle géopolitique, 1-21, novembre 2021 ;
- [La Russie et les terres rares, ancienne ressource, nouvelle politique](#), Nicolas Mazzucchi, L'Observatoire, Centre d'analyse de la CCI France Russie, 1^{er} novembre 2018 ;

Afrique

- [L'Afrique, alliée inattendue de l'Europe face à la domination chinoise sur les terres rares](#), Agence Ecofin, 18 juin 2021 ;
- [L'Afrique des ressources naturelles](#), Isabelle Ramdoo, International Institute for Sustainable Development (IISD), novembre 2019 ;
- [Terres rares : Afrique, une alternative à la Chine](#), Africanews, 6 juin 2019, vidéo (5:29) ;

Groënland

- [Terres rares : enjeu géopolitique du XXI^e siècle : Chine - Etats-Unis - Europe - Japon - Groënland](#), Damien Degeorges, collection « Un autre regard » dirigée par Georges Nurdin, Editions L'Harmattan, 25 février 2021 ;
- [Pourquoi le Groënland avive les appétits de la Chine et des USA : Excellentes explications](#), Damien Degeorges, CultureTops, 15 avril 2021 ;
- [L'exploitation des terres rares et de l'uranium, enjeu électoral au Groënland](#), Marie-Pierre Olphand, Radio France Internationale, 6 avril 2021 ;
- [Terres rares : « La face cachée peu reluisante du défi climatique n'a pas fini d'inquiéter les électeurs, du Groënland ou d'ailleurs »](#), Philippe Escande, le Monde, 8 avril 2021 ;
- [Le Groënland et ses terres si convoitées](#), Franceinfo, 7 octobre 2019 ;

Autres publications récentes du même auteur

- [Stockage d'énergie électrique : un regard sur les enjeux et les défis technologiques](#), IESF Côte d'Azur, Bull. n°1, p.10-22 (2022) ;
- [Aperçu des apports des technologies quantiques à la sécurité et à la défense](#). IESF Côte d'Azur, Bull. n°4, p.5-25 (2021) ;
- [Les technologies quantiques. Contexte et enjeux, applications et perspectives](#). IESF Côte d'Azur, Bull. n°2, p.8-29 (2021) ;
- [De la 5G à la 6G : contexte et enjeux !](#) IESF Côte d'Azur, Bull. n°4, p.13-23 (2020) ;
- [Les végétaux doués d'intelligence ? Aspects historiques et philosophiques. Eléments de synthèse des capacités cognitives et des mécanismes. Nouvelles approches bio-robotiques](#). IESF Côte d'Azur, Bull. n°3, p.10-25 (2020) ;
- [Biomimétisme, intelligence artificielle, robotique et applications de l'intelligence en essaim. Cybersécurité et questions d'éthique et de droit](#). Part.2, IESF Côte d'Azur, Bull. n°2, p.7-25 (2020) ;
- [Biomimétisme, intelligence artificielle et robotique. Applications de l'intelligence en essaim et questions d'éthique et de droit](#). Part.1, IESF Côte d'Azur, Bull. n°1, p.2-14 (2020) ;
- [Réflexions sur les enjeux de l'IA et les questions d'éthique](#), IESF Côte d'Azur, Bull. n°3, p.2-7 (2019) ;
- [La cobotique : quand les humains et les robots collaborent](#), IESF Côte d'Azur, Bull. n°2, p.3-7 (2019) ;
- [Les enjeux de la recherche et l'intelligence économique et stratégique](#), Techniques de l'Ingénieur, Octobre (2019) ;
- [Les laboratoires de recherche et la sécurité numérique](#). Part.1&2, IESF-Côte d'Azur, Bull. n°2, p. 3-5 / Bull. n°3, p. 5-7 (2018)