

Résumé de l'expertise
scientifique collective

Vers une utilisation responsable des terres rares tout au long de leur cycle de vie

**QUELLES PERSPECTIVES EN TERMES DE SOBRIÉTÉ,
RECYCLAGE ET MODE DE PRODUCTION ?**



Souvent confondues avec d'autres métaux, les terres correspondent à un ensemble de 17 métaux du tableau périodique¹ des éléments chimiques, appelés éléments de terres rares (ETR). On les retrouve dans un vaste panel d'usages. Présents dans nombre de nos dispositifs électroniques miniaturisés, nécessaires à l'imagerie médicale ou comme outils pour la fabrication industrielle d'une grande variété de produits, les ETR constituent aujourd'hui un maillon clé de la transition énergétique. Les éoliennes marines et les véhicules électriques en dépendent par exemple étroitement.

Ces multiples usages reposent pourtant sur une capacité de raffinage dominée à 90% par la Chine, tandis que l'extraction des ETR se limite à quelques mines dans le monde et que la France n'a pas de gisement exploitable à court terme. Face à ces enjeux de souveraineté, l'Europe met en place des politiques pour sécuriser l'approvisionnement de ces métaux critiques². Il devient donc stratégique d'évaluer comment une sobriété d'usage des ETR – selon une acception large qui rassemble l'action sur la demande et l'innovation technologique – mais aussi le recyclage et les modes d'extraction alternatifs (sources, modalités et procédés) peuvent contribuer à réduire la vulnérabilité de la France et de l'Europe.

L'expertise scientifique collective terres rares conduite par le CNRS vise à éclairer ces questions à travers une lecture intégrée de la littérature. Un groupe pluridisciplinaire de 30 expert.e.s scientifiques a analysé 4100 publications scientifiques pour produire une synthèse et un rapport de référence disponible sur les archives ouvertes HAL prochainement, dont les principaux résultats sont résumés ici.

Quelques données (cf. rapport)

- Les ressources³ primaires mondiales en terres rares sont estimées à 478 millions de tonnes (Mt)
- En 2024, 70% de l'extraction et 90% du raffinage sont réalisés en Chine qui possède 35% des ressources du sous-sol, devant 5 pays à 9-11% tous situés en dehors de l'Europe
- Un seul site européen (en Suède) semble exploitable d'ici 5-10 ans
- En 2024, l'extraction mondiale issue des mines atteignait 390 kilotonnes (kt)
- La production mondiale d'ETR augmente en moyenne de 13% par an depuis 2015 (x2 tous les 6 ans)
- 1/3 de la consommation mondiale de terres rares sert à la fabrication d'aimants permanents
- 1 moteur d'éolienne marine contient autant de terres rares que 2 millions de téléphones portables
- Moins de 1% des terres rares sont recyclés à l'échelle mondiale
- La quantité d'ETR présente dans les cendres de charbon et les résidus de bauxite générés en 2020 dans le monde était de 320 kt et 150 kt respectivement

QUELS SONT LES ENJEUX POUR LA FRANCE ET L'EUROPE ?

Que sont les éléments de terres rares et quels en sont les usages ?

Les ETR ne présentent pas tous la même abondance naturelle ni les mêmes propriétés⁴, bien qu'ils soient toujours associés les uns aux autres dans les minerais, et co-extrai ts. Ces différences ont un **effet direct sur leur prix et leur criticité**. En 2025, les ETR utilisés pour la fabrication de catalyseurs pour la pétrochimie (lanthane, cérium) valent 100 à 1000 fois moins que ceux utilisés pour les aimants permanents hautement performants (dysprosium, terbium). **Les prix des ETR varient avec une grande volatilité** selon leur abondance naturelle, leur pureté (dépend de l'usage ciblé), les usages et le contexte géopolitique mondial.

Les ETR sont utilisés par un grand nombre de secteurs industriels (transports, santé, numérique etc.) dont certains, comme l'énergie ou la défense, sont stratégiques. **Un tiers de la consommation concerne la fabrication d'aimants permanents⁵, dispositifs-clé pour les moteurs d'éoliennes marines et les véhicules électriques**, dont ils permettent d'améliorer le rendement. On retrouve également des aimants à ETR dans les moteurs des drones, les disques durs, les haut-parleurs de téléphone et jusque dans les aspirateurs. Les ETR entrent aussi dans la composition des fibres optiques ou de certains alliages métalliques destinés à l'aéronautique, dans les lasers, les pots catalytiques ou encore en tant qu'agent de contraste pour l'IRM médicale. Enfin, les ETR ont des usages strictement industriels comme la catalyse en pétrochimie ou en tant que poudres de polissage pour les optiques de précision notamment (lentilles, écrans, parebrises etc.).

Les quantités utilisées au sein des matériaux varient fortement selon les technologies : de 0,01 % de la masse pour une fibre optique à près de 30 % pour un aimant d'éolienne marine.

Qui les produit et quelles sont les implications géopolitiques ?

De nombreux pays possèdent des ressources en ETR, mais souvent en concentration trop faible dans les minerais pour que leur extraction soit économiquement intéressante. Il faut aussi distinguer entre capacités d'extraction et capacités de raffinage et transformation. Une dizaine de pays ont des réserves exploitables dont la Suède. Dans les années 2000, la Chine assurait la quasi-totalité de l'extraction mondiale de minerais (jusqu'à 97%). **L'embargo de la Chine** sur les exportations en 2010 a marqué un tournant géopolitique, incitant plusieurs **États à développer ou relancer l'extraction d'ETR**. En 2024, les États-Unis et la Birmanie représentent respectivement 11 % et 7 % de l'extraction mondiale. Cependant, 90% des ETR extraits dans le monde sont ensuite envoyés en Chine pour leur raffinage. **La Chine a mené depuis 25 ans une politique**

de maîtrise de l'ensemble de la chaîne de valeur : extraction du minéral, séparation et raffinage des ETR, transformation en produits intermédiaires (matériaux) et intégration dans des produits finis (dispositifs).

Quels sont les impacts de leur extraction ?

L'impact environnemental global du processus d'extraction des ETR est plus important que celui d'autres métaux. Associés à des éléments **radioactifs** dans le sous-sol, les ETR nécessitent de nombreuses étapes fortement consommatrices d'**eau** et de **produits chimiques** pour leur séparation. Ces processus et les déchets générés représentent un **risque avéré pour l'environnement** principalement autour des zones fortement contaminées (site d'extraction ou de transformation). De ce fait, les activités d'extraction et de transformation et les risques sanitaires associés créent localement de fortes **tensions sociales**.

EXISTE-T-IL DES POSSIBILITÉS POUR RÉDUIRE LEUR UTILISATION ?

Les leviers de réduction de la consommation d'ETR incluent leur substitution par des éléments moins critiques dans les matériaux, l'amélioration de l'efficacité des dispositifs les utilisant, ainsi que la sobriété d'usage.

Peut-on substituer ou réduire les ETR dans les matériaux ?

Dans le cas des aimants permanents, il existe des procédés pour réduire la quantité de certains ETR en travaillant sur la composition et la structure des aimants, ou leur implantation au sein des dispositifs. Pour les aimants permanents NdFeB, la quantité de dysprosium peut être réduite par 2 sans perte de performance de l'aimant. Par ailleurs, le néodyme peut être partiellement substitué par des ETR moins critiques mais au détriment de la performance magnétique. Éliminer entièrement les ETR nécessiterait de multiplier de 4 à 5 fois la masse d'aimant pour conserver les mêmes performances. Cela est possible pour certains usages (dans les véhicules électriques, par exemple), mais très difficile pour d'autres (éoliennes marines). Enfin, une voie de réduction consiste à travailler sur la disposition des aimants permanents dans le moteur, sur leurs combinaisons avec des aimants sans ETR ou avec des technologies sans aimant. Pour les aimants permanents des équipements électroniques, la recherche de miniaturisation peut rendre complexe leur substitution par des aimants sans ETR. **Dans les aimants, les ETR peuvent donc faire l'objet d'une substitution dans certains usages, mais souvent au prix de compromis sur les performances des dispositifs et leur poids.**

Les batteries à base de nickel et contenant des ETR sont progressivement remplacées par des batteries

lithium-ion sans ETR mais riches en cobalt, nickel et manganèse, déplaçant le besoin vers d'autres métaux critiques. Le remplacement des lampes à phosphore par la technologie LED à lumière blanche a permis de réduire la quantité d'ETR, à performance égale, de 2 ordres de grandeur. **Ici, ce sont les ruptures technologiques plus que l'optimisation des matériaux qui ont permis de réduire les ETR.**

Pour les usages dits «dispersés», d'infimes quantités d'ETR suffisent à doper les performances de nombreux autres matériaux (0,01-0,1% dans la fibre optique par exemple). Dans ce cas, la littérature montre qu'il n'y a généralement pas de substitution possible pour atteindre des performances équivalentes. **Pour les usages dispersés, la consommation en ETR est souvent très faible pour un gain fonctionnel significatif.**

Quelle réglementation se met en place et quelle place pour une sobriété des usages ?

Bien que les ETR soient considérés comme des matières premières critiques régulées en Europe depuis 2024, **les produits en contenant (déchets électroniques par exemple) ne font pas l'objet d'un régime juridique spécifique.** Le Règlement européen pour les matières premières critiques (Critical Raw Material Act, 2024) vise à sécuriser leur approvisionnement en favorisant la relocalisation de la production et la diversification des sources d'ici 2030, y compris en encourageant le recyclage, prônant une logique d'économie circulaire. La littérature souligne des critiques quant à ce Règlement qui se focalise malgré tout sur l'offre plus que sur la demande. La sobriété d'usage apparaît, quant à elle, dans la législation française et européenne sur l'économie circulaire. Les exigences de traçabilité (passeport numérique, déclaration de performance environnementale) prévues par le Règlement européen sur l'écoconception (2024) sont présentées par la littérature comme un moyen déterminant de **transparence et de démocratisation des chaînes de valeur. Au final, le droit européen cherche à concilier sécurisation des approvisionnements et sobriété des usages.**

Parmi les sept piliers de l'économie circulaire, plusieurs peuvent influencer la demande en ETR. L'économie de la fonctionnalité, qui privilégie l'usage via le partage à la propriété individuelle, favorise la sobriété en optimisant l'intensité des usages (cas du leasing des véhicules électriques). Toutefois, ses impacts économiques et ses leviers d'acceptabilité, en lien avec les produits intégrants des ETR, restent peu étudiés, traduisant un **manque de visibilité de ces métaux. Ce manque de visibilité est un frein à la sobriété.** De son côté, l'écoconception permet de faciliter le réemploi, la réparation et le recyclage. Reste une question

centrale pour une demande française en ETR raisonnée : **comment mettre en adéquation le niveau de performance des objets avec les usages qu'ils remplissent ?**

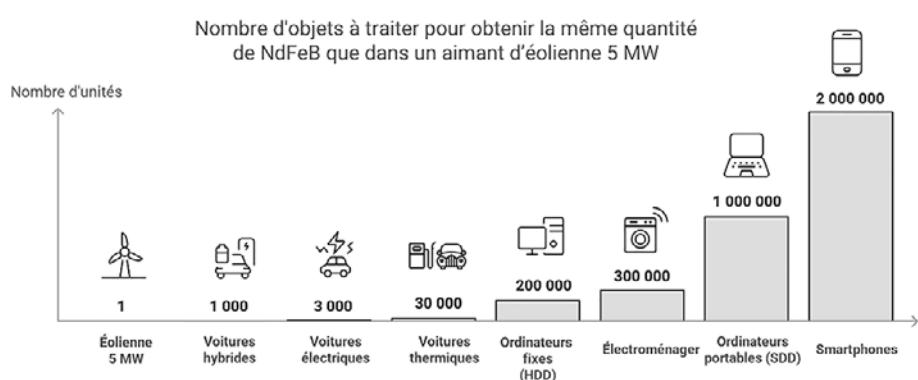
QUELS SONT LES LEVIERS ET LES FREINS POUR RECYCLER ?

Où en sont les technologies de recyclage ?

Le taux d'ETR recyclés stagne à 1% au niveau mondial depuis 2010. Pourtant, les analyses de cycle de vie et de flux de matières montrent que **les procédés de recyclage des ETR ont une empreinte carbone inférieure à celle de l'extraction primaire.** Des technologies innovantes de pré-traitement et de procédés métallurgiques (hydrométallurgie, bioprocédés etc.) ou le développement de boucles courtes de recyclage (d'aimant à aimant par exemple) réduisent aussi significativement l'impact environnemental et affichent de hauts rendements de récupération, mais nécessitent des incrémentations pour un déploiement industriel. **La faisabilité technique est avérée, le potentiel du recyclage est important et les déchets d'usage sont une ressource secondaire crédible pour constituer une «mine urbaine», plus responsable.**

Quels sont les facteurs qui pèsent sur la systématisation du recyclage des éléments de terres rares ?

La littérature de sciences sociales, en économie, socio-logie, géographie, management et gestion montre qu'un ensemble de facteurs conditionne les investissements dans les technologies et le développement du recyclage en France. Le potentiel de recyclabilité **dépend de l'usage concentré ou dispersé des ETR** (c'est-à-dire la proportion d'ETR dans les matériaux et le nombre d'objets à collecter). La collecte de 2 millions de téléphones (usage dispersé car représente un très grand nombre de dispositifs et peu d'ETR par dispositif) est nécessaire pour récupérer l'équivalent de la quantité d'ETR d'une seule éolienne offshore. La **dispersion constitue une double contrainte, logistique et économique.** Inversement, les gisements plus concentrés (aimants des éoliennes et des moteurs électriques des véhicules) représentent un potentiel stratégique pour la circularité des ETR. Mais **la durée de vie de ces dispositifs peut**



influencer inversement le renouvellement du stock : les ETR d'une éolienne restent indisponibles pendant plusieurs décennies. Enfin, cette activité est soumise à l'**extrême volatilité du marché des ETR** et à des cours très différents d'un ETR à l'autre.

Quels sont les cadres juridiques et politiques du recyclage des éléments de terres rares ?

Le droit relatif à l'économie circulaire et à la gestion des déchets s'applique au recyclage de produits contenant des ETR. Plusieurs directives - notamment celles sur les déchets électroniques et les batteries - encouragent la valorisation et la réutilisation des matériaux. Cependant, aucune législation n'oblige à mentionner la présence d'ETR dans les produits ni à indiquer les actions spécifiques à réaliser en matière de recyclage. Cette **absence de ciblage des ETR est un frein à la reconnaissance pour la collecte et le tri**. Par exemple, la législation européenne impose le recyclage de 85% de la masse d'un véhicule sans spécifier la composition favorisant le recyclage de matériaux lourds comme l'acier. Le cadre juridique et les incitations politiques ne sont donc pas encore adaptés à un recyclage efficient. **À l'échelle nationale et régionale, les politiques efficaces pour exploiter la mine urbaine reposent sur un équilibre entre régulation, incitations économiques et innovation, et surtout sur la collaboration entre les différents acteurs de la chaîne.**

Néanmoins, dans un contexte de demande mondiale en ETR en forte croissance, le stock historique de la mine urbaine est insuffisant. D'autres sources d'approvisionnement sont à considérer. Il peut toutefois **répondre à certaines demandes et minimiser les déséquilibres sur certains ETR particulièrement critiques**.

EXISTE-T-IL DES POSSIBILITES POUR EXTRAIRE AUTREMENT ?

Quelles sont les sources alternatives des éléments de terres rares ?

La France possède le deuxième domaine maritime au monde. Les **ressources minérales offshores** pourraient constituer une source d'approvisionnement en ETR, mais leur quantification comporte d'**importantes incertitudes** (les nodules polymétalliques dans le monde contiendraient de 2 à 12 Mt d'ETR et l'ensemble des sédiments des centaines de Mt). De même, la rentabilité économique et la faisabilité technique de l'extraction restent incertaines. Surtout, l'**ampleur des dommages** serait telle qu'il est impossible de savoir si les fonds marins, au rôle clé dans le stockage du carbone, pourraient retourner à l'équilibre après une exploitation. Si la France soutient l'interdiction d'exploiter dans les zones internationales, le cadre national ne l'interdit pas.

Il existe par ailleurs un potentiel primaire bien identifié dans des roches magmatiques de l'**Europe du Nord**, en

Suède (Kiruna) et en Norvège. Le Groenland possède aussi 8 gisements d'ETR de grande taille non exploités (proche 34,79 Mt). Enfin, la présence des ressources au Brésil, **2^e pays en ressources primaires, pourrait laisser entrevoir un potentiel d'ETR à proximité, en Guyane.**

Les déchets miniers et industriels sont estimés être un gros potentiel de sources d'ETR en France et en Europe. Bien que moins concentrés en ETR que les gisements primaires, ces déchets présentent un intérêt croissant du fait des volumes générés chaque année. Ils ont aussi déjà subi les opérations les plus énergivores (concassage, broyage), ce qui les inscrit pleinement dans les démarches de valorisation et de circularité des ressources : les ETR dans les résidus miniers de bauxite par exemple sont deux fois plus concentrés par rapport au minerai avant extraction de l'alumine ; les cendres de charbon (sous-produits de centrales) générées chaque année dans le monde contiennent une quantité d'ETR de même ordre de grandeur que ce qui est extrait à partir de sources primaires. Cependant, les données disponibles sur leurs stocks et leurs propriétés restent limitées.

Quels sont les procédés extractifs innovants et environnementalement plus respectueux ?

La réduction de l'impact environnemental de l' extraction des ETR repose sur une optimisation intégrée « ressource-procédé-environnement », fondée sur la minéralogie du gisement, l'hydrométallurgie circulaire et le recyclage interne des réactifs. L'optimisation intégrée vise à concilier sécurisation des approvisionnements et exigences de durabilité. Comme pour le recyclage, les approches d'extraction non-conventionnelles des déchets miniers (solvo-, iono- ou bio-métallurgie) ouvrent à des perspectives de voies plus durables. Enfin, les **approches zéro-déchet** qui valorisent l'ensemble des résidus miniers (fer, titan etc.) dont les ETR sont particulièrement pertinentes pour limiter les **impacts environnementaux liés au stockage de ces résidus**.

Comment mieux prendre en compte les conséquences sociales et environnementales de l'extraction ?

Les règles relatives à l'extraction des ETR étant les mêmes que celle d'autres métaux (les ETR sont souvent co-extrai ts avec d'autres métaux), la littérature examinée a inclus des cas transposables (France, Europe, autres). Elle met en avant la dimension sociale et politique de l'extraction. Si la responsabilité sociale et environnementale (RSE) des entreprises minières reste souvent jugée insuffisante, le droit européen évolue vers plus d'exigence avec le **devoir de vigilance**, qui impose directement aux entreprises des obligations renforcées tout au long de la chaîne de valeur, y compris dans des pays tiers. Toutefois, l'**analyse de la littérature montre que les contestations sociales autour des projets dépendent de l'existence d'un débat préalable, sincère et ouvert, sur l'opportunité même de développer de nouvelles**

mines : des mines pour quoi faire et au bénéfice de qui ? Les contestations ne sont pas résolues par de simples démarches pédagogiques ou compensatoires destinées aux populations locales affectées. Par ailleurs, les préoccupations de la justice environnementale dans l'industrie des métaux critiques ne se limitent pas aux impacts locaux, mais elles s'étendent au-delà des frontières. C'est pourquoi la sécurisation de l'approvisionnement en ETR, dans une perspective de souveraineté nationale et européenne, est difficilement envisageable indépendamment d'un débat démocratique sur les usages à encourager, réduire ou abandonner.

- 1-** Les ETR ne sont pas rares. Ils sont abondants, mais faiblement concentrés dans la croûte terrestre. Ils rassemblent 17 éléments : 15 lanthanides (lanthane, cérium, praseodyme, néodyme, prométhium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, lutécium), l'yttrium et le scandium, mais ce dernier est exclu de l'expertise.
- 2-** Une matière première critique possède un rôle économique important, est difficilement substituable l'activité économique, et soumise à des risques d'approvisionnement élevés.
- 3-** Les **ressources** désignent les ETR contenus dans les minerais du sous-sol (ressources primaires) ou contenus dans les déchets urbains, miniers ou de résidus l'industrie (ressources secondaires). Les **réserves** désignent les ressources exploitables économiquement.
- 4-** Les différents ETR possèdent des propriétés physico-chimiques - catalytiques, magnétiques, optiques - qui les rendent uniques.
- 5-** Les aimants permanents produisent un champ magnétique permanent sans apport extérieur d'énergie. Dans le véhicule électrique, un champ magnétique tournant généré par un courant entraîne les aimants qui entraînent à leur tour le véhicule par transmission mécanique. Inversement, au freinage, la rotation des aimants entraînés par le véhicule induit un courant électrique permettant de recharger la batterie.

EN BREF

Face à la dépendance de la France pour les ETR, les leviers et freins sont analysés dans l'expertise :

- Une **réduction du recours aux ETR est envisageable via la technologie et la sobriété d'usage**, cette dernière demeurant encore peu étudiée scientifiquement. Au-delà d'une seule analyse scientifique, la sobriété appelle une réflexion sur les priorités d'usages qui nécessite de clarifier ce qui relève d'un usage essentiel.
- La France dispose de **ressources secondaires importantes** :
 - Les déchets des produits d'usage : **mine urbaine** (aimants des moteurs de voitures électriques, des déchets électroniques etc.), mobilisable via le recyclage,
 - Les **déchets miniers et de l'industrie** (cendres de charbon sous-produits de centrales, résidus bauxite issus de l'extraction de l'alumine).
- Une filière de recyclage repose sur une organisation de **la collecte, des infrastructures et une économie à stabiliser** (incitations, subvention limitant les effets de la volatilité des cours des ETR).
- Les controverses minières naissent souvent de **l'absence de débat préalable et sincère sur les effets environnementaux, la finalité et le partage des bénéfices avec les populations locales**.



Crédits photos :
© Cyril Frésillon /
Mecaware / CNRS Images

Mise en page, impression :
CNRS, Ile-de-France
service mutualisé,
secteur de l'imprimé, WL

CNRS
3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16
+ 33 1 44 96 40 00
www.cnrs.fr | [Bluesky](#) | [LinkedIn](#) | [YouTube](#)

cnrs

