



IESF

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS ET
SCIENTIFIQUES DE FRANCE
CÔTE D'AZUR

BULLETIN

2022 – N°2

Editorial

Le rouleau compresseur ministériel est en marche

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

Jeu mathématique Sudoku

SOMMAIRE

1. Editorial	2
2. Actualité	3
2.1 Ukraine.....	3
2.2 Une image publicitaire vue dans le métro parisien le 06 avril 2022	3
2.3 Conférence de Jean-Pierre Rozelot	3
2.4 Vœux AFFI 2022 - 27 janvier 2002	3
3. Le rouleau compresseur ministériel est en marche	4
4. Conférence de J.P. Loubinoux	6
5. Journée en Provence le 21 mars 2022	9
6. Assemblé Générale Ordinaire du 31 mars 2022	11
7. Matières premières, métaux critiques, terres rares : Contexte international et enjeux	12
7.1 Le contexte international et les enjeux	13
7.2 Les terres rares.....	23
7.2.1 Quelques premières découvertes	23
7.2.2 Quelques rappels	23
7.2.3 Production, extraction et raffinage	24
7.2.4 Le recyclage : quelques actions du BRGM.....	25
7.2.5 France : Exploration de gisements dans les grands fonds sous-marins	27
7.3 Perspectives	28
7.4 Références.....	29
8. Jeu mathématique : Solutions du bulletin N°1 de 2022	31
9. Jeu mathématique :	32
10. Sudoku	33
11. Sur votre Agenda	33
12. Cotisations 2022	34

7. MATIÈRES PREMIÈRES, MÉTAUX CRITIQUES, TERRES RARES : CONTEXTE INTERNATIONAL ET ENJEUX

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

Résumé

Les métaux stratégiques ou critiques dont les terres rares, grâce à leurs propriétés physiques 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 en fin de 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, 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 the end of each chapter. Additional references are provided at the end of the article to further explore the subject.

Keywords

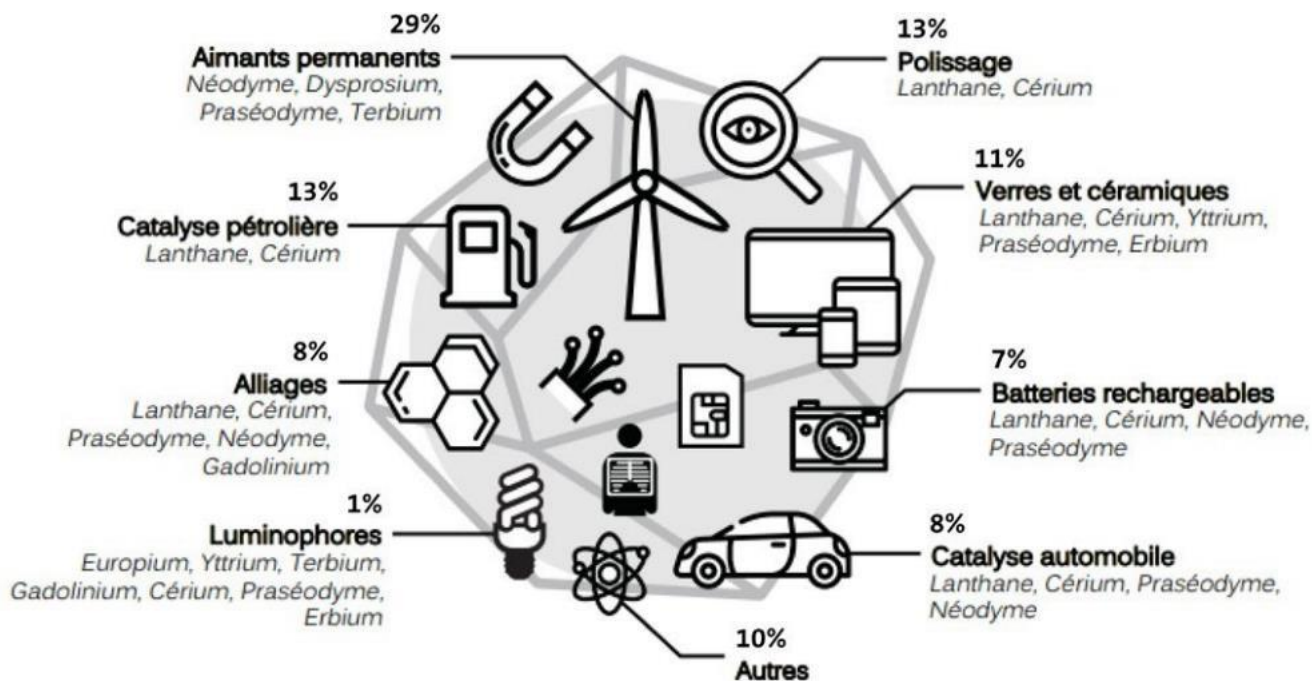
Rare earths, lanthanides, permanent magnets, raw materials, critical metals, strategic metals, energy transition, environment, natural resources, pollution, ores, mining, scarcity, recycling, substitution, supply, production, security, sustainability, resilience, issues, economy, society, strategy, industry,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

7.1 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.

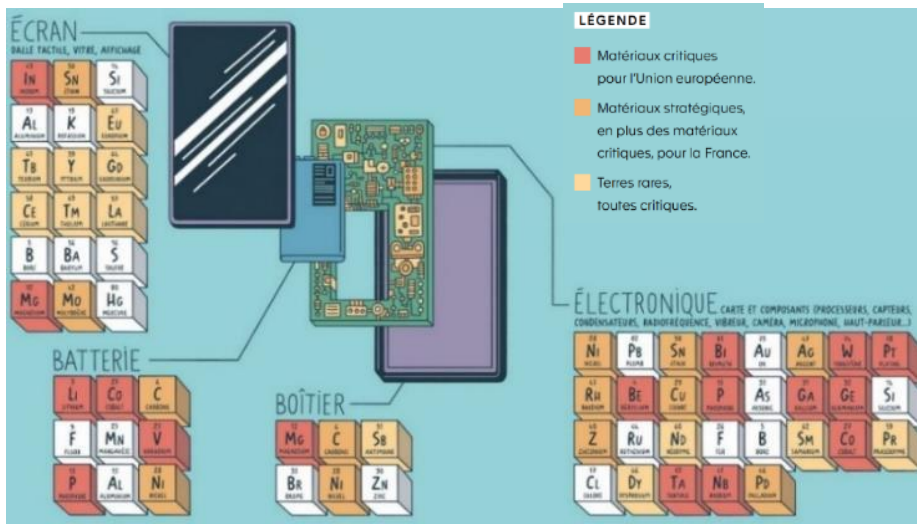


Bureau de Recherches Géologiques et Minières © [BRGM](#)

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 et 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.

*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 doté d'un budget de 53 millions d'euros sur 10 ans et 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 recyclable
- 15 % des smartphones mis sur le marché sont recyclés

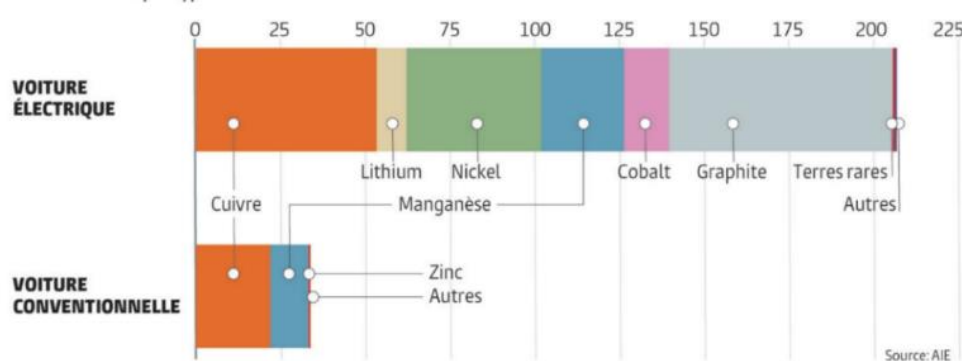
Source : [Les matières premières d'un smartphone](#) © J.Perrodeau, Défis du CEA, 27 juillet 2021

Si un smartphone ne contient en moyenne que 3 g de terres rares, une voiture peut en contenir jusqu'à quelques Kg alors qu'une éolienne offshore peut en compter quelques centaines 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 :

LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES, GRANDS CONSOMMATEURS DE MATÉRIAUX CRITIQUES

Kilos de métaux par type de véhicule



Voiture électrique ou conventionnelle et les matériaux critiques

Source : [Les terres rares font leur retour comme opportunité d'investissement](#), LeTemps, 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 à l'exportation de ces matières. La Commission Européenne a alors décidé, depuis 2011, de renforcer son plan d'action en dressant une liste de matériaux critiques, tous les trois ans. Elle en compte aujourd'hui 45. Cependant, 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	Terres rares légères : Cérium / Lanthane / Néodyme / Praséodyme / Prométhium / Samarium / Scandium	Terres rares lourdes : 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 % d'hafnium (utilisé notamment dans les réacteurs nucléaires de 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 Vietnam, 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 [Grinm 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.) engendrant ainsi une rente, au même titre que du gaz ou du pétrole. Concernant les terres rares, c'est [Rostec](#), société d'État russe fondée fin 2007, qui 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 onze 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 troisième ou quatrième 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 (DoD) a été adopté. En 2021, dans le plan d'investissement, sont prévus 140 millions de dollars de subventions programmés pour créer, aux Etats-Unis, un démonstrateur 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 de mener des recherches en collaboration 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.

Critical Minerals Mapping Initiative (CMMI)

ACTIVE

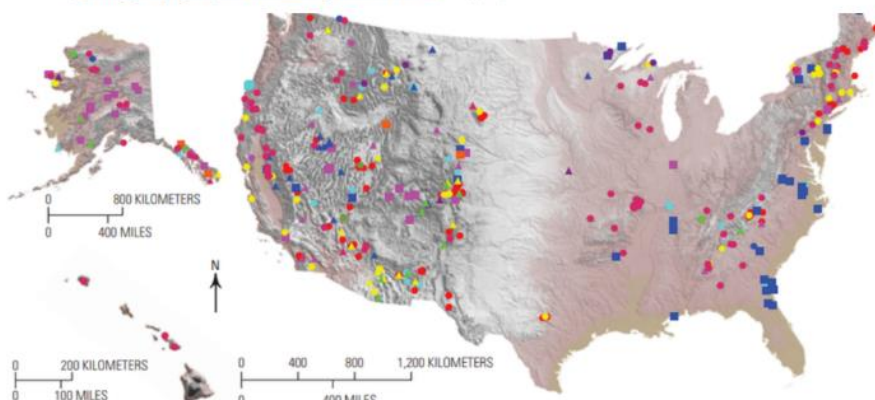
By [Geology, Geophysics, and Geochemistry Science Center](#) August 4, 2021

Critical Minerals

- | | |
|-------------|---------------------------|
| • Antimony | ▲ Manganese |
| • Barite | ▲ Niobium and Tantalum |
| • Beryllium | ▲ Platinum Group Elements |
| • Cobalt | ▲ Rare Earth Elements |
| • Fluorite | ▲ Rhenium |
| • Gallium | ▲ Tellurium |
| • Germanium | ▲ Tin |
| • Graphite | ■ Titanium |
| • Indium | ■ Vanadium |
| • Lithium | ■ Zirconium |

[Cartographie des ressources minérales critiques](#)

Geology, Geophysics, and Geochemistry Science Center August 4, 2021



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 économiques en connaissance efficiente, opérationnelle et sécurisée en prenant soin de détecter les menaces, 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.

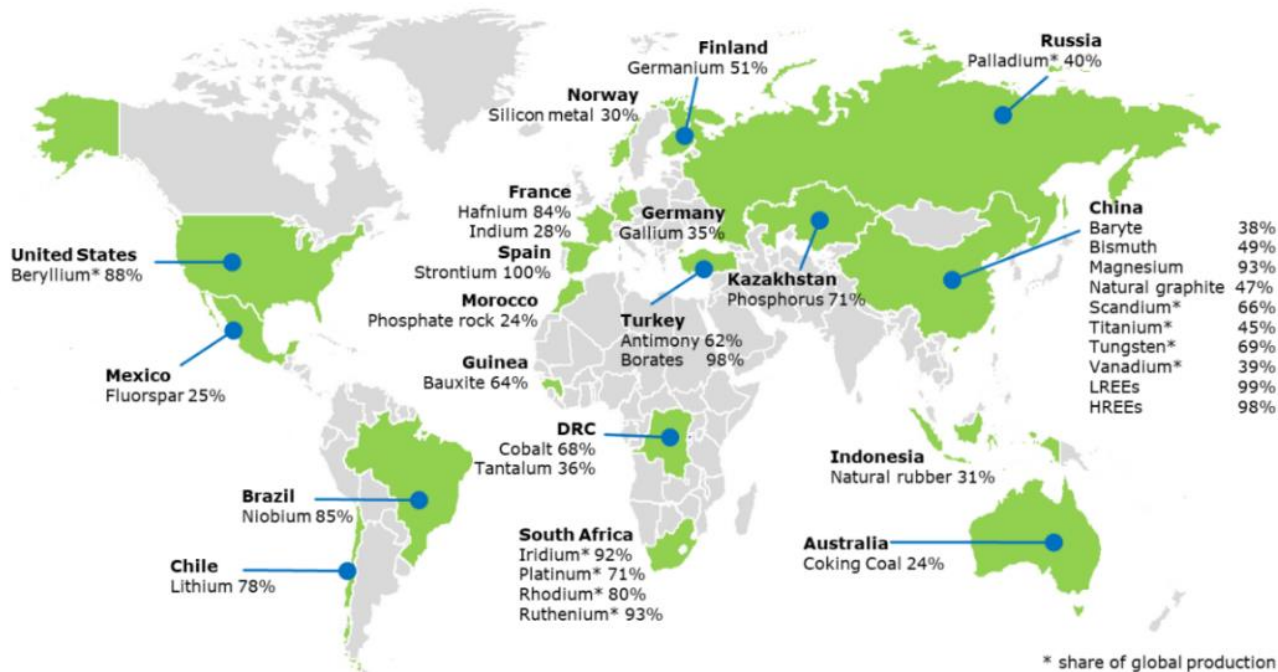
La *Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)* en tant qu'institution administrative indépendante du gouvernement japonais, a pour mission d'assurer un approvisionnement stable en pétrole, gaz naturel, métaux non-ferreux et ressources minérales. Son rôle est aussi de veiller à la constitution de stocks nationaux de trente éléments identifiés comme stratégiques en fonction des besoins du pays, des stratégies et besoins des Etats-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](#), Ambassade de France au Japon, Service pour la Science et la Technologie, D. Lecellier, S. de Bentzmann, avril 2019 ; J.-P. Damiano, [Les enjeux de la recherche et l'intelligence économique et stratégique](#), 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.

La situation est que 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 environ 1 %. Un autre exemple est celui des piles à combustible : l'UE en produit moins de 1 %.

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 nécessitent 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](#) 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 États. 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 (programme-cadre de recherche et d'innovation de l'UE) 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.

En ce qui concerne les batteries, il est intéressant de considérer les actions initiées par l'UE, car elles sont un élément stratégique de la transition énergétique et numérique ainsi que les technologies habilitantes associées indispensables 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'UE cherche ainsi à rattraper le Japon, la Chine, la Corée du Sud et les États-Unis sur la fabrication de batteries pour véhicules électriques et autres dispositifs de mobilité.

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 une meilleure compréhension de la situation et des développements engendrés, voici, ci-après, un aperçu de ces actions de l'UE depuis 2017 (*extrait source : [Stockage d'énergie électrique : un regard sur les enjeux et les défis technologiques](#), IESF-CA, janvier 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 de l'« Airbus des batteries », débuté en 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 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. Il a reçu un versement d'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. Ce financement public devrait permettre de mobiliser 9 Md€ supplémentaires en investissements privés. Selon Maros Sefcovic, vice-président de la Commission européenne en charge de l'énergie entre 2014 et 2019, 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](#), a pour objectif de réduire le prix des batteries destinées aux transports de 60% et d'augmenter leur capacité également de 60%, pour une commercialisation en 2030 : 925 M€ sont mobilisés.

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 giga-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. 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 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. Il rivaliserait ainsi avec des groupes tels que l'américain Tesla qui va lancer courant 2022 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]. Pour information, Tesla a ouvert officiellement [sa gigafactory de Grünheide](#), au sud-est de Berlin, le 22 mars 2022. Elle devrait devenir la plus grande en Europe en termes de volume produit (jusqu'à 500 000 véhicules/an). De plus elle offrirait de nombreuses innovations sur la conception des voitures, des batteries, la peinture, etc.



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

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 créer un continuum de services du *Cloud à l'Edge* (analyse des données au plus près de l'objet connecté) et d'avoir un stockage de données qui soit véritablement souverain. Cela permettra de financer plus de 60 projets, avec 180 entreprises européennes participantes. Mais au vu du contexte dans ce domaine, 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% de ce marché. [Source : [Transformation numérique](#), inCyber, 11 février 2022]
- Dans l'objectif de diversifier l'approvisionnement des industriels européens, l'alliance européenne pour les matières premières ([ERMA](#)) a identifié 14 projets d'extraction ou de recyclage des terres rares en Europe (1,7 M€ d'investissement estimés). Elle recommande fortement et soutient la mise en place d'un PIIEC pour les aimants permanents, pour lequel quatre Etats sont déjà très intéressés. S'il était créé rapidement, 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 de l'usine de Solvay à la Rochelle qui était la seule unité européenne de recyclage de terres rares.

[Sources : [Les Echos](#), 13 janvier 2022 ; [L'Usine Nouvelle](#), 1^{er} octobre 2021 ; [IndustriAll](#) 129/2021, 10 juin 2021 ; [Flottes Automobiles](#), 9 décembre 2019]

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](#), Vie publique, Jacques Percebois, 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 stratégie, [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 des fonds européens, des États membres et de fonds privés, dans des secteurs majeurs de l'économie (Europe : numérique, climat et énergie, transports, santé, éducation et recherche).

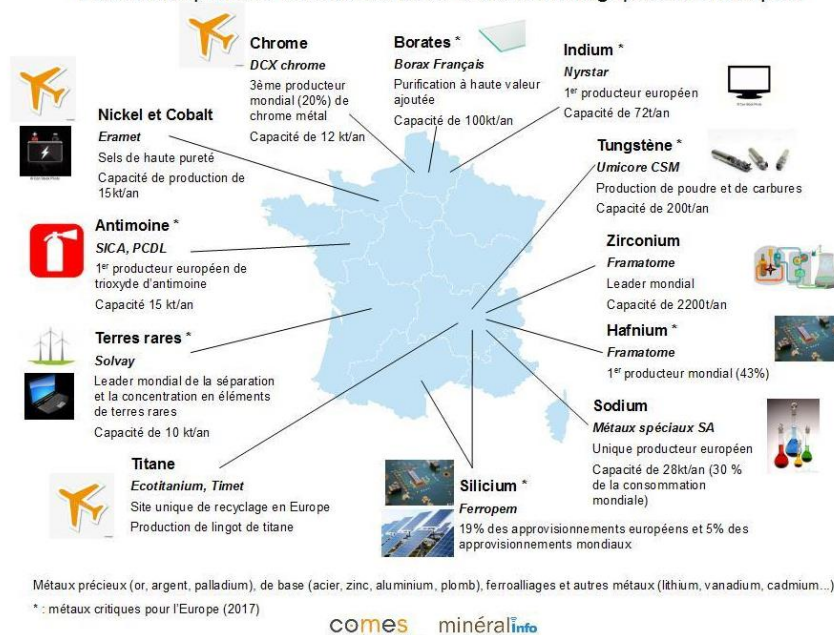
Le plan Global Gateway, inscrit sa stratégie dans la continuité des objectifs de développement durables et de l'Accord de Paris. La présidente de la Commission européenne, Ursula von der Leyen, déclarait : « *Nous soutiendrons les investissements intelligents dans des infrastructures de qualité, qui 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](#) (juin 2021), regroupant 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, environ 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. Ce rapport a été rédigé en se fondant 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 comme 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, suite de la remise du rapport Varin, il a été décidé de créer auprès du Bureau de recherches géologiques et minières ([BRGM](#)), un des plus grands acteurs mondiaux dans la connaissance et la maîtrise du sous-sol, un observatoire des métaux critiques. Constitué 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 de 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 regroupe 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](#), de l'Union des industries et métiers de la métallurgie ([UIMM La fabrique de l'Avenir](#)).*

Production primaire et secondaire de métaux stratégiques en Métropole



Le gouvernement français a lancé le plan d'investissement [France 2030](#) doté de 30 milliards d'euros 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.

Il reprend 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.

Ce plan d'investissement France 2030 doit permettre au pays de réaliser sa transition énergétique et numérique, en restant compétitif sur le plan industriel. Le montant de l'investissement, 30 milliards d'euros, vient s'ajouter aux précédents plans d'investissements, ciblant des secteurs industriels pour leur un rôle central dans les transitions à venir.

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.

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](#), 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.
- 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. Créé en 2011 et renouvelé pour 2019-2024, 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.
- 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. 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 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 géométallurgie 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.

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

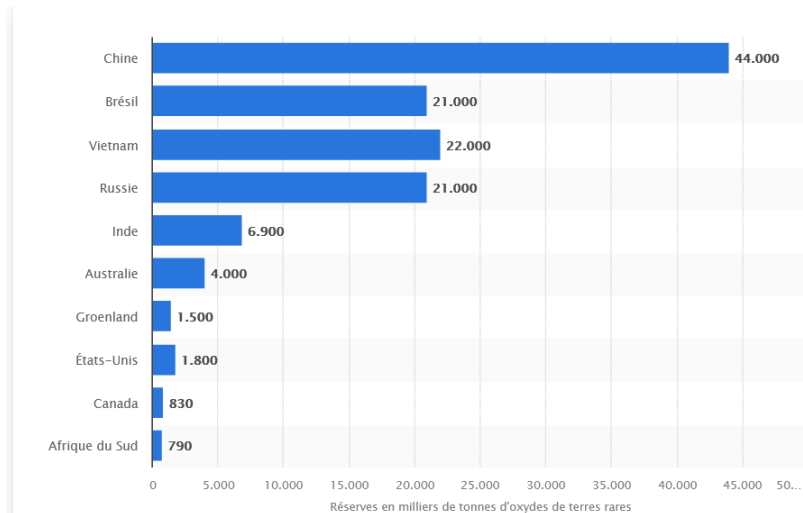
Sources :

- [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](#), Statista, Tristan Gaudiaut, 8 fév. 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.1, p.10-22 (2022) ;
- Nicolas Charles, Johann Tuduri, Gaetan Lefebvre, Olivier Pourret, Fabrice Gaillard, Kathryn Goodenough, 2021. [Ressources en terres rares de l'Europe et du Groënland : un potentiel minier remarquable mais tabou ?](#) In : Boulvais P. & Decrée S. (Eds), Ressources métalliques : cadre géodynamique et exemples remarquables. ISTE Science Publishing Ltd-Wiley ;
- Jacques Percebois, [L'énergie racontée à travers quelques destins tragiques](#), Éditions Campus Ouvert, 2^{ème} édition, sept. 2021 ;
- [La Géopolitique des Terres rares](#), Geopragma, Christopher Coonen, 12 juillet 2021 ;
- [L'autonomie stratégique européenne concerne aussi les matières premières critiques. Quel bilan dix ans après la crise des Terres Rares ?](#) Diploweb.com, La revue géopolitique, Maxime Berri, 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 ;
- Jean-François Guilhaudis, Jacques Fontanel, [Les terres rares et autres matériaux critiques et stratégiques, au cœur des conflits de demain ?](#) Paix et sécurité européenne et internationale, université Côte d'Azur 2021 ;
- Rapport CyclOpe : Rapportée par Le portail français des ressources minérales non énergétiques ([Mineralinfo.fr](#)), l'extraction des chapitres « [Métaux Electriques](#) » et « [Petits Métaux](#) », issus de ce 35^{ème} rapport - [Les Marchés Mondiaux 2021](#), Ed. Economica. Rédaction par le BRGM suite aux conventions signées BRGM - CyclOpe et Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DGALN/DEB) du ministère de la Transition Écologique (MTE) ;
- [Les « terres rares », au cœur des conflits économico-politiques de demain](#), Jacques Fontanel, Conflits et guerres économiques, ILERI, Paris, Janvier 2021 ;
- Camille Bortolini, [La guerre des terres rares aura-t-elle lieu ?](#) 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 ?](#) Learnandconnect.pollutec, Hélène Bouillon-Duparc, 6 nov. 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 ;
- [Rapport sur la gestion durable des matières premières minérales](#) déposé au nom de la mission d'information 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.

7.2.3 PRODUCTION, EXTRACTION ET RAFFINAGE

Selon les fiches du site [Atlas sociologique mondial](#), jusqu'en 1948, la plupart des terres rares du monde proviennent de gisements de sable de placer situés en [Inde](#) et au [Brésil](#). Dans les années 1950, l'[Afrique du Sud](#) devient la principale source mondiale d'oxydes de terres rares grâce au gisement riche en monazite de la mine de Steenkampskraal, dans la province du Cap occidental. À partir du milieu des années 1960, les [États-Unis](#) occupent une place importante dans la production mondiale de terres rares et ce, jusqu'à la fin des années 1980 avec l'exploitation de la mine de Mountain Pass, en Californie, qui fermera en 2002.

Sur la période 1990 à 2010, de nouveaux gisements sont exploités en [Australie](#), en [Russie](#), en [Inde](#), au [Brésil](#) et en [Malaisie](#). Cependant, la [Chine](#) conserve son avance en termes de production d'oxydes de terres rares devant l'Australie, les États-Unis, et d'autres pays qui développent leurs activités minières comme la [Birmanie](#), le [Burundi](#), la [Thaïlande](#) et le [Viêt Nam](#). Les [États-Unis](#) décident de relancer l'industrie américaine des terres rares, notamment par la réouverture de la mine Mountain Pass en 2013. Le [Canada](#) et l'[Afrique du Sud](#) envisagent de nombreux projets de prospection, y compris dans les fonds marins.



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 et, plus récemment, le Myanmar et la Thaïlande ont commencé à en extraire des quantités considérables.

Comme le révèle notre graphique, les États-Unis ont relancé leur production quand ces métaux sont devenus indispensables aux nouvelles technologies.

Pays comptant les plus grandes réserves de terres rares en 2021 (en milliers de tonnes d'oxydes de terres rares) [Statista 2022](#)

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, fluocérite, fluorine, gadolinite, monazite, parisite, stillwellite, synchysite, titanite, wakefieldite, xénotime, zircon.



Par exemple, 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 se trouvent à Mountain Pass en Californie, à Bayan Obo en Mongolie intérieure et dans diverses exploitations au Sichuan en Chine.

Cristal de bastnäsite-cérium. *Source* : [Frandroid](#), 2021

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. Les principaux états producteurs d'oxydes de terres rares sont la Chine, l'Australie, les États-Unis, la Birmanie et la Russie.



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 États-Unis extrait environ 15 % des terres rares dans le monde. © Steve Marcus/REUTERS



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



Gakara est 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](#)

Contenues dans des minerais (monazites diverses, carbonatites, etc.) et des alliages, 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.

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 repose alors sur différentes techniques qui peuvent parfois être utilisées conjointement.

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 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.
- La pyrométallurgie constitue souvent une approche concurrente ou complémentaire : on peut ainsi d'abord faire fondre en conditions réductrices des téléphones portables et récupérer les métaux les plus intéressants dans une phase de cuivre en fusion.
- Suivant les cas à traiter, des procédés de chimie fine, extractive, séparative, peuvent être aussi mis en œuvre (cas pour la monazite qui contient des terres rares).

7.2.4 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 déchets des équipements électriques et électroniques ou D3E (ordinateurs, smartphones, micro-ondes, par exemple) constitue un enjeu. L'Europe constitue 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, le projet VALOMAG regroupe le BRGM, le CEA, Suez, deux universités néerlandaises (Université de technologie de Delft, Université de Leiden) et l'entreprise allemande Kollector Magnet Technology. Lancé en janvier 2020, il a pour objectif de mettre au point des techniques efficaces pour extraire et valoriser les aimants permanents (méthode de broyage et de dissolution du matériau). Le BRGM réalise des pilotes de démantèlement à grande échelle des disques durs d'ordinateurs. 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.

Sources :

- [Dossier Terres rares](#), L'[Élémentarium](#) : nouveau site internet dédié aux éléments du tableau périodique pour tout savoir sur les comportements physique et chimique des 118 éléments, allant de l'hydrogène ^1H à l'oganesson ^{118}Og ;
- [What is mischmetal ?](#) Blog Greelane indépendant [Ressource éducative](#) ;
- [Le recyclage des métaux indispensable à la transformation de l'économie](#), Pascale Megardon-Auzepy, Crédit agricole, podcast 21 janv. 2022 ;
- [Terres rares contre semi-conducteurs : une course de fond technologique aux enjeux géopolitiques](#), Anne Kraatz, juil.2021 ;
- [Ressources minérales : les terres rares](#), BRGM, 10 juin 2021 ;
- [Que sont les terres rares, ces matières premières stratégiques ?](#) Atlas sociologique mondial, [Atlasocio.com](#), 20 déc. 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.

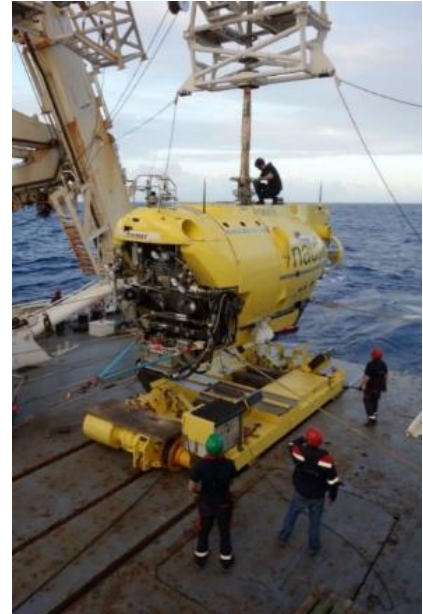
7.2.5 FRANCE : EXPLORATION DE GISEMENTS DANS LES GRANDS FONDS SOUS-MARINS

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 le Nautilus, le même utilisé en 1987 pour explorer le Titanic. 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 : [lfremer.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 Nautilus.

Source : [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 écosystèmes 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 -1700 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](#), Les Echos, Muryel Jacque, 9 février 2022 ;
- [Haute mer : il est encore très difficile de savoir les ressources réelles qui se trouvent dans les grands-fonds](#), Liberation.fr, Aurore Coulaud, 9 février 2022 ;
- [La France étend son territoire sous-marin dans l'océan indien](#), Les Echos, 11 juin 2020.

7.3 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 devront 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 la 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, il pourrait se poser 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.

Ainsi un changement de la façon de produire, de consommer et de recycler ces ressources doit être réfléchi. 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. Les instances étatiques doivent poursuivre et développer leur soutien aux industriels, aux laboratoires de recherche, aux jeunes sociétés à travers divers mécanismes de financement internationaux et nationaux, avec des cursus de formation adaptée aux étudiants en mobilisant toutes les ressources intellectuelles du pays pour répondre à ces enjeux, dans le respect de l'environnement et de l'humain.

Sources :

- [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 ;
- Nicolas Charles, Johann Tuduri, Gaetan Lefebvre, Olivier Pourret, Fabrice Gaillard, Kathryn Goodenough, 2021. [Ressources en terres rares de l'Europe et du Groënland : un potentiel minier remarquable mais tabou ?](#) In : Boulvais P. & Decrée S. (Eds), Ressources métalliques : cadre géodynamique et exemples remarquables. ISTE Science Publishing Ltd-Wiley ;
- Emmanuel Hache, Charlène Barnet, Gondia-Sokhna Seck, [Les terres rares dans la transition énergétique : quelles menaces sur les « vitamines de l'ère moderne » ?](#) 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 ?](#) Technical Report, Jun 2017, Alain Geldron, Direction Économie circulaire et déchets - ADEME – Angers ;
- [L'Âge des low tech](#). Vers une civilisation techniquement soutenable, Philippe Bihouix, Essais, Ed. Seuil, avril 2014.

7.4 RÉFÉRENCES

Quelques autres sites-sources

- L'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, Octobre 2021
- [Élémentarium](#)
- [Industrie & Technologies](#)
- Institut français des relations internationales ([IFRI](#))
- Institut français du pétrole et des énergies nouvelles ([IFPEN](#))
- 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](#)
- 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](#)
- [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 ;
- Thomas Zemb, Jean-Christophe P. Gabriel. [L'extraction raisonnée : une opportunité pour un recyclage local des métaux stratégiques](#). 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, Rapporteuse : Hildegard Bentele (*) Commissions associées – article 57 du règlement intérieur ;
- [Terres rares : défi écologique et géopolitique](#), Cité des Sciences et de l'Industrie, Bibliothèque, Zooms, septembre 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](#), CNRS, Diana Serrano, 24 septembre 2020 ;
- [L'Union européenne espère sortir de sa dépendance aux terres rares ?](#) *Portail de l'IE*, Louis-Marie Heusé, 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](#), *The conversation*, Olivier Soria, 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'yttrium, la mémoire quantique de demain](#), *Techniques de l'ingénieur*, Pierre Thouverez, 20 août 2018 ;
- [Métaux rares : la face cachée de la transition énergétique](#), Guillaume Pitron, *TedxLille*, 28 juin 2018, (17:08) ; *Arctique, Russie*
- [Métaux stratégiques : La guerre en Ukraine pourrait freiner la transition écologique de l'Union européenne](#), Novethic, mars 2022 ;

- F. Lasserre, A. Lerouge, [Les terres rares en Arctique, un réel enjeu stratégique ?](#) *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](#), L'Observatoire, Centre d'analyse de la CCI France Russie, Nicolas Mazzucchi, 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](#), *International Institute for Sustainable Development (IISD)*, Isabelle Ramdoo, nov. 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 »](#), le Monde, Philippe Escande, 8 avril 2021 ;
- [Le Groënland et ses terres si convoitées](#), *Franceinfo*, 7 octobre 2019 ;

Autres publications de J.-P. Damiano dans le Bulletin IESF Côte d'Azur

- [Stockage d'énergie électrique : un regard sur les enjeux et les défis technologiques](#), IESF Côte d'Azur, Bull. 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 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).

Jean-Pierre Damiano

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

Membre IESF-Côte d'Azur et URSI-France

jean-pierre.damiano@univ-cotedazur.fr