



André Dalmasso

Mars 2026

Les Terres Rares

1. Introduction

En 2014 les Plumes (N°58) ont publié un article intitulé « terres rares : vers la pénurie ? ». Douze ans plus tard il est apparu important de revenir sur le sujet. C'est l'objet du présent document.

Cette étude présente une synthèse sur les terres rares : définition, propriétés chimiques et physiques, typologies des gisements, principales applications industrielles, chaîne de valeur (extraction → raffinage → composants), répartition géographique des ressources et de la production, enjeux stratégiques et sociaux.

Les « terres rares » regroupent un ensemble d'éléments chimiques indispensables à de nombreuses technologies modernes. Leur importance a fortement augmenté en raison de l'essor des techniques de la transition énergétique, de l'électronique grand public, des systèmes de défense, des équipements de télécommunication et récemment de l'intelligence artificielle (IA).

Il convient d'abord de tenter d'apporter quelques précisions terminologiques. Les médias parlent, souvent sans préciser, de métaux critiques, de métaux rares, de matériaux stratégiques, de terres rares.

Mise à jour en 2022, la liste de l'United States Geological Survey (USGS) inclut cinquante métaux désignés comme « critical minerals ». La liste inclut les terres rares telles que définies ci-dessous.

La liste de la Commission Européenne (CE) de 2023 englobe cinquante et une « matières premières critiques » dont les terres rares.

Les terres rares sont généralement désignées dans les documents USGS et CE sous le sigle REE « rare earth elements », autrement dits éléments de terres rares ETR.

2. Définition et classification

Les terres rares sont constituées de dix-sept éléments : les 15 lanthanides (lanthane → lutécium) plus l'yttrium (Y) et le scandium (Sc).

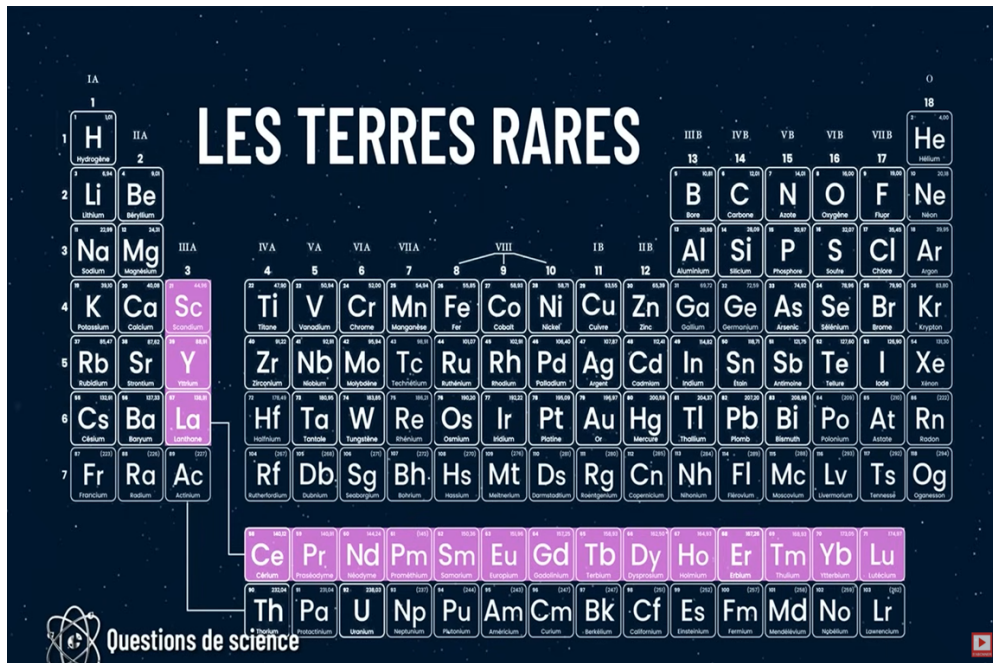
On distingue généralement les terres rares légères et lourdes.

- **Terres rares légères** : lanthane La, cérium Ce, praséodyme Pr, néodyme Nd, prométhéum Pm, samarium Sm.

- **Terres rares lourdes** : europium Eu, gadolinium Gd, terbium Tb, dysprosium Dy, holmium Ho, erbium Er, thulium Tm, ytterbium Yb, lutécium Lu, yttrium Y.

Leur situation dans le tableau de Mendeleïev leur donne des propriétés chimiques voisines, ce qui rend très difficile leur séparation.

Leurs électrons 4f (sous couche 4f de l'atome) sont les électrons clé qui donnent aux terres rares leurs caractéristiques extraordinaires : propriétés magnétiques, optiques et catalytiques uniques (luminescence, fortes aimantations).



3. Principales applications

a. Aimants permanents

- Intégrés dans les aimants haute performance utilisés pour le refroidissement des UTG, (Unités de Traitement Graphiques), le néodyme, le terbium et le dysprosium sont indispensables dans les data centers et l'IA. La stabilité thermique doit être maintenue car les UTG chauffent énormément.
- Le néodyme joue un rôle essentiel dans les moteurs à haute précision des robots de lithographie essentiels pour la fabrication de semi-conducteurs.
- Les terres rares sont présentes dans une multitude d'autres applications : les moteurs synchrones pour éoliennes en mer ; les véhicules électriques et hybrides ; les moteurs de traction ferroviaire ; les machines-outils et robots industriels ; les moteurs de servo-entraînement pour la robotique ; les vélos et trottinettes électriques ; les outils électriques portatifs ; les organes des pc etc.

b. Le cérium

Il est indispensable pour le polissage des wafers de silicium dans les processeurs et cartes graphiques. Sans oxyde de cérium, il est impossible d'obtenir des surfaces extrêmement lisses. Depuis la fin du 19^e siècle, il est utilisé pour polir les verres des lunettes.

c. Les catalyseurs

Catalyseurs d'échappement, le raffinage du pétrole et la chimie, sont tributaires du cérium et du lanthane.

d. Le lanthane

C'est un composant essentiel de l'électrode négative des accumulateurs Nickel-Hydrure Métallique (voitures électriques et hybrides).

e. Optoélectronique

Trois terres rares sont impliquées : l'europium émetteur rouge (LEDS, OLED, ...) ; le terbium (lumière verte très stable) ; l'yttrium (il est stable, supporte les hautes températures, bénéficie d'une excellente transmission de la lumière).

- Lasers : l'application la plus notable de l'yttrium est dans le cristal de grenat d'yttrium-aluminium YAG. Ce cristal présente des propriétés physiques et thermiques idéales pour la fabrication de lasers, notamment une bonne conductivité thermique, vitale pour dissiper la chaleur et une bonne qualité optique. Les lasers Nd-YAG sont extrêmement polyvalents, ils sont utilisés : en médecine (ophtalmologie, dermatologie, lésions,

chirurgie) ; dans l'industrie (soudage, perçage, marquage des métaux) ; dans la défense et la recherche (télémétrie, optique, physique des plasmas).

- Les terres rares sont utilisées aussi dans les écrans, les systèmes optiques, les cartes des casques, etc.

f. Applications de défense et aérospatiales

Avions civils, tanks, fusées, missiles intelligents, etc. dépendent fortement des terres rares. Dans l'aviation militaire, les alliages d'aluminium et de scandium (moins de 1%) améliorent de 30 à 50 % la résistance mécanique et se caractérisent par une grande rigidité et une excellente résistance à la chaleur.

g. Applications au nucléaire

- **Réacteurs nucléaires** : le gadolinium est utilisé comme poison neutronique consommable dans le combustible des réacteurs nucléaires sous forme d'oxyde de gadolinium, afin de compenser l'excès de réactivité du combustible neuf. Au fur et à mesure de l'irradiation, le gadolinium transmute libérant progressivement la réactivité qu'il bloquait. Cela permet d'allonger la durée des cycles et d'aplatir la distribution de puissance dans le cœur des REP notamment.

Il est aussi intégré comme agent de sûreté nucléaire dans les barres de contrôle.

Il peut être aussi injecté comme liquide dans le modérateur pour arrêter rapidement la réaction en chaîne en cas d'urgence.

- **Gestion du combustible usé** : le gadolinium est utilisé comme inhibiteur de criticité à la dissolution du combustible usé pour les hautes teneurs en matières fissiles comme dans le cas du combustible des RNR.

4. Substituts et innovations

Comme nous le verrons aux § 7 et 8, les métaux de terres rares sont aujourd'hui produits à plus de 90 % en Chine.

La recherche porte : sur la faisabilité d'alliages moins dépendants des terres rares lourdes, sur le développement d'aimants sans terres rares et sur l'optimisation des systèmes pour réduire les quantités requises.

Cette recherche a entraîné des initiatives françaises et européennes, pour la création de filières souveraines de substitution de matières premières relatives aux aimants permanents. Le projet national Magnolia (cf. § 5), s'inscrit dans cette démarche.

Plusieurs technologies, déjà maîtrisées par le CEA, seront développées dans l'objectif de création à court terme d'une ligne pilote pour la production de quatre tonnes par an d'aimants permanents.

Ce projet consiste en :

- Substitution du néodyme par des terres rares plus abondantes, comme le cérium et le lanthane, pour certaines applications,
- Localisation par diffusion des terres rares lourdes aux joints de grains des aimants frittés, afin de réduire les teneurs en matériaux critiques,
- Utilisation du procédé de moulage par injection de poudre de pièces unitaires, dans l'objectif de supprimer les pertes de matière qui surviennent aujourd'hui lors de la découpe des blocs d'aimants.

5. Recyclage et économie circulaire

Le recyclage des aimants et des composants électroniques est une voie prioritaire pour réduire la dépendance à l'extraction primaire, mais il reste coûteux et techniquement complexe.

Orano et le CEA ont associé leur savoir-faire et donné naissance, sur le site du CEA Liten à Grenoble, à un nouveau pilote en vue de tester des procédés de recyclage.

Ce pilote contribue à deux consortiums.

- Magnolia : il est constitué de cinq acteurs, Orano est le coordonnateur, il vise à initier une filière industrielle française de recyclage et de fabrication d'aimants permanents à base de terres rares. Elle est associée à la collecte et au démantèlement de moteurs électriques usagés. Le recyclage est fait en boucle courte, via le processus de poudre. L'enjeu réside aussi, dès la conception, à faciliter la collecte et le démantèlement des équipements en fin de vie.

- Magellan : son objet est la création d'une chaîne de valeur européenne pour le recyclage et la fabrication des aimants permanents. Il englobe quatorze acteurs clés de huit pays européens, Orano étant le coordonnateur de la partie française. Le recyclage est fait en boucle courte, via le processus de fusion.

6. Géologie et types de gisements

Le terme « terres rares » peut prêter à confusion ; en réalité il y en a en divers endroits dans la croûte terrestre, mais leur extraction est fonction de multiples facteurs : concentration, accessibilité, acceptabilité écologique, maîtrise technique de l'extraction et du traitement, coût des investissements nécessaires, durée de mise en œuvre et enfin de la volonté politique.

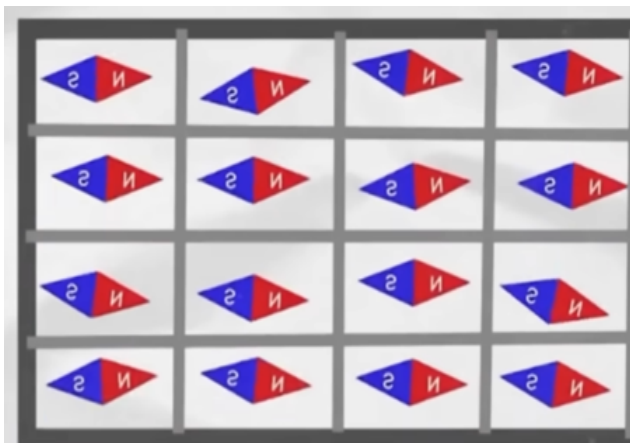
Les principaux types de gisements exploitables sont les carbonatites (bastnäsite, monazite), les argiles d'absorption ionique (notamment pour certaines terres rares lourdes en Asie du Sud-Est), et les dépôts associés à des phosphates ou sables minéralisés.

Les carbonatites sont les plus grands gisements, riches en lanthanides légers, par exemple le gisement de Bayan Obo en Chine. La bastnäsite est le minéral phare des terres rares légères, très exploité. La monazite est riche mais souvent radioactive. Les argiles d'absorption ionique constituent les meilleures sources de lanthanides lourds (sud de la Chine, Birmanie).

7. Chaîne de valeur complète

Nous proposons à titre d'exemple de parcourir les grandes étapes qui vont de la mine au néodyme. Exploration → extraction → concentration → traitement chimique (production d'oxydes de terres rares) → séparation et raffinage → métallurgie et fabrication de composants (aimants, phosphores, catalyseurs).

- 1- Le néodyme se trouve principalement dans des minerais comme la bastnäsite, la monazite ou le xénotime. Le minerai est concassé, broyé puis soumis à des procédés de flottation ou séparation gravimétrique pour concentrer les terres rares.
- 2- Puis viennent la lixiviation et séparation des terres rares. L'objectif est d'obtenir des oxydes de néodyme (Nd_2O_3) de haute pureté. Les concentrés sont dissous dans des solutions d'acide sulfurique (filiale monazite), ou nitrique ou chlorhydrique. La séparation par extraction liquide-liquide est très complexe car les terres rares ont des propriétés chimiques très proches. On utilise des solvants organiques pour séparer le néodyme, le praséodyme, le lanthane, le cérium, etc. (Remarque : une nouvelle chaîne de séparation et purification de néodyme a démarré en 2025 en France dans le site Solvay à La Rochelle). Puis par précipitation et calcination on obtient des oxydes de néodyme d'une pureté supérieure à 99 %.
- 3- Transformation en métal de néodyme. La réduction métallo thermique est faite par fusion ou distillation, suivie d'une purification supplémentaire. A l'issue de cette étape, on obtient du néodyme métallique.
- 4- Fabrication de l'alliage néodyme-fer-bore. Le néodyme est allié avec du fer et du bore et parfois des additifs tels que dysprosium et terbium. Puis viennent les opérations de mélange, fusion sous vide ou atmosphère inerte et coulage rapide pour obtenir un alliage homogène.
- 5- La pulvérisation est faite par broyage mécanique ou mouture par jet de gaz dans le but d'obtenir des grains d'environ 3-5 microns. La poudre de Nd-Fe-B doit être extrêmement homogène car la qualité de l'aimant en dépend.
- 6- Pour l'orientation magnétique, la poudre est placée dans un champ magnétique intense afin que les grains s'orientent selon une direction optimale. Cette étape est cruciale. On réalise alors un pressage uni axial dans le champ pour améliorer la densité.
- 7- Le frittage nécessite de chauffer le métal à 1000-1100 °C sous atmosphère contrôlée ; les particules se soudent formant un aimant massif fritté dont la densification est proche de 100 %. On effectue ensuite un traitement thermique pour stabiliser les propriétés magnétiques.
- 8- Les aimants en Nd-Fe-B sont très durs et cassants, pour l'usinage on utilise la découpe au fil et la rectification au diamant. Les tolérances sont de quelques centièmes de millimètre.
- 9- Revêtements protecteurs : les aimants étant très sensibles à la corrosion, on applique le nickelage Ni-Cu-Ni ou bien d'autres traitements spéciaux.
- 10- Aimantation finale. L'aimant est placé dans un champ magnétique très puissant pour fixer son orientation définitive. Cette haute énergie magnétique est indispensable pour l'utilisation dans les moteurs électriques, les générateurs d'éoliennes, les disques durs, les écouteurs haute performance etc.



8. Répartition mondiale des ressources et production

L'extraction et la production sont géographiquement concentrées : la Chine possède les plus grandes mines connues et domine la production et surtout le raffinage, tandis que l'Australie, les États-Unis et d'autres pays cherchent à augmenter leur production et capacités de traitement. Voir la carte jointe page 6 qui donne la répartition et l'exploitation actuelle, ainsi que les projets dans le monde.

Production en 2024 des pays leaders
 Exprimée en tonnes d'oxyde de terres rares

• CHINE	270. 000
• ÉTATS UNIS	45. 000
• MYANMAR (Birmanie) Elle dépend fortement de la Chine pour le raffinage	31. 000
• AUSTRALIE (chiffre de 2023, arrêt entretien 2024)	16. 000
• INDE	2. 900
• RUSSIE	2. 500
•	
• TOTAL	370 390. 000

9. Enjeux, marché, perspectives, gisements

a. Enjeux économiques et géopolitiques

La **Chine** est la superpuissance des terres rares : 60-70 % de la production mondiale. Elle est dominante pour le néodyme, le dysprosium, le terbium, le prométhéum. La concentration du raffinage (85-90 % en Chine) crée des vulnérabilités critiques ; le fabricant de processeurs et cartes graphiques NVIDIA, chef de file mondial de l'IA, dépend fortement de la Chine pour les aimants nécessaires au refroidissement et à certains robots de production. AMD qui monte en puissance au détriment d'Intel, est tributaire aussi de ces métaux.

Plusieurs pays développent des stratégies de diversification et d'investissements pour sécuriser l'approvisionnement. Les **États-Unis** n'ont pas de raffinerie complète pour le dysprosium, le terbium et le praséodyme. Ils cherchent à construire une chaîne d'approvisionnement locale. Pour la **France** confer § 3 et 4 ci-dessus.

Taiwan est le cœur de la fabrication des unités de traitement graphique avec TSMC. Mais il est tributaire d'une forte dépendance externe : les matériaux sont raffinés en Chine ; les machines lithographiques pour la

fabrication des semi-conducteurs sont néerlandaises (ASML) ; les composants sont japonais (chimie de haute pureté).

b. Enjeux environnementaux et sociaux

Le raffinage chimique peut générer des effluents toxiques et des déchets radioactifs (monazite). La gouvernance et la gestion des impacts locaux sont essentielles.

c. Marché, prix et tendances

La demande pour le néodyme, le prométhéum et le dysprosium augmente fortement avec la mobilité électrique et le déploiement d'énergies renouvelables ; les prix restent volatils et sensibles aux décisions politiques.

d. Perspectives (10-20 ans)

La demande en hausse nécessite la diversification progressive du raffinage hors de Chine et l'amélioration du recyclage. Les investissements et les décisions politiques détermineront la vitesse de la transition.

e. Sites et gisements

(Non exhaustif, voir la carte ci-jointe)

Bayan Obo (Chine) ; Lovero (Russie) ; Khibiny (Russie) ; Mount Weld (Australie) ; Mountain Pass (USA) ; Nolans Bore (Australie) ; Kvanefjeld (Groenland – projet) ; Hoidas Lake (Canada).

10. Conclusion

Les terres rares sont stratégiques pour la transition énergétique et technologique ainsi que pour leurs applications de défense et aérospatiales. La diversification, le raffinage propre et le recyclage sont des priorités pour réduire la vulnérabilité des chaînes d'approvisionnement.

Dès la fin années quatre-vingt, Deng Xiaoping avait dit : « la Chine n'a pas de pétrole mais elle dispose des terres rares ». Il a ainsi donné à son pays une bonne avance. Bien que les États-Unis aient aussi commencé tôt, ils ont ralenti pour des raisons écologiques ; histoire bien connue du lièvre et de la tortue. Mais le lièvre a dressé les oreilles...

