

# Chapitre 1 : Usages, ressources et enjeux géopolitiques

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

Rapport de l'expertise scientifique collective

## Table des matières du chapitre 1

|            |                                                                                     |           |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>USAGES, RESSOURCES ET ENJEUX GEOPOLITIQUES</b>                                   | <b>12</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Définition</b>                                                                   | <b>12</b> |
| 1.1.1      | Ce que ne sont pas les ETR                                                          | 14        |
| 1.1.2      | Ce que sont les ETR ...mais aussi d'autres éléments                                 | 15        |
| 1.1.3      | Des terres rares pas si rares                                                       | 15        |
| 1.1.4      | Liens entre propriétés des constituants, matériaux et dispositifs                   | 17        |
| 1.1.5      | Dynamique(s) des usages, dynamiques de la demande                                   | 20        |
| 1.1.6      | Des usages dispersés aux usages concentrés en ETR                                   | 23        |
| <b>1.2</b> | <b>Ressources, Réserves et Production</b>                                           | <b>25</b> |
| 1.2.1      | Des ressources et réserves géologiques bien distribuées géographiquement            | 25        |
| 1.2.1.1    | Les ressources                                                                      | 25        |
| 1.2.1.2    | Les réserves                                                                        | 28        |
| 1.2.2      | Une centralisation de l'extraction et du raffinage en Chine                         | 28        |
| 1.2.3      | Impacts environnementaux et sanitaires de l'extraction des ETR                      | 31        |
| 1.2.3.1    | Consommation de matières et d'énergie                                               | 31        |
| 1.2.3.2    | Génération de déchets radioactifs                                                   | 32        |
| 1.2.3.3    | Contamination de l'environnement                                                    | 32        |
| 1.2.3.4    | Impacts sanitaires                                                                  | 34        |
| 1.2.4      | Le « balance problem »                                                              | 35        |
| 1.2.5      | Le marché des ETR                                                                   | 35        |
| 1.2.5.1    | Structure et dimension du marché                                                    | 35        |
| 1.2.5.2    | Évolution des prix des ETR entre 2015 et 2024                                       | 36        |
| <b>1.3</b> | <b>La mise en politique des ETR</b>                                                 | <b>37</b> |
| 1.3.1      | La structuration du marché mondial des ETR des années 1950 aux années 1980          | 37        |
| 1.3.2      | La structuration du marché des ETR des années 1980 aux années 2010                  | 38        |
| 1.3.2.1    | Aux États-Unis : une politique de délocalisation de la production                   | 38        |
| 1.3.2.2    | En Chine : le choix d'une conservation stratégique des ETR à partir des années 2000 | 39        |
| 1.3.3      | Les réponses des États et entreprises non chinoises à la crise des ETR              | 41        |
| 1.3.3.1    | Une plainte à l'Organisation mondiale du commerce (OMC) suite à la crise de 2010    | 41        |
| 1.3.3.2    | Le renouveau de l'interventionnisme étatique états-unien                            | 42        |
| 1.3.3.3    | Les interventionnismes européens s'arrimant à des politiques de criticité           | 43        |
| <b>1.4</b> | <b>Les 3 axes de l'ESCo</b>                                                         | <b>50</b> |
| <b>1.5</b> | <b>Liste des références du chapitre 1</b>                                           | <b>52</b> |

# 1 Usages, ressources et enjeux géopolitiques

## 1.1 Définition

Les éléments de terres rares (ETR) font référence à une famille de 17 éléments chimiques (Figure 1.1). La plupart se trouvent sur la même ligne du tableau périodique : ce sont les 15 lanthanides (du lanthane au lutécium). À ceux-là, s'ajoutent l'yttrium (Y) et le scandium (Sc). Cette famille inclut donc : l'yttrium (Y,  $Z=39$ ) et le scandium (Sc,  $Z=21$ ), ainsi que les quinze lanthanides : lanthane (La,  $Z=57$ ), cérium (Ce,  $Z=58$ ), praséodyme (Pr,  $Z=59$ ), néodyme (Nd,  $Z=60$ ), prométhium (Pm,  $Z=61$ ), samarium (Sm,  $Z=62$ ), europium (Eu,  $Z=63$ ), gadolinium (Gd,  $Z=64$ ), terbium (Tb,  $Z=65$ ), dysprosium (Dy,  $Z=66$ ), holmium (Ho,  $Z=67$ ), erbium (Er,  $Z=68$ ), thulium (Tm,  $Z=69$ ), ytterbium (Yb,  $Z=70$ ), et lutécium (Lu,  $Z=71$ ) tels que définis par l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (UIPAC). L'yttrium et le scandium sont inclus dans le groupe des ETR car ils présentent un comportement géologique et physico-chimique parfois similaire aux lanthanides. Cette similitude est particulièrement marquée pour l'yttrium qui présente le même rayon ionique que l'holmium et la même valence (+3). En revanche, c'est moins le cas pour le scandium dont le rayon ionique et le comportement géo-physico-chimique sont significativement différents de celui des lanthanides et qui, par conséquent, ne se trouve pas dans les mêmes environnements géologiques que les autres ETR. Pour cette raison, cette expertise ne se focalise pas sur le cas du scandium.

Dans la littérature, les ETR sont généralement classés en deux sous-groupes en fonction de leur numéro atomique : les ETR dits légers pour les éléments du lanthane au gadolinium et les ETR lourds, comprenant les éléments du terbium au lutécium. L'yttrium qui a des propriétés similaires à l'holmium est classé dans les ETR lourds. La distinction entre éléments légers et lourds est purement conventionnelle et ne correspond pas à une classification fondée sur leurs propriétés. Par ailleurs, la série des lanthanides trivalents est caractérisée par une diminution progressive du rayon ionique, dite contraction lanthanidique, présentant une discontinuité notable au niveau du gadolinium (gadolinium break).



### LES ETR FACE AUX IDÉES REÇUES

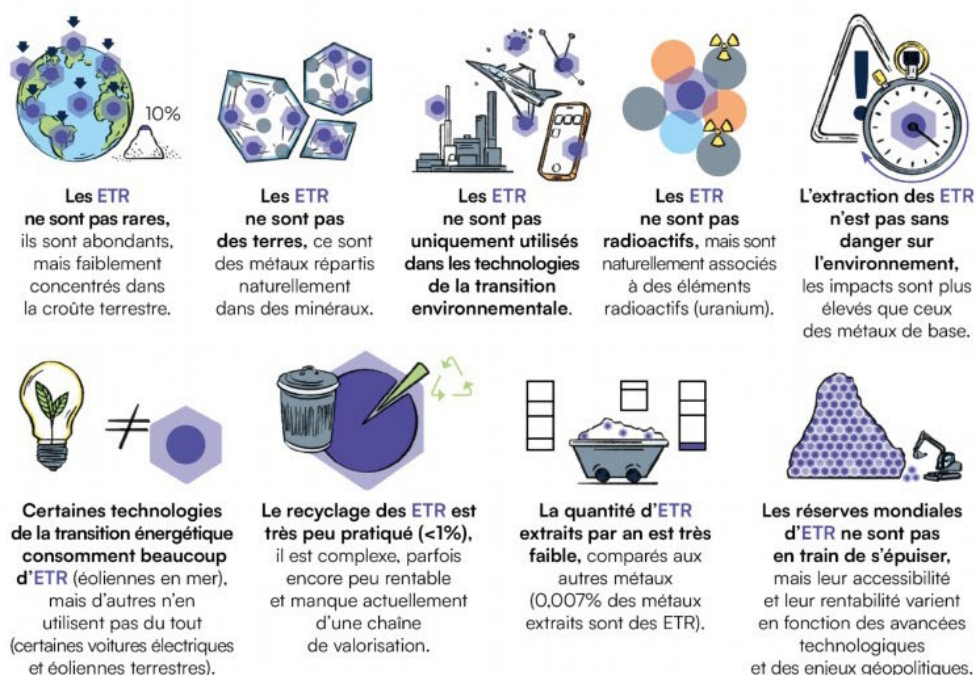


Figure 1.1 Ce que sont les ETR en tant qu'éléments chimiques (haut) et des clarifications face à certaines idées reçues (bas). La concentration reportée est la concentration moyenne dans la croûte terrestre (moyenne UCC) ; le prix indiqué correspond au prix des oxydes d'ETR d'une pureté supérieure à 99% en mars 2025<sup>1</sup>. Le niveau de criticité des ETR est représenté sur une échelle de trois « + » (un seul « + » étant la plus faible criticité). Le prométhium et le scandium ne figurent pas ici : le premier n'existe pas à l'état stable dans la nature, tandis que le second se distingue par ses propriétés (notamment son rayon ionique) et par des usages différents de ceux des seize autres ETR.

<sup>1</sup> Liste des prix des oxydes d'ETR au 3 mars 2025. Source : Epoch Material.

Parce que l'usage du terme de « terres rares » induit souvent de la confusion, il est utile de bien différencier les ETR d'autres groupes de métaux et toujours préférable d'utiliser des termes précis comme « Éléments de Terres Rares » (ETR) ou de préciser les éléments concernés (ex. : néodyme, dysprosium, europium, etc.). C'est la convention adoptée dans ce rapport.

### 1.1.1 Ce que ne sont pas les ETR

Les ETR sont parfois abusivement désignés par d'autres termes, et ces appellations peuvent être imprécises ou trompeuses selon le contexte.

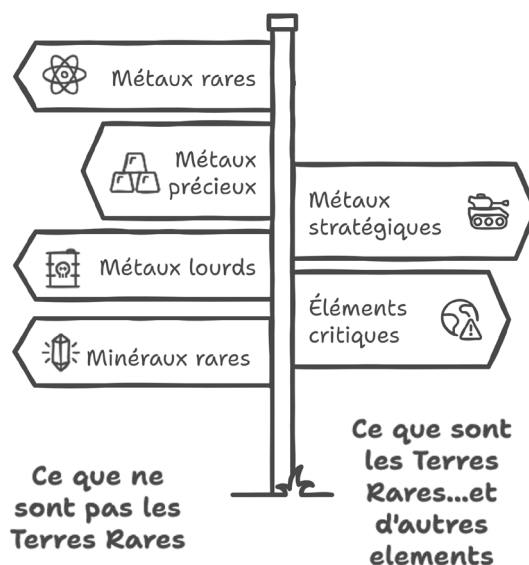


Figure 1.2 Ce que sont / ne sont pas les Terres rares

**Métaux rares** : les ETR sont relativement abondants dans la croûte terrestre, bien plus que les métaux comme l'or, le rhénium ou l'iridium. À titre d'exemple, le cérium est aussi abondant que le cuivre en moyenne dans la croûte terrestre. Les ETR légers (du lanthane au gadolinium) sont plus abondants que les ETR lourds (du terbium au lutécium et yttrium).

**Métaux précieux** : un métal précieux est un métal rare et généralement cher comme l'or, l'argent ou le platine. Cette valeur est liée à sa beauté, à sa rareté, mais aussi à ses propriétés chimiques et physiques exceptionnelles, ainsi qu'à son utilisation historique dans les monnaies et les objets de valeur. Les métaux précieux sont souvent très résistants à l'oxydation, à la corrosion et à l'usure. Ce n'est pas le cas des ETR qui ne sont pas stables à l'état métallique et sont donc stables à l'état ionique.

**Métaux lourds** : décrié par la communauté scientifique (Duffus, 2002), ce terme reste néanmoins largement utilisé dans la sphère publique pour faire référence aux éléments fortement toxiques et écotoxiques comme le plomb, le zinc ou le mercure. De ce point de vue, les ETR lourds malgré une masse atomique élevée ne rentrent pas dans cette famille.

### 1.1.2 Ce que sont les ETR ...mais aussi d'autres éléments

*Les termes décrits dans le glossaire (annexe du rapport) sont annotés d'un astérisque\* à leur première occurrence.*

**Métaux stratégiques\*** : métaux associés à certains secteurs stratégiques comme la défense ou ceux des politiques de transition (énergie, mobilité ...). Certains ETR appartiennent à ce groupe qui inclut aussi d'autres métaux (lithium, cobalt...).

**Métaux critiques\*** : métaux qui possèdent un rôle économique important, qui sont difficilement substituables et qui présentent des risques d'approvisionnement. Les ETR appartiennent à ce groupe qui inclut aussi d'autres métaux.

### 1.1.3 Des terres rares pas si rares

Contrairement à ce que leur nom pourrait laisser penser, les ETR ne sont pas si rares dans la croûte terrestre (cf. Figure 1.1). La concentration totale des ETR est bien supérieure à la concentration en métaux nobles (les ETR sont  $10^4$  à  $10^5$  fois plus abondants que l'or par exemple) et se rapproche des concentrations de métaux de base tels que le cuivre, le zinc et le nickel.

Toutefois, il existe des différences majeures de concentrations entre les ETR. Tout d'abord, les éléments de numéros atomiques pairs sont toujours plus concentrés que leurs voisins à numéros atomiques impairs. Ensuite l'abondance diminue progressivement avec le numéro atomique : les ETR légers sont donc beaucoup plus abondants que les ETR lourds (La, Ce, Nd sont environ cent fois plus abondants que les derniers ETR lourds impairs, Lu et Tm). À noter que l'Y qui a une masse atomique plus légère que les lanthanides, a une abondance de l'ordre du La ou Nd. L'Y est donc le plus abondant des ETR lourds.

Le terme « terres » se référait à la fin de 18ème siècle — au début de leur découverte — aux oxydes de métaux, supposés être des corps purs, avant que l'ensemble des ETR ne soient identifiés au cours du 19ème siècle. Quant au terme « rares », il s'explique par le fait que, contrairement aux métaux de base, les ETR ne se trouvent pas sous forme de gisements\* concentrés et sont souvent dispersés sous forme oxydée dans divers minéraux rendant leur extraction\* difficile. De plus, leurs propriétés physico-chimiques étant très proches, il est difficile de les séparer\* afin de les appréhender individuellement, un à un. Cette similarité de propriétés chimiques fondamentales (rayon ionique, valence (majoritairement +III), nombre de coordinations (majoritairement 8 ou 9), enthalpie, hydratation, affinité électronique...) est toutefois également un atout car les ETR, et plus précisément les lanthanides, offrent la plus longue série d'éléments semblables du tableau périodique. À ce titre, ils peuvent facilement être combinés ou substitués les uns aux autres, permettant des applications technologiques inégalables.

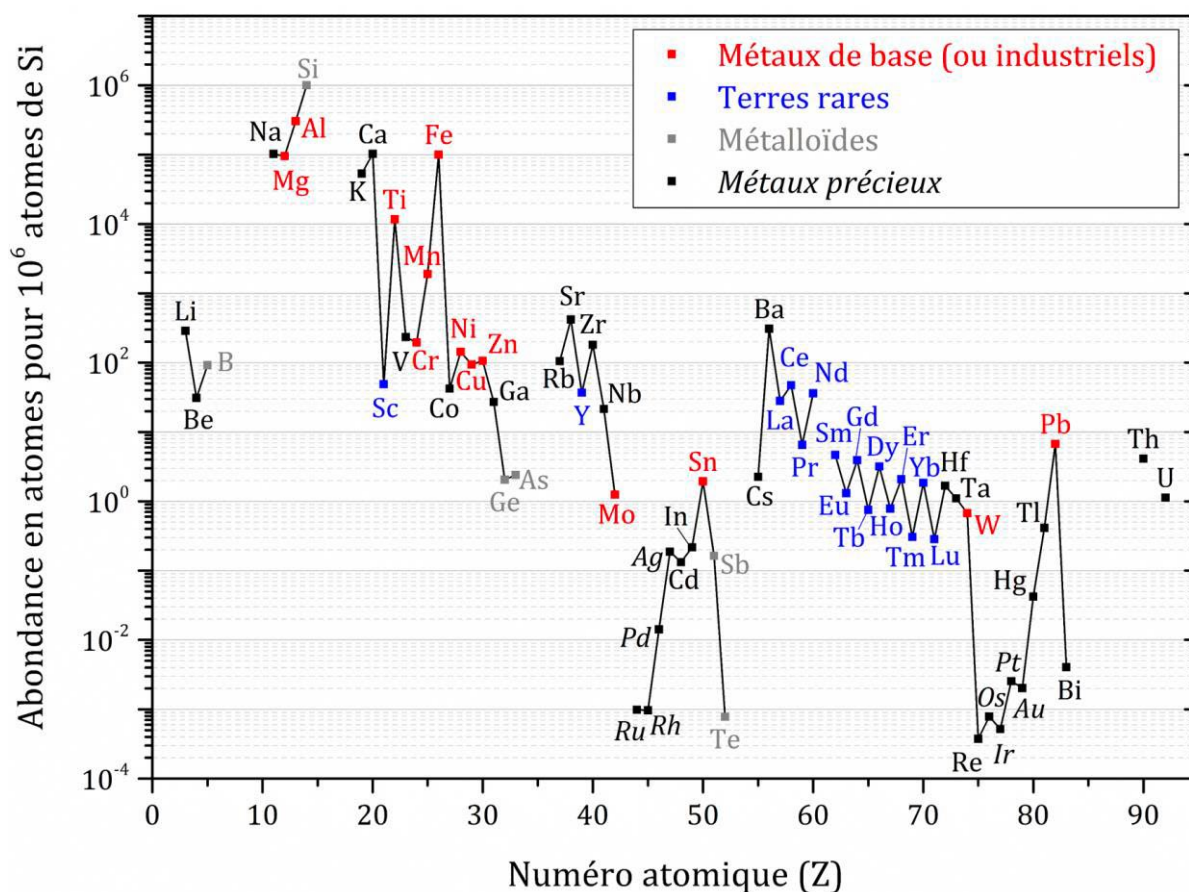


Figure 1.3 Abondances relatives des métaux et métalloïdes dans la croûte terrestre (en atomes, pour  $10^6$  atomes de Si), d'après les données de (Haynes, 2014). Tirée de (Couturier, 2024).

Pour identifier les étapes permettant de former un objet et d'en permettre l'usage, on utilise généralement le continuum « **constituant, matériau, dispositif** ».

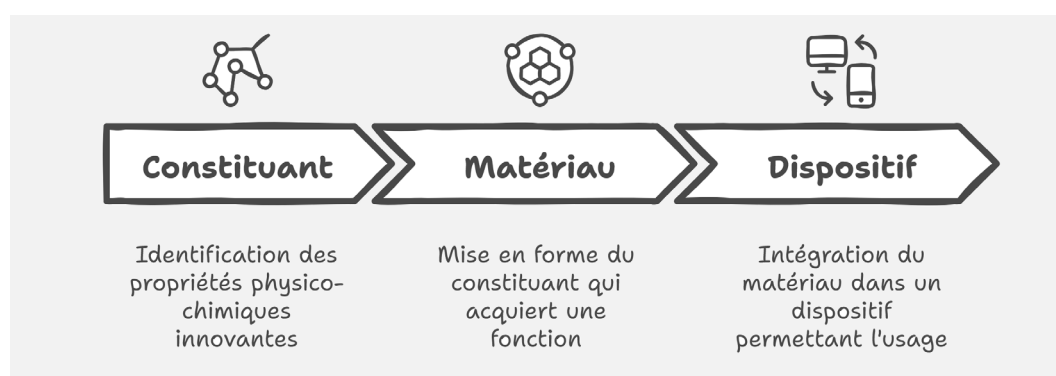


Figure 1.4 Du constituant à l'usage : le continuum « constituant, matériaux, dispositif »

Par **constituant** on entend ici la molécule, le composé, la phase, le minéral, le métal ou l'alliage au sein duquel les ETR sont impliqués. La littérature s'attachant à l'étude de constituants à base d'ETR est par essence fondamentale et caractérise leurs propriétés physico-chimiques de base (luminescence, magnétisme, conductivité...). S'il est discuté, l'usage y est évoqué comme une possibilité éventuelle et un avenir lointain. Le niveau de TRL\* est donc très bas.

**Exemple d'un constituant luminescent :** une nouvelle molécule à base d'ions  $Tb^{3+}$  produit une luminescence verte sous rayonnement UV, elle peut servir de phosphore vert. Les études caractérisent alors sa brillance, son rendement quantique, son temps de vie, sa stabilité chimique...

Le **matériau** est un constituant que l'on a mis en forme afin de maximiser et de rendre exploitable\* une ou plusieurs de ses propriétés. On le définit parfois comme un « solide utile ». La littérature associée se base alors sur les études fondamentales des constituants et étudie leur conversion en matériau. Le niveau de TRL est moyen.

**Exemple d'un matériau émettant de la lumière blanche :** un mélange de poudres de trois constituants (phosphore  $Y_2O_3:Eu$  (émetteur rouge),  $LaPO_4:Ce,Tb$  (émetteur vert) et  $BaMgAl_{10}O_{17}:Eu$  (émetteur bleu) peut être utilisé pour produire de la lumière blanche. Les études caractérisent alors le matériau par le meilleur ratio entre émetteurs, leur pureté, la taille de grain, la qualité du mélange. On caractérise également le rayonnement UV le plus efficace (longueur d'onde, puissance...) pour induire l'émission lumineuse.

Le **dispositif** est le stade qui permettra l'usage afin de remplir une fonction donnée. Il peut combiner différents matériaux et n'a de sens que s'il est confronté à des conditions d'usage permettant l'exploitation des performances\* du matériau. La littérature associée est assez appliquée voire dérive sur des études d'ingénierie pure, des brevets... Le niveau de TRL est élevé.

**Exemple d'un dispositif d'éclairage, le tube fluorescent :** un tube de verre sur lequel est déposé un mélange de phosphores émettant de la lumière blanche peut être utilisé comme dispositif d'éclairage si l'on crée une lampe à décharge à basse pression, utilisant du mercure gazeux dont l'ionisation par une décharge électrique produit le rayonnement ultraviolet sensibilisant le mélange de phosphores. Les études caractérisent alors le dispositif par sa « température de couleur », son indice de rendu de couleur, son flux lumineux, et son efficacité énergétique pour l'usage d'éclairage.

Ainsi, quand une rupture technologique apparaît, elle peut être liée à un changement d'usage mais, le plus souvent, elle est due à la découverte de nouveaux constituants, induisant de nouveaux matériaux puis dispositifs qui sont plus pertinents pour l'usage recherché. Par exemple, l'apparition de semi-conducteurs émissifs dans le visible (« *constituants* »), permet de créer des diodes électroluminescentes (LED) (« *matériaux* ») permettant de concevoir des lampes à LED (« *dispositifs* ») qui prédominent désormais pour l'usage d'éclairage.

Représentations alternatives :

Certains auteurs remplacent la notion de constituant par celle de « *fonction* », où ils ne s'intéressent pas à la nature physico-chimique de l'objet, mais simplement à son rôle dans le dispositif final. Cette approche est utilisée par Peiró et al. pour montrer l'omniprésence des métaux rares ou critiques (ETR inclus) dans la plupart des dispositifs modernes (Peiró et al., 2013). Cette approche est aussi particulièrement efficace pour montrer qu'un matériau peut servir plusieurs usages et qu'un usage nécessite souvent plusieurs matériaux remplissant différentes fonctions.

### 1.1.4 Liens entre propriétés des constituants, matériaux et dispositifs

Les ETR possèdent des propriétés uniques qui les rendent essentiels dans de nombreux domaines technologiques (Bünzli, 2022; Piguet, 2019) (cf. Figure 1.5). Leur configuration électronique spécifique confère au Nd, Dy, Pr, Tb et Sm des **propriétés magnétiques** uniques utilisées pour la fabrication

d'aimants permanents\* (NdFeB, SmCo). Aujourd'hui, ces aimants aux propriétés inégalables équipent un grand nombre de technologies telles que les disques durs (peu à peu remplacés par la technologie SSD, disques à semi-conducteurs), les moteurs des voitures hybrides et électriques et les éoliennes offshore. Cette application représente aujourd'hui près d'un tiers de l'utilisation des ETR et est particulièrement stratégique pour la décarbonation de l'énergie.

Les ETR possèdent également des **propriétés chimiques dont catalytiques** (Ce, La, Pr, Nd) intéressantes et sont utilisés depuis plus de 60 ans comme catalyseur de nombreuses réactions chimiques à l'échelle industrielle et dans le secteur de l'automobile qui représente près de 21% des usages. Les deux usages principaux sont le craquage du pétrole par des procédés de craquage catalytique d'hydrocarbures en lit fluidisé (CCF) et les catalyseurs des voitures à essence modernes.

**Les propriétés chimiques et (thermo-)mécaniques** de certains ETR (La, Ce, Pr, Nd, Gd) sont utilisées pour améliorer la résistance à l'oxydation à haute température et les propriétés thermomécaniques de plusieurs métaux et alliages utilisés en particulier pour l'aéronautique, ainsi que de certains verres. Le  $\text{CeO}_2$  est également le meilleur agent de polissage du verre. Les poudres de polissage fabriquées à partir de  $\text{CeO}_2$  sont utilisées pour polir tout type de verre, des écrans d'ordinateur aux fenêtres de maison et aux composants optiques. Ces applications représentent à peu près 20% des usages d'ETR.

**Les propriétés optiques** uniques de certains ETR (Ce, Pr, Nd, Eu, Gd, Tb, Dy, Er, Yb) en font par ailleurs des éléments-clés de nombreux dispositifs photoniques. L'écrantage de leurs orbitales 4f par les couches électroniques externes ( $5s^2 5p^6$ ) réduit les perturbations dues à l'environnement chimique, ce qui permet aux transitions électroniques d'être peu affectées par le milieu hôte. Ainsi, chaque ion lanthanide possède une signature spectrale unique avec des raies fines dans le visible, l'UV et le proche infra-rouge. Les ETR optiquement actifs se retrouvent principalement dans les lasers solides YAG :Nd (émission à 1,064  $\mu\text{m}$ ), les amplificateurs optiques télécom,  $\text{Er}^{3+}$  (1,5  $\mu\text{m}$ ), les écrans et phosphores pour l'éclairage:  $\text{Eu}^{3+}$  (rouge),  $\text{Tb}^{3+}$  (vert),  $\text{Ce}^{3+}$  (bleu), les biomarqueurs luminescents pour l'imagerie médicale, les convertisseurs de lumière dans les panneaux solaires (Figueiredo et al., 2024) ou les marqueurs anti-contrefaçon luminescents .

Enfin, leurs **propriétés électrochimiques** (cérium, lanthane, néodyme, praséodyme) sont utilisées pour la fabrication des anodes des batteries nickel-hydrure métalliques (NiMH) qui représente 5% des usages.

## TERRES RARES : PROPRIÉTÉS, MATÉRIAUX ET APPLICATIONS

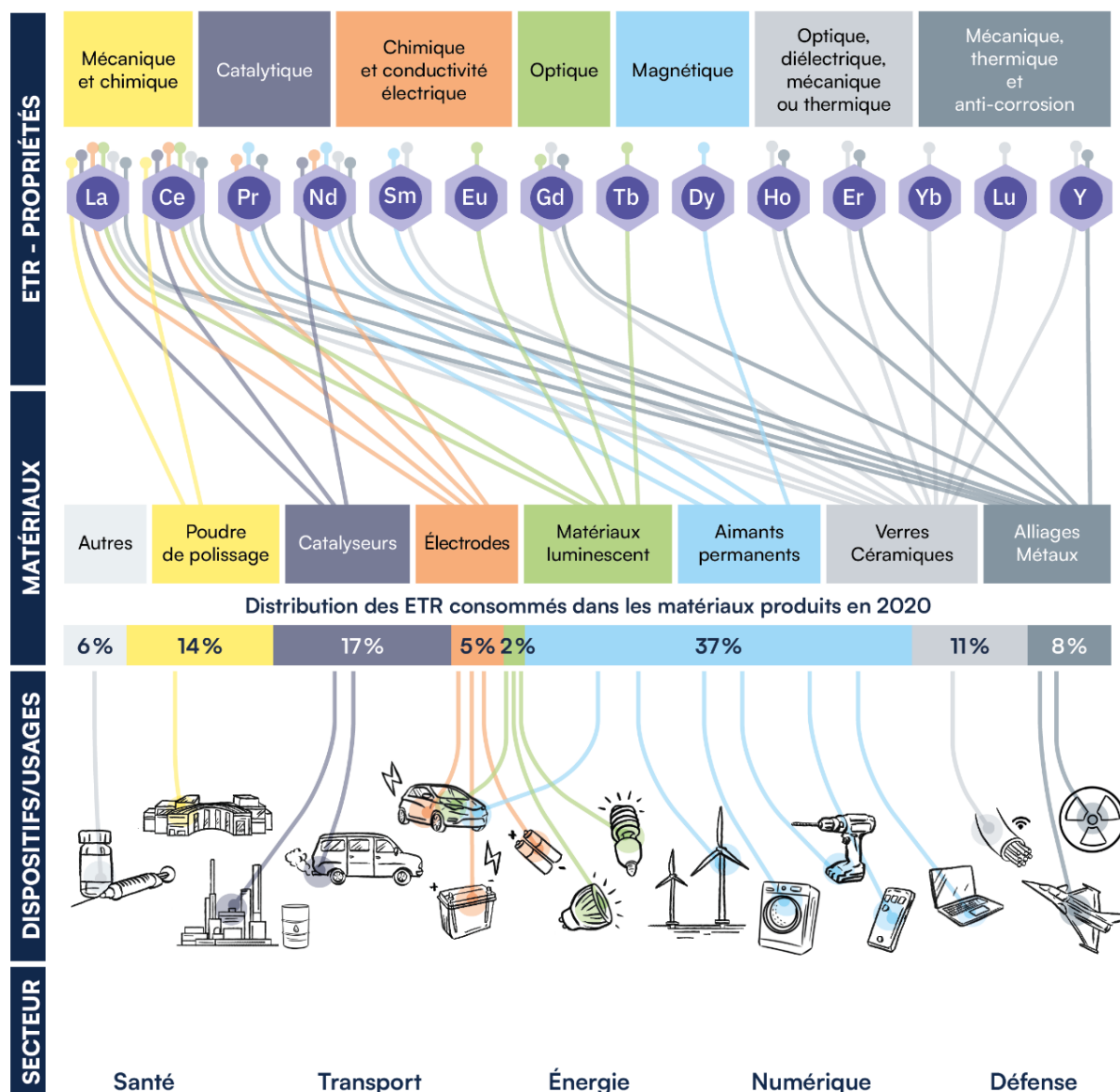


Figure 1.5 L'utilisation des ETR dans les matériaux selon leurs propriétés, la répartition de la consommation des ETR dans les matériaux produits en 2020 (seules les contributions des ETR représentant au moins 2 % des ETR utilisés dans un matériau donné sont illustrées ici) et l'utilisation de ces matériaux pour de nombreux dispositifs. Ces dispositifs sont impliqués de façon variée dans plusieurs secteurs. Cette figure a été réalisée à partir des données de (Alonso et al., 2023; Vaughan et al., 2023)

En résumé, **les ETR sont exploités dans de nombreux matériaux pour leurs propriétés uniques très variées** d'un ETR à un autre ; les ETR utilisés dans les matériaux varient en fonction de la propriété recherchée (ex. : néodyme, praséodyme et dysprosium sont utilisés pour leurs propriétés magnétiques dans les aimants permanents alors que les catalyseurs mais aussi les poudres de polissage à base d'ETR sont presque exclusivement composées de lanthane et cérium). Ces différences d'usage sont à l'origine du « balance problem » lié au fait que les ETR sont extraits ensemble, mais que la demande pour chaque élément pris individuellement est très différente (cf. 1.2.4 plus bas) ce qui peut entraîner certaines conséquences économiques (pénuries ou surproduction de certains ETR).

Ces matériaux sont quant à eux utilisés dans divers dispositifs couvrant des domaines d'application très divers tels que ceux de l'énergie, de l'environnement, du numérique, du médical ou bien encore de la défense, leur conférant un caractère souvent qualifié de « stratégique ». Aussi un même dispositif peut-il contenir différents matériaux contenant des ETR. À titre d'exemple, les voitures hybrides peuvent contenir des ETR dans les aimants permanents (néodyme, praséodyme, dysprosium, terbium) du moteur principal et dans les petits moteurs annexes, la batterie NiMH (néodyme, praséodyme, dysprosium), le catalyseur du pot d'échappement (cérium) et les luminophores des phares à LED (europium, yttrium, etc.).

### 1.1.5 Dynamique(s) des usages, dynamiques de la demande

Une autre particularité des ETR est que leurs domaines d'application ont considérablement évolué au fil du temps et se sont diversifiés, pour devenir incontournables dans de nombreuses technologies.

Le Nd par exemple, qui était utilisé en proportions modestes et comme colorant pour les verres, est désormais intensément utilisé dans le domaine de la production d'aimants permanents (Zepf, 2013).

Le marché des technologies utilisant des ETR croît globalement très fortement, mais certains domaines ont des dynamiques différentes (cf. Figure 1.6). Ainsi, certains usages tels que les **aimants permanents** sont en forte croissance et la quantité d'ETR utilisée dans le monde pour ces aimants permanents est passée de 37 à 60 kilotonnes (kt) de 2012 à 2020 (Vaughan et al., 2023). De la même façon, la production d'**agents de polissage** a plus que doublé sur la même période (11 à 23 kt). D'autres usages se sont stabilisés entre 2012 et 2020. C'est le cas par exemple des catalyseurs ou des batteries (29 et 8 kt en moyenne). Enfin, **le seul usage qui a connu une décroissance forte est celui des phosphores** (9 à 4 kt) qui s'explique par le remplacement des lampes à phosphore au profit des LED qui pour la plupart utilisent toujours des ETR mais en quantités beaucoup plus faibles.

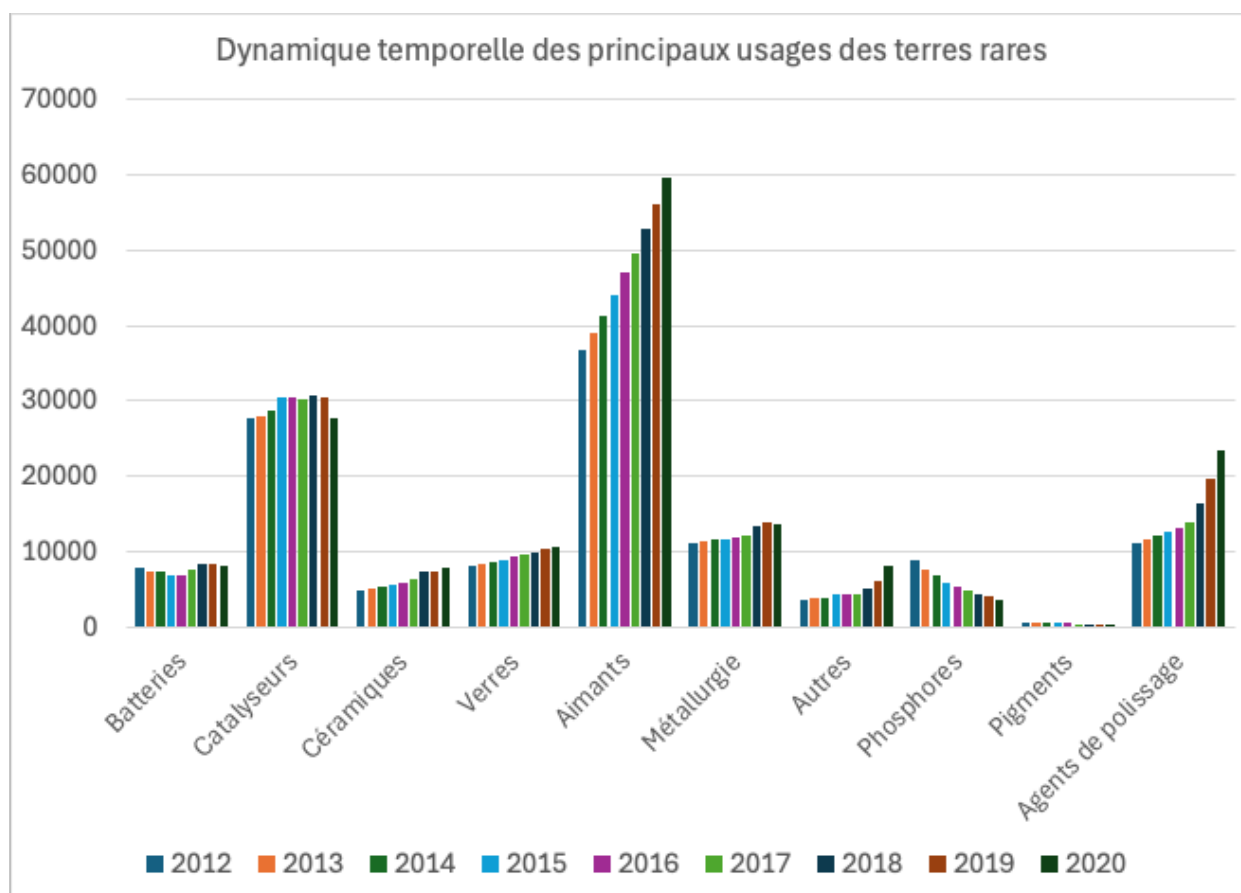


Figure 1.6 Dynamique temporelle des principaux usages des ETR, d'après (Vaughan et al., 2023).

La projection de la demande en métaux oppose généralement deux écoles : d'un côté, ceux qui estiment que l'épuisement des gisements de bonne qualité (avec une forte concentration de métal dans le minéral) signifie nécessairement une augmentation des coûts de production pouvant entraîner des pénuries ; de l'autre, ceux qui pensent que l'innovation technologique peut et va permettre une compensation (Vidal et al., 2022).

Si ces deux perspectives donnent lieu à des scénarios significativement différents, elles partagent néanmoins un point commun : celui de se concentrer sur la disponibilité de l'offre, sans questionner la demande, qui est souvent essentialisée et considérée comme suivant nécessairement une courbe d'augmentation exponentielle, comme cela a été le cas jusqu'à présent. Ainsi, aucun des articles analysés dans le corpus n'a envisagé la possibilité d'une diminution ou d'une stagnation de la demande en ETR, ou plus généralement en ressources minérales.

Il paraît donc nécessaire de rappeler que « la demande » est une notion économique, différente du besoin, qui dépend de multiples facteurs (taille de la population, PIB / habitant, modèle de développement, etc.), chacun d'entre eux étant à son tour multifactoriel, délicat à prédire. La demande est très sensible aux crises économiques, sanitaires ou géopolitiques qui peuvent affecter l'ensemble des chaînes de valeur dans un monde globalisé, ainsi qu'aux choix politiques déterminant les trajectoires de transition des pays comme des organisations.

En se basant sur trois scénarios de limitation d'émissions de gaz à effet de serre, l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) projette **un doublement de la demande en ETR pour les aimants permanents d'ici 2050**, notamment en raison de la forte demande en véhicules électriques (qui représentent 7 % de la demande en aimants permanents en 2023, et sont annoncés comme représentant 30 % de cette

demande en 2050) (selon l'IEA<sup>2</sup>). Ces scénarios supposent une forte croissance de certains marchés sans intégrer systématiquement des options de sobriété\*. À l'inverse, l'ADEME indique que pour un même objectif de décarbonation à l'horizon 2050, les besoins en ETR peuvent varier d'un rapport de 1 à 3 selon des choix de société plus ou moins sobres entre le scénario « Génération frugale » qui prévoit un allègement des véhicules et un recours accru au covoiturage, et à l'opposé, le scénario « Pari réparateur » qui prolonge les tendances actuelles<sup>3</sup>. L'ADEME souligne que les véhicules représentent le principal vecteur de consommation de métaux de la transition énergétique. Les politiques de mobilité pourraient donc avoir un rôle important dans l'évolution de la demande en ETR.

Dès les années 2010, plusieurs équipes ont analysé les tendances de la demande future en ETR, généralement à l'horizon 2050. La grande majorité de ces études quantitatives concluent que pour assurer l'approvisionnement en ETR, il est nécessaire d'agir à la fois sur l'offre (augmentation de la production) et sur la demande (pratiques de sobriété). Ces évaluations convergent sur un certain nombre de points :

- 1) La demande est tirée par les nouvelles technologies (**éolien et véhicules électriques**). Alonso et al. proposaient par exemple dès 2012 une évaluation de la demande en néodyme et en dysprosium en fonction de cinq scénarios d'usage (scénarios évolutionnaires et scénarios révolutionnaires faisant intervenir une rupture technologique) (Alonso et al., 2012). En faisant varier quatre facteurs (l'augmentation de la capacité éolienne installée et de la mobilité électrique, la persistance des technologies actuelles, la nécessité de maintenir la teneur de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère sous les 450 ppm et l'absence de recyclage), l'article montrait qu'en 25 ans, les nouvelles technologies pourraient faire augmenter la demande pour le néodyme jusqu'à 700% et celle pour le dysprosium de 2600% par rapport à 2010.
- 2) **La demande en ETR sera globalement supérieure à l'offre**, conduisant à des tensions voire à des pénuries à court/moyen terme pour des métaux comme le dysprosium ou le néodyme. Certaines publications soulignent que la situation ne sera pas si critique, car les réserves connues sont suffisantes pour répondre à la demande (de Koning et al., 2018). Le détail des chiffres varie en fonction des scénarios et des hypothèses retenues — par exemple, la part du recyclage. Dans leur scénario avec 100 % de recyclage des aimants, Liang et al. estiment que la demande primaire en néodyme passera de 60 à environ 25 kt/an (Fig. 5 de (Liang et al., 2023) ; pour environ 400 GW installés par an et 150 millions de véhicules vendus par an). **Les actions sur la demande (sobriété) ou le renforcement de l'offre secondaire\* (recyclage) sont essentiels.** Granvik et al. montrent ainsi que pour le dysprosium, l'équilibre offre-demande est atteignable seulement dans le cas d'un scénario de faible demande : avec des politiques de sobriété relativement exigeantes, l'équilibre est atteint en 2060 à condition que le recyclage soit mis en place (Granvik et al., 2025). Les mêmes auteurs montrent que pour le néodyme, l'augmentation importante du recyclage à partir de 2035 est une condition pour que l'équilibre soit atteint dans le cadre d'un scénario de demande moyenne.

**Pour les éoliennes**, Kleijn et van der Voet estiment à 3,6 millions de tonnes le besoin en néodyme pour une production électrique de 24 TWe par des éoliennes d'ici 2050, soit 180 fois la production annuelle à la date d'écriture de l'article (Kleijn & van der Voet, 2010). La demande en néodyme, praséodyme et dysprosium pour les éoliennes pourrait passer de 9,5 kt (2011—2015) à 105,9—230,9 kt (2046—2050) (Li et al., 2020). Les auteurs évaluent à respectivement 22%, 22%, et 97% l'augmentation des besoins cumulés (sur 5 ans) en néodyme, praséodyme et dysprosium, faisant l'hypothèse d'un progrès

<sup>2</sup><https://iea.blob.core.windows.net/assets/ee01701d-1d5c-4ba8-9df6-abeeac9de99a/GlobalCriticalMineralsOutlook2024.pdf>

<sup>3</sup> [https://librairie.ademe.fr/index.php?controller=attachment&id\\_attachment=5411&preview](https://librairie.ademe.fr/index.php?controller=attachment&id_attachment=5411&preview)

technologique neutre et d'absence d'efficacité matière supplémentaire d'ici à 2050. Projetant la demande en éolienne, Deng et Ge montrent que plus la demande en éolienne augmente, plus la part relative des capacités installées avec des turbines “direct-drive” (technologie contenant des ETR) est grande (Deng & Ge, 2020).

**Pour les véhicules électriques**, Kleijn et van der Voet estiment à 2 milliards le nombre de voitures en 2050, ce qui correspondrait à 2 à 4 millions de tonnes de néodyme (200 fois la production annuelle actuelle de 2010) (Kleijn & van der Voet, 2010). D'après Habib et al., la demande future en néodyme et en dysprosium provient principalement des aimants permanents des moteurs de véhicules électriques, et peu des batteries NiMH des véhicules hybrides (Habib et al., 2020).

Dans les deux cas, **la demande en ETR provient principalement des aimants**. Selon Liang et al., la demande en ETR contenus dans les aimants NdFeB sur la période 2040–2050 sera plus grande de deux ordres de grandeur par rapport à la précédente décennie (2011–2020) (respectivement 18, 60 et 18 kt en 2050 pour dysprosium, néodyme et praséodyme) (Liang et al., 2023).

De manière générale, les ordres de grandeur évoqués dans les différentes publications sont convergents (Tableau 1-1) :

**Tableau 1-1 comparaison des estimations provenant de plusieurs études de la demande annuelle en néodyme en 2050.**

|                               | Capacité éolienne installée | Nombre de véhicules électriques vendus | Demande annuelle en néodyme en 2050   |
|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| Kleijn et van der Voet (2010) | 400 GW                      | 2 G au total                           | 60 kt <sup>4</sup>                    |
| Schulze et Buchert (2016)     |                             |                                        | Entre 27 et 70 kt suivant le scénario |
| Li et al. (2020)              | 700-1500 GW                 |                                        | 105-230 kt                            |
| Deng et Ge (2020)             |                             |                                        | 70 kt                                 |
| Liang et al. (2023)           | 400 GW                      | 150 M/an                               | 60 kt                                 |

Sur la base de cette littérature, la suite de ce rapport ne considère pas la croissance future de la demande en ETR comme une donnée, mais comme une hypothèse prépondérante. Un inventaire des besoins essentiels, tous usages confondus, et des différents moyens d'y répondre dépasserait très largement le cadre de l'expertise et supposerait d'avoir défini une hiérarchie entre ces usages. Il constituerait cependant une étape préalable indispensable à toute étude prospective sur les évolutions possibles de la demande en ETR.

### 1.1.6 Des usages dispersés aux usages concentrés en ETR

La consommation des ETR ne se pense pas uniquement en termes de tonnage, mais également en termes de *concentration des usages*, qui désigne la quantité d'ETR utilisée dans un unique matériau ou dispositif. On peut décliner ce concept à deux échelles :

- 1) à l'échelle du matériau où l'on peut distinguer de manière arbitraire les **matériaux à forte teneur en ETR** (> 10% en masse) tels que les aimants permanents, les poudres de polissage ou les

<sup>4</sup> Kleijn et van der Voet (2010) estiment également que 2 à 4 Mt de néodyme seront en circulation en 2050.

phosphores, et les **matériaux à faible teneur en ETR** (< 10% en masse et parfois de l'ordre du 1mg/kg soit 0,0001%) tel que les verres.

- 2) à l'échelle du dispositif, puisque les matériaux eux-mêmes peuvent être dispersés ou concentrés dans des dispositifs. Il est alors important de considérer à la fois la quantité d'ETR par dispositif et le nombre de dispositifs.

Dans une perspective de recyclage, la dispersion des matériaux contenant des ETR dans les technologies est en effet importante à considérer en particulier pour les étapes de collecte et de démantèlement. On peut alors distinguer deux grands types d'usages (cf. Figure 1.7). **Les usages concentrés** (moteurs d'éoliennes par exemple) sont caractérisés par un nombre limité de dispositifs contenant une masse importante de matériaux (aimant permanent dans le moteur), eux-mêmes concentrés en ETR (30% d'ETR dans les aimants permanents, de l'ordre de la tonne pour une éolienne marine). À l'inverse, **les usages dispersés** (fibres optiques) sont caractérisés par un très grand nombre de dispositifs en circulation et contenant des matériaux à faible concentration en ETR (0,01% d'ETR en masse) utilisant donc une faible quantité d'ETR par dispositif (de l'ordre du milligramme au gramme).

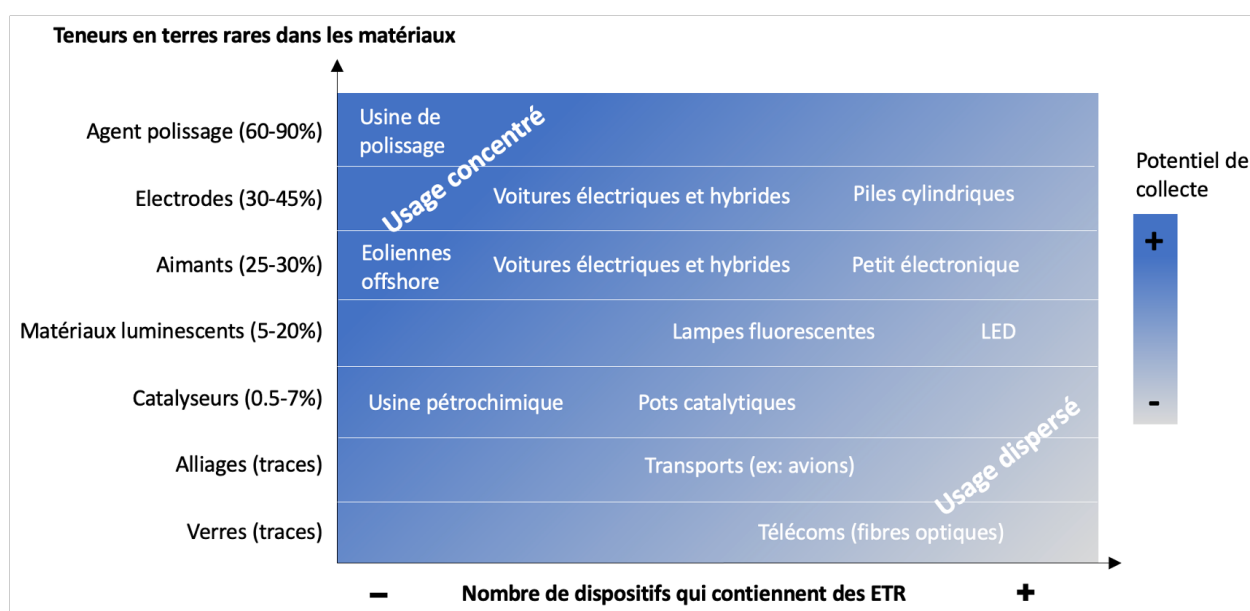


Figure 1.7 Impact de la dispersion des ETR dans les technologies sur le potentiel de collecte en vue du recyclage.

Les besoins croissants en ETR, portés en particulier par les exigences de la transition énergétique, soulèvent une question centrale : celle de l'approvisionnement. Bien que ces éléments, devenus stratégiques pour de nombreux secteurs, sont naturellement répartis à travers le monde, leur extraction\* et leur raffinage\* restent largement concentrés entre les mains de quelques acteurs de facto dominants. Comprendre la disponibilité des ressources, la nature géologique des gisements, ainsi que la dynamique de la production mondiale est indispensable pour évaluer la soutenabilité de cette demande croissante.

## 1.2 Ressources, Réserves et Production

Les ETR ne sont pas si rares, mais est-il pour autant possible d'exploiter n'importe quelle source ? Est-ce que seule la Chine en possède en quantité suffisante ? Une des complexités pour répondre à ces questions et appréhender la rareté des ressources métalliques tient aux interactions et contraintes ramifiées entre sciences de la terre, de l'innovation technologique, de l'économie (valeur du marché) et des normes socio-environnementales (Ganguli & Cook, 2018). Dans la croûte terrestre, l'or est plus de dix mille fois plus rare que le cérium, mais son usage est connu depuis des temps immémoriaux et son extraction se poursuit malgré des siècles d'exploitation. Ce sont donc non seulement les concentrations métalliques du sous-sol mais aussi leurs transformations, leurs usages, les valeurs économiques du marché, et les contraintes socio-environnementales d'extraction et de séparation qui définissent le seuil à partir duquel un gisement métallique peut être exploité. Ses importantes réserves, mais aussi sa forte détermination stratégique, permettent aujourd'hui à la Chine de contrôler le marché des ETR.

### 1.2.1 Des ressources et réserves géologiques bien distribuées géographiquement

En géologie, une occurrence avec des concentrations métalliques (minéral) anormalement élevées est appelée **gîte**\*. Les ressources d'un gîte dépendent des volumes (tonnages) et concentrations du minéral. Si les conditions du marché satisfont des conditions d'exploitation\* économiquement viables, le gîte peut alors être appelé **gisement**\* et les **ressources**\* exploitables sont alors requalifiées en **réserves**\*. De ce fait, les réserves d'un pays fluctuent en fonction des découvertes géologiques et des conditions du marché qui permettraient de transformer des ressources non-exploitable en réserves.

#### 1.2.1.1 Les ressources

En 2017, **les ressources** mondiales en ETR sont estimées à 478,14 Mt « d'oxydes d'ETR équivalents » (Zhou et al., 2017). Il ne s'agit pas d'oxydes réellement produits, mais d'une façon standardisée de comparer la quantité totale d'ETR contenue dans un gisement ou produite. Les ressources se répartissent principalement entre une dizaine de pays : la Chine (35%), le Brésil (11%), l'Australie (10%), la Russie (10%), le Groenland (9%), le Canada (7%), la Suède (6%), le Vietnam (3%), les USA (3%), et les autres (6%).

## RÉSERVES, RESSOURCES ET EXTRACTION D'ETR DANS LE MONDE

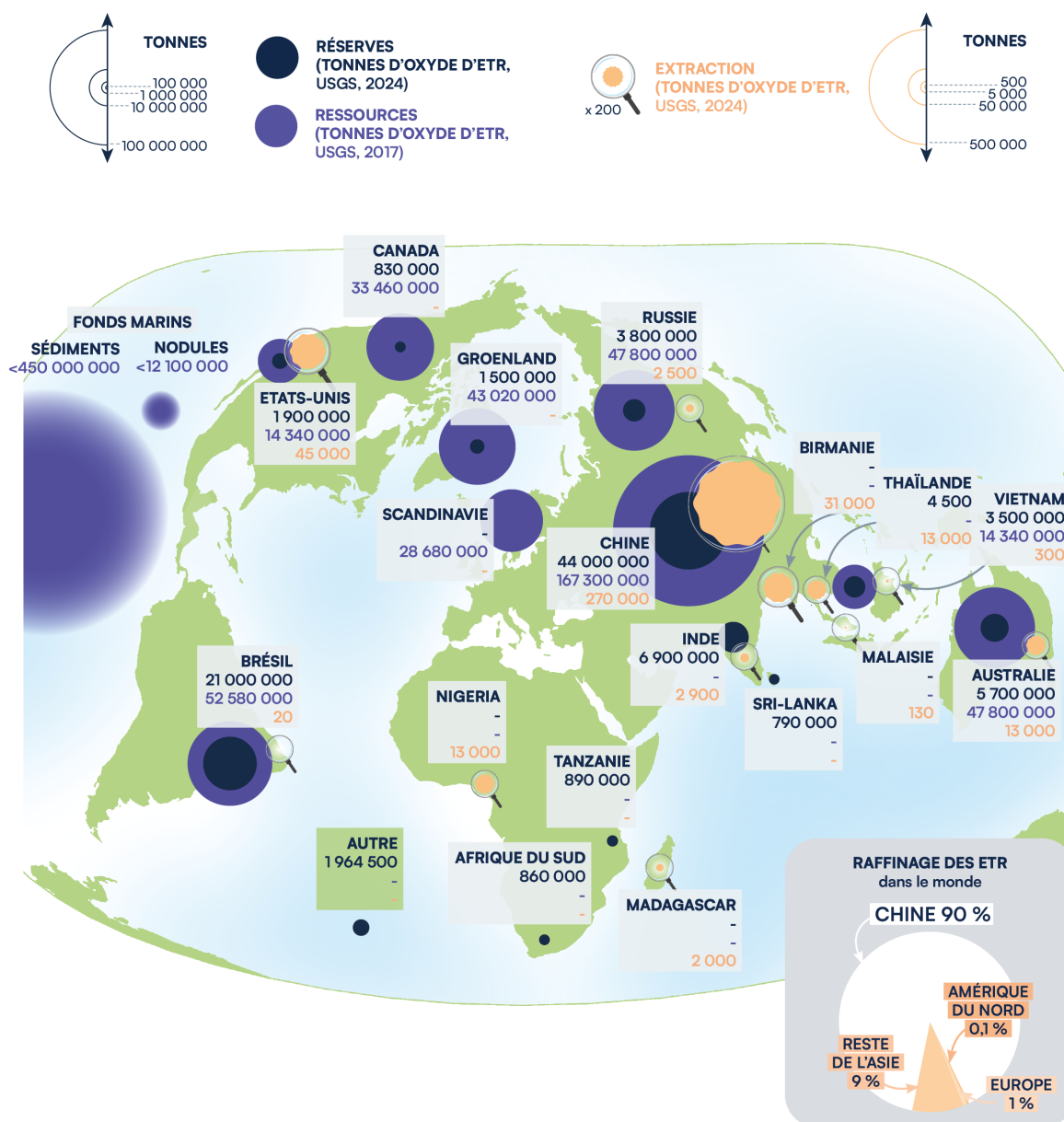


Figure 1.8 Cartographie des réserves, ressources et extraction d'ETR dans le monde (selon les données de l'USGS), ainsi que la répartition de la production d'ETR raffinés (selon les données de l'IEA).

À l'échelle mondiale, la distribution inégale des ressources en ETR s'explique par la géologie du sous-sol. Les gîtes résultent de processus d'enrichissement d'ETR dans des conditions environnementales très contrastées (Charles et al., 2022) (cf. Figure 1.9). Dans la croûte terrestre profonde (processus endogène), les gîtes d'ETR se forment à partir de magmas (carbonatites et complexes alcalins) ou en interaction avec des fluides hydrothermaux (Iron oxide copper gold ou IOCG). Des enrichissements d'ETR peuvent également se produire à la surface de la Terre (processus exogènes) soit par des processus sédimentaires (phosphates et phosphorites) ou par altération de roches (dans les régolithes (argiles ioniques)).

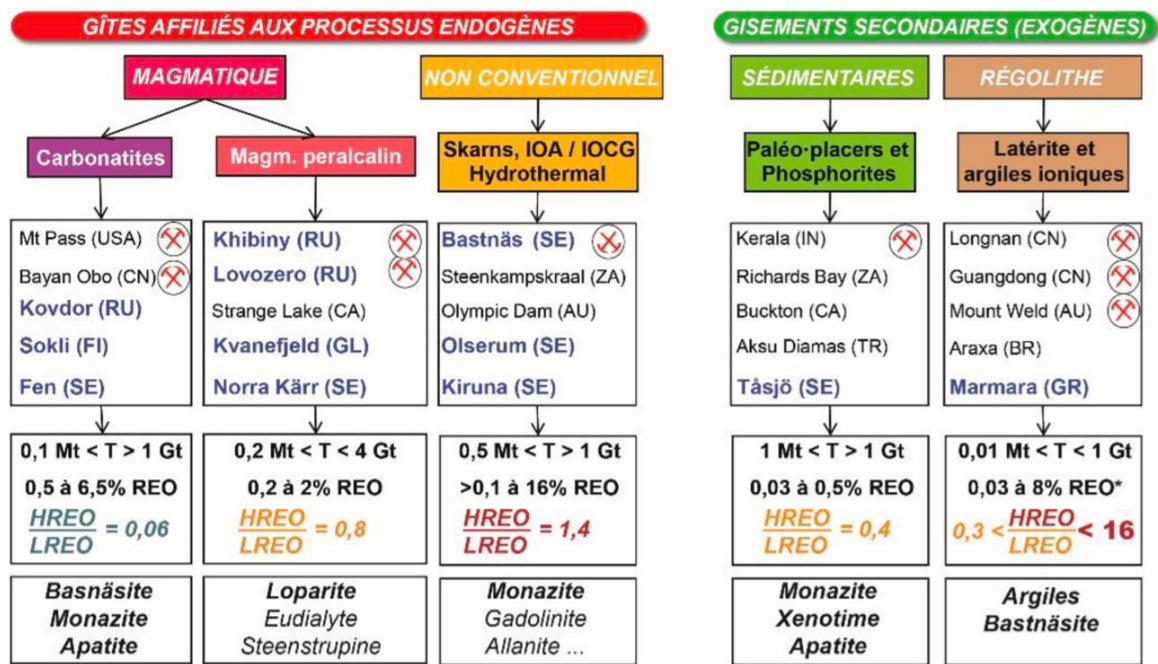


Figure 1.9 Caractéristiques des principaux gisements. En bleu, les gîtes majeurs localisés en Europe ou au Groenland. T : tonnage, la valeur de 8% correspond au gisement de Mont Weld, le rapport HREO/LREO correspondant est de 0,3. Les mines en activité sont suivies d'un symbole minier. Bastnäs relève du patrimoine minier. Abréviations : AU (Australie), BR (Brésil), CA (Canada), CN (Chine), FI (Finlande), GL (Groenland), GR (Grèce), IN (Inde), RU (Russie), SE (Suède), TR (Turquie), US (États-Unis), ZA (Afrique du Sud). Tirée de (Charles et al., 2022).

Ce sont les carbonatites qui représentent les plus importantes ressources d'ETR avec 62% des ressources connues. Les carbonatites incluent les gisements exploités de Bayan Obo (Chine) et Mountain Pass (États-Unis). Bien qu'en général de petites tailles, les carbonatites sont des formations clés pour l'exploitation des ETR car ils s'y trouvent les plus concentrées (0,5-6,5%). De plus, les ETR y sont principalement contenus dans trois minéraux de carbonates (bastnäsite) et phosphates (monazite et xenotime) pour lesquels les procédés d'extraction et de séparation sont les mieux établis. Ces minéraux contiennent principalement des ETR légers en forte concentration, et les ETR lourds y sont en faible concentration (autour de 6% des ETR totaux). Le gisement de Fen en Norvège appartient à ce type de gisements.

Après les carbonatites, ce sont les ressources profondes de complexes alcalins et de type IOCG qui correspondent à 16 et 15% respectivement des ressources connues. Les gîtes de complexes alcalins se trouvent plus particulièrement en Russie (Khibiny et Lovozero), au Canada (Strange Lake), et au Groenland (Kvanefjeld), un projet à Nora Kärr en Suède est en exploration. Les ressources de type IOCG se trouvent principalement en Suède avec comme exemple notable Kiruna ou encore Bastnäs qui est à l'origine du nom donné au minéral bastnäsite. Les concentrations élevées des gîtes de type IOCG en Suède expliquent notamment pourquoi les ETR, et notamment le cérium et l'yttrium, ont été découverts pour la première fois par Aarhenius dans ce pays. Une des difficultés d'exploitation des complexes alcalins et IOCG réside dans la complexité de la minéralogie des ETR dans des silicates (loparite, eudialyte, allanite, ...), pour laquelle les procédés d'extraction sont moins établis que pour les carbonates et phosphates. Dans le cas des gisements de type IOCG, les ETR sont des co-produits, c'est-à-dire des métaux compagnons des minerais principaux représentés par le fer, le cuivre et l'or. C'est notamment le cas de la mine de Kiruna, en activité depuis plus d'un siècle pour l'exploitation du fer, qui représente l'un des plus gros gisements mondiaux.

Les ressources sédimentaires de type placer, exploitées historiquement en premier, représentent autour de 5% des ressources et sont principalement localisées en Inde. Ces ressources présentent l'avantage d'accumuler gravitairement dans les rivières ou sur les rivages les minéraux enrichis en métaux lourds. En retour, le désavantage est un enrichissement en éléments radioactifs de thorium et uranium.

Ne représentant que 1% des ressources en ETR, les ressources de type argiles ioniques sont la source des ETR lourds. Ce type de ressource se trouve dans des profils d'altération qui sont seulement exploités au Sud-Est de la Chine.

### 1.2.1.2 Les réserves

Selon le service géologique des États-Unis (USGS), **les réserves** mondiales d'ETR sont d'environ 100 Mt d'oxydes d'ETR en 2025. Les deux tiers de ces réserves se concentrent dans deux pays : la Chine (44%) et le Brésil (21%). D'autres pays disposent également de réserves dépassant le million de tonnes, parmi lesquels l'Inde (6,9%), l'Australie (5,7%), la Russie (3,8%), le Vietnam (3,5%), les États-Unis (1,9%) et le Danemark (Groenland, 1,5%). À cela s'ajoutent des pays comme l'Afrique du Sud, la Birmanie, le Canada, Madagascar, la Malaisie, le Nigeria, le Sri Lanka, la Tanzanie et la Thaïlande, qui représentent ensemble environ 3%. En Europe, les principaux **gisements** se trouvent sur le bouclier scandinave, avec des réserves estimées autour de 1% des réserves mondiales. Les réserves européennes ne sont toutefois pas prises en compte dans les données de l'USGS.

L'évaluation des réserves reste délicate, comme en témoignent les évolutions par pays publiées par l'USGS depuis 1996. À l'échelle mondiale, les estimations sont restées stables entre 1996 et 2009, avant de grimper de 110 à 140 Mt entre 2010 et 2014, puis de se stabiliser autour de 120 Mt jusqu'en 2024, pour redescendre en 2025 à un niveau similaire à celui de 1996. Ces variations ne semblent pas corrélées à la production cumulée d'ETR, qui atteint environ 4,5 Mt entre 1996 et 2025.

L'augmentation apparente des réserves s'explique en partie par l'intégration de nouveaux pays producteurs, comme le Brésil (21 Mt à partir de 2014) ou le Vietnam (22 Mt en 2017). À l'inverse, certaines disparitions ou révisions à la baisse ont affecté les données nationales : en 2015, par exemple, les réserves des États-Unis sont brutalement passées de 18 à 1,9 Mt. De même, la forte baisse observée en 2025, de 120 à 100 Mt, résulte principalement d'une révision à la baisse des réserves du Vietnam, passées de 22 à 3,5 Mt. A priori, ces variations s'expliquent par une surestimation des capacités d'exploitation des ressources.

Au-delà des ressources et réserves de minerais primaires, des sources secondaires\* d'ETR émergent comme de potentielles alternatives en particulier pour les pays sans gisements primaires. Ces sources secondaires incluent les déchets miniers (ex. : résidus de bauxite\*, phosphogypses\*), les déchets industriels (ex. : cendres de charbon, rebuts de fabrication d'aimants permanents) et les produits en fin de vie contenant des ETR, aussi connus sous le nom de mine urbaine\* (ex. : smartphones, voitures électriques, éoliennes, solutions d'agents de contraste, etc.). Le potentiel de ces sources est étudié dans le quatrième chapitre de ce rapport.

## 1.2.2 Une centralisation de l'extraction et du raffinage en Chine

La production mondiale d'ETR est en croissance quasi exponentielle depuis l'ouverture de la mine de Mountain Pass aux États-Unis en 1952. Jusqu'en 1965, la production mondiale ne dépassait guère les 10 000 tonnes d'oxydes d'ETR par an. Elle approche en 2024 les 390 000 tonnes annuelles avec une croissance moyenne de 13% depuis 2015. La production annuelle demeure relativement faible par rapport aux réserves identifiées (facteur de 230 entre les réserves et la production annuelle de 2024).

Si les ressources et réserves sont inégalement distribuées à l'échelle mondiale, l'extraction et la production mondiale d'ETR deviennent majoritairement contrôlées par la Chine à partir des années 1990 (cf. Figure 1.10). En 1992, à l'occasion d'une visite en Mongolie intérieure, Deng Xiaoping, alors dirigeant de la Chine, déclarait : « Le Moyen-Orient a le pétrole, la Chine a les terres rares ». Visionnaire, la Chine a alors investi massivement dans l'exploitation des ETR à toutes les étapes de la chaîne de valeur, depuis l'extraction à partir des gisements à leur séparation\*, traitement\* et raffinage, et enfin à leur transformation en produits intermédiaires (matériaux) ou finis (incorporé dans le dispositif destiné à l'usage). Cette stratégie a porté ses fruits. Au milieu des années 1990, la production chinoise a dépassé la production historiquement assurée par les États-Unis. Dans les années 2000, la production chinoise atteint un quasi-monopole (97% de la production). Après la crise de 2010 (cf. *infra* « La mise en politique des ETR »), de nouvelles sources d'approvisionnement sont recherchées. À partir de 2011, la mise en exploitation de nouveaux gisements et la réouverture de mines historiques diversifient l'origine des minerais extraits. De nouveaux projets d'exploration se mettent en place (Barakos et al., 2016). En 2024, les autres producteurs (hors Chine) atteignent un tiers de l'extraction mondiale et sont principalement représentés par les États-Unis, l'Australie, la Birmanie, le Nigeria et la Thaïlande. Malgré cette diversification de l'activité minière, la majorité des ETR extraits sont ensuite envoyés en Chine pour leur raffinage (environ 90% en 2024 selon l'IEA).

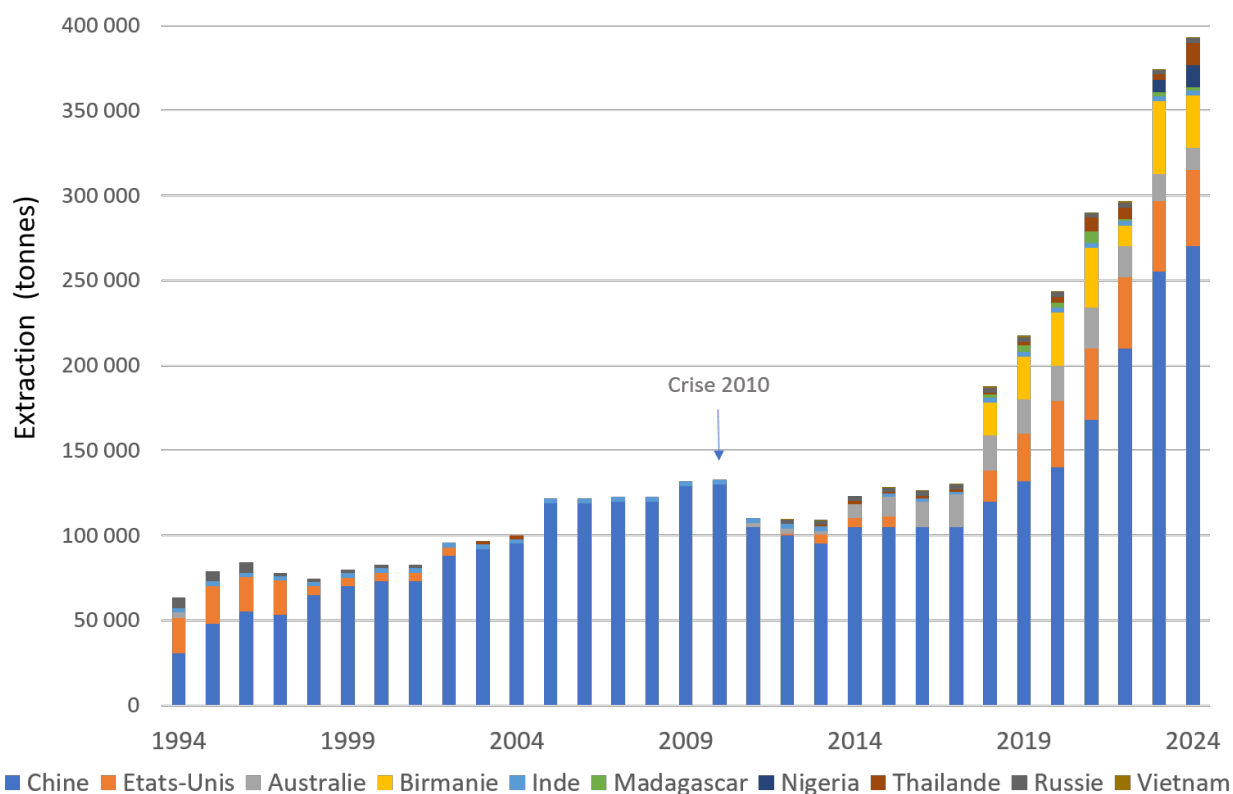


Figure 1.10 Évolution de l'extraction mondiale d'ETR entre 1994 et 2024 (en tonnes, USGS)

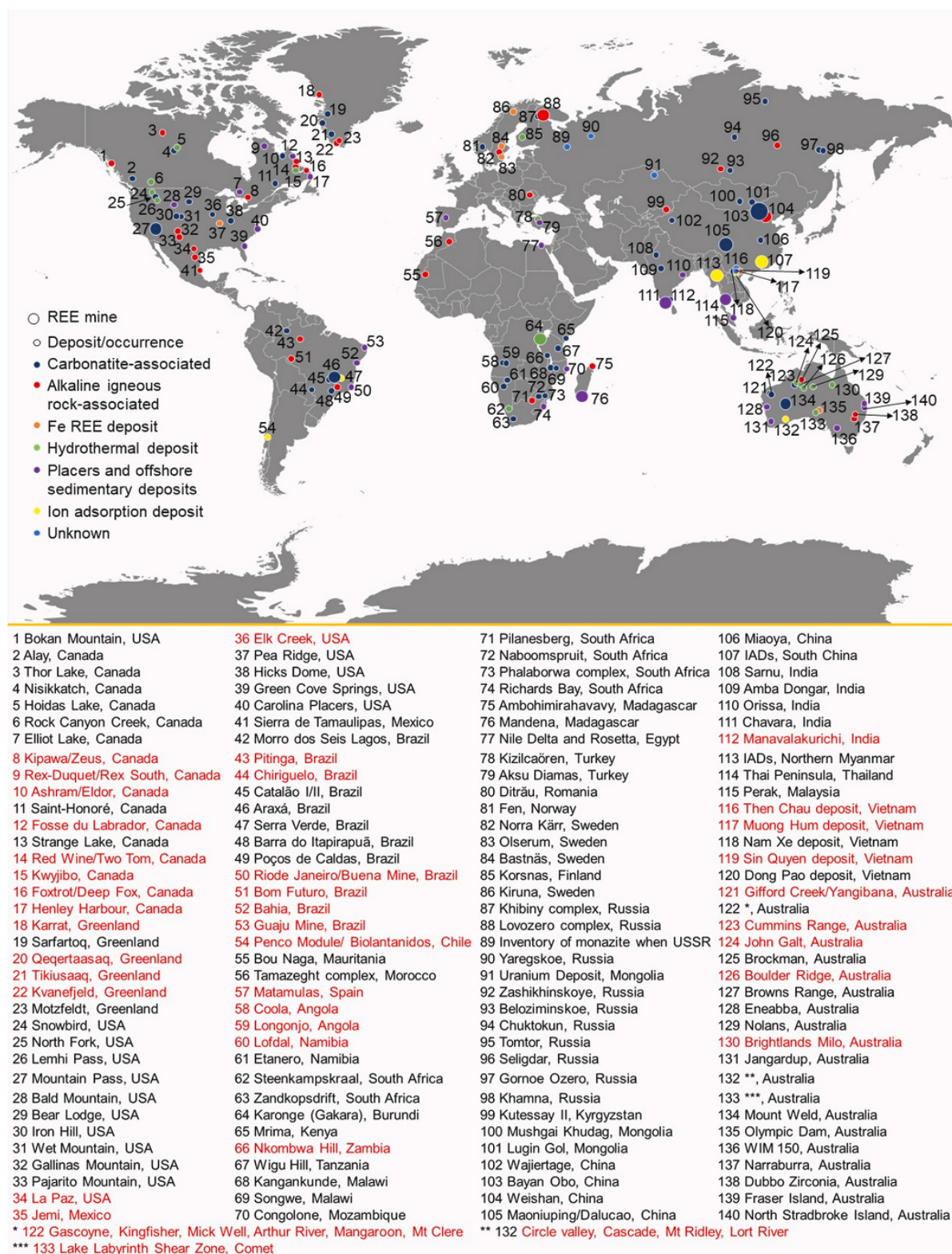


Figure 1.11 Mines et gisements connus d'ETR à l'échelle mondiale. Tirée de (Chen et al., 2024).

Il est également intéressant de comparer les volumes extraits d'ETR par rapport à d'autres métaux. L'extraction d'ETR en 2019 représentait 0,007% du tonnage des métaux produits à l'échelle mondiale. Une analyse trop rapide de ces données serait alors de considérer qu'il est peu pertinent de se focaliser

sur les enjeux de l'approvisionnement en ETR. Cependant, cela serait sans compter sur le caractère non substituable des ETR dans la plupart de leurs usages actuels ainsi que sur le fort taux de croissance de la demande. Ainsi, et contrairement à la plupart des autres métaux, ce faible tonnage est suffisant pour générer de très fortes tensions économiques et géopolitiques, faisant des ETR des éléments critiques.

### 1.2.3 Impacts environnementaux et sanitaires de l'extraction des ETR

De manière générale, les impacts sanitaires et environnementaux de l'extraction des ETR sont encore mal compris sur le plan quantitatif, très hétérogènes et restent encore peu étudiés dans leur globalité. Il existe un faible nombre d'études systématiques d'évaluation des impacts, en particulier celles qui incluraient un suivi de référence avant la mise en valeur des ressources (Browning et al., 2016). Si une catastrophe environnementale a entraîné par le passé la fermeture de la dernière mine d'ETR de Mountain Pass aux USA (avant qu'elle ne soit ré-ouverte récemment), plusieurs études réalisées à proximité des zones minières relèvent les répercussions chroniques sur l'environnement et la santé de l'exploitation et la production intensives d'ETR.

#### 1.2.3.1 Consommation de matières et d'énergie

Les études montrent que l'**utilisation de nombreux produits chimiques** lors des différentes phases d'extraction et de transformation des ETR est responsable des principaux impacts (Marx et al., 2018). Par exemple, dans le cas de la mine de Bayan Obo en Mongolie intérieure, une seule étape d'enrichissement d'une tonne (t) d'ETR nécessite 4,41 t d'acide sulfurique, 12,32 t de chlorure de sodium, 1,64 t d'hydroxyde de sodium, 1,17 t d'acide chlorhydrique, 1,90 t d'eau et le broyage de près de 50 t de minerai (Yin et al., 2021). Cependant, ces impacts varient significativement en fonction du type de gisement, de la minéralogie, de la teneur en minerai, des techniques de traitement et des co-produits (Peiro & Mendez, 2013). En particulier, l'impact environnemental de la production d'ETR est d'autant plus élevé que la diminution de la qualité de minerai augmente. Malgré les pratiques et process industriels qui cherchent à être plus respectueux de l'environnement et la promotion d'une exploitation des ressources minérales plus responsable (Plante et al., 2023), l'empreinte environnementale reste très significative.

**En ce qui concerne l'énergie** utilisée pour obtenir 1 t d'un ETR individuellement, elle varie de 38 GJ à 48 GJ, à l'exception du scandium (148 GJ-t<sup>-1</sup>) et de l'yttrium (75 GJ-t<sup>-1</sup>) (Peiro & Mendez, 2013). Dans une approche d'analyse de cycle de vie, Peiro et Mendez estiment les besoins en matériaux et en énergie pour la production d'ETR en se basant sur les réactions chimiques théoriques et la thermodynamique et montrent que les besoins en matériaux et en énergie varient considérablement selon le type de minerai, l'installation de production et le procédé d'enrichissement sélectionné (Peiro & Mendez, 2013). Les pertes les plus importantes surviennent lors de l'extraction (25 à 50 %) et de l'enrichissement (10 à 30 %) des ETR. L'énergie requise pour leur extraction dépend dans ce cas de leur concentration dans le minerai et du rendement de récupération, qui varient de 50 à 90 % selon l'installation ; Mountain Pass présentant le taux de récupération le plus élevé. La récupération des ETR à partir d'autres gisements nécessite l'extraction de quantités de minerai plus importantes, dix fois supérieures à celles de Mountain Pass, tout en gardant une consommation énergétique similaire (0,4 GJ/tonne d'ETR) à celle de l'extraction du site de Bastna Ore à Bayan Obo. Le procédé d'enrichissement des ETR, dépendant fortement de leur forme chimique dans le minerai, est l'étape nécessitant le plus d'intrants.

### 1.2.3.2 Génération de déchets radioactifs

Parmi les impacts recensés, la **génération de déchets radioactifs** est une problématique majeure et spécifique de l'extraction des ETR (Yin et al., 2021). En effet, les éléments radioactifs naturels comme l'uranium (U) et le thorium (Th) sont géochimiquement associés aux ETR, en particulier dans la monazite et la bastnäsité. Ainsi, les processus d'extraction des ETR peuvent produire, selon la nature du gisement, jusqu'à environ 1,4 t de déchets radioactifs pour 1 t d'oxyde d'ETR.

Par exemple, la teneur moyenne en Th aéroporté dans les particules totales en suspension variait de 820  $\mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  dans les zones minières à 39 720  $\mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  dans la région de Bayan Obo, ce qui est bien plus élevé que le niveau de fond mondial de 0,5  $\mu\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$  (Talan & Huang, 2022). La mobilisation de ces radioéléments, tels que le thorium-232 et l'uranium-238, entraînent des impacts environnementaux supplémentaires (Zapp et al., 2022). Une fois libérés dans l'environnement, ces ions toxiques peuvent pénétrer dans les organismes vivants et s'accumuler dans le foie, la rate et la moelle. Par ailleurs, l'inhalation de poussières de thorium augmenterait le risque de cancer du poumon et du pancréas (Patel, 2022), à Bayan Obo, la moitié des travailleurs y sont exposés (Balaram, 2019).

Dans la mine de Bayan Obo, les ETR sont produits comme produit secondaire du minerai de fer, et 200 tonnes de boues de dioxyde de thorium sont généralement générées chaque année à partir de 100 000 tonnes de concentrés d'ETR avec des taux de radioactivité mesurés dans l'usine et dans le sol, 32 et 1,7 fois supérieurs à la normale. La problématique de la génération de déchets radioactifs dépend beaucoup de la nature du gisement. La bastnäsité contiendrait jusqu'à 0,3 % en poids de dioxyde de thorium et 0,09 % en poids de dioxyde d'uranium. En revanche, les teneurs en thorium et en uranium de la monazite peuvent atteindre respectivement 20 % et 16 % en poids. De même, le xénotime peut contenir jusqu'à 5 % en poids de dioxyde d'uranium (Talan & Huang, 2022).

En outre, les complexes de ces matières radioactives deviennent plus solubles dans des conditions acides et les radionucléides peuvent s'accumuler dans la couche supérieure des sols, former des complexes avec les matières organiques, être transférés dans les cours d'eau ou dans l'air, à travers le sol et les plantes et entrer dans la chaîne alimentaire (Sabour, 2014). Dans les eaux naturelles de différents pays (Émirats Arabes Unis, Pologne, Espagne, Bulgarie, Chine), ces processus ont entraîné des concentrations atteignant 69,2, 2,5 et 24,8 mg L<sup>-1</sup> pour l'U, le Th et les ETR, tandis que dans les sols et les sédiments, elles atteignent parfois 542, 75 et 56,5 g kg<sup>-1</sup>, respectivement (Sager & Wiche, 2024).

### 1.2.3.3 Contamination de l'environnement

Un risque environnemental important est avéré principalement autour des zones fortement contaminées comme les mines ou les installations industrielles de transformation, notamment à cause de l'importante concentration et de la **toxicité intrinsèque des ETR**. Ainsi, l'extraction des ETR perturbe les sols, la végétation et les écosystèmes.

Les rejets dans l'air et les eaux environnantes peuvent affecter non seulement l'homme, mais aussi le sol, la faune et la flore (Patel, 2022) augmentant directement la teneur en ETR dans les environnements de surface. De plus, les décharges de déchets miniers exposées aux intempéries sont susceptibles de polluer davantage l'air, le sol et les eaux de surface et souterraines, aggravant la dégradation de l'environnement et les risques pour la santé humaine.

#### 1.2.3.3.1 Dégradation des sols et de la végétation

Les processus d'exploitation et d'extraction minière présentent des risques pour les écosystèmes terrestres en provoquant des perturbations géologiques, l'érosion des sols, des changements hydrogéologiques (Gkika et al., 2024) ainsi que des dommages à la végétation et la dégradation du paysage. Les zones d'extraction d'ETR sont également susceptibles d'être contaminées par un cortège d'autres métaux potentiellement toxiques liés à l'activité minière. En Chine du Sud, les concentrations moyennes de Co, Mn, Ni, Pb et Zn sont jusqu'à 1,62 fois plus élevées que les valeurs de base du sol, particulièrement à proximité des routes et des zones minières. Les indices de risque potentiel écologique et cancérigène ont montré une contribution principalement due au Co, au Pb et au Cr, qui représentaient plus de 90 % (Fan et al., 2022).

#### 1.2.3.3.2 Pollution de l'air

La diffusion de poussières transportées par le vent est une forme importante de pollution dans les zones minières, en particulier à proximité des mines à ciel ouvert. Dans le gisement d'ETR de Bayan Obo, la migration des poussières minérales contenant des ETR contribue à la poussière des routes et aux particules atmosphériques qui touchent l'ensemble de la région (Sager & Wiche, 2024), dépassant même dans certains cas les limites autorisées actuelles, réglementées uniquement pour l'yttrium et le cérium en milieu professionnel à 1 et 5 mg/m<sup>3</sup>, respectivement (Gkika et al., 2024).

#### 1.2.3.3.3 Pollution des eaux

La croissance de l'extraction des ETR a entraîné une forte augmentation de leurs concentrations dans les environnements de surface. Par exemple, les concentrations d'ETR dans la rivière Sidaosha traversant la zone de Bayan Obo sont 200 fois plus élevées que les valeurs moyennes des ETR dans d'autres rivières du nord de la Chine. Quelle que soit leur origine, les milieux aquatiques jouent un double rôle à l'égard de ces éléments de stockage temporaire ou à long terme. L'environnement naturel de l'eau influe ensuite dans une large mesure sur le devenir et la spéciation des ETR dans les masses d'eau et donc leur biodisponibilité et (éco)toxicité associée.

Les niveaux de bioaccumulation sont alors particulièrement élevés aux niveaux trophiques les plus bas aussi bien chez les organismes terrestres, marins ou dulcicoles (Romero-Freire et al., 2019; Squadrone et al., 2019) et diminuent dans le biote à mesure que le niveau trophique augmente. Les concentrations d'ETR dans les plantes alimentaires sont généralement plus élevées que dans la viande, expliquant que les céréales et les légumes contribuent le plus à l'apport quotidien moyen en ETR pour l'alimentation humaine qui peut être 2,4 fois plus élevé dans les zones d'exploitation minière (Sager & Wiche, 2024). En général, les ETR légers sont plus facilement absorbés par les plantes que les ETR lourds en raison de leur plus grande mobilité dans le sol.

#### 1.2.3.3.4 Impacts sur les organismes aquatiques et terrestres

La littérature concernant la toxicité des ETR pour les organismes aquatiques est actuellement en plein essor, mais se limite principalement à certains éléments (La, Gd, Nd et Y), ce qui laisse peu d'informations sur les autres ETR et leurs colloïdes (Malhotra et al., 2020).

Les essais biologiques réglementaires expérimentaux avec des ETR, qui établissent des relations de cause à effet, ont révélé des valeurs de Concentration Létales 50 % (CL50) qui diffèrent de plusieurs ordres de grandeur pour la même espèce biologique et une terre rare spécifique (Revel et al., 2025). Les variations des durées d'exposition, des paramètres et de la nature des sels d'ETR peuvent compliquer la comparaison des résultats des bioessais, justifiant d'accorder une attention particulière à la manière dont les données de concentrations d'ETR sont exprimées et interprétées et de l'intégration de leur spéciation dans l'évaluation de leur toxicité qui à défaut pourrait être sous-estimée.

Si les études concernant l'impact environnemental et l'écotoxicologie des ETR ont progressé cette dernière décennie, peu d'études sont publiées sur les espèces marines (Piarulli et al., 2021). La connaissance sur leurs effets (éco)toxicologiques est fractionnée et pas forcément concluante, bien souvent exposome, ETR et espèce dépendants (Arienzo et al., 2022; Gonzalez et al., 2014; Lachaux, Catrouillet, et al., 2022; Lachaux, Cossu-Leguille, et al., 2022; Moreira et al., 2020; Neira et al., 2022; Pagano et al., 2023; Revel et al., 2025) (Arienzo et al., 2022; Lachaux, Catrouillet, et al., 2022; Lachaux, Cossu-Leguille, et al., 2022). Des effets comme des développements anormaux, des dommages cellulaires et tissulaires, du stress oxydatif et de la neurotoxicité ont été rapportés chez les organismes vivants.

Actuellement, le risque environnemental est avéré mais limité aux zones de hot spot de contamination comme les sites d'activités minières et les zones de rejets des effluents d'industries, d'hôpitaux ou de station d'épuration (Gonzalez et al., 2014; Lachaux, Cossu-Leguille, et al., 2022) en soulignant que les ETR lourds ont tendance à être plus toxiques pour les organismes aquatiques que les ETR légers.

Les études liées aux effets sur la santé indiquent également des effets favorables et défavorables après l'exposition aux ETR. Les effets positifs des ETR sur la qualité et la croissance ont également été mis en évidence dans les cultures et le bétail. Chez les premières, des effets positifs sur la photosynthèse, la production de biomasse, les membranes cytoplasmiques, le métabolisme des nutriments, les enzymes, l'efficacité de l'utilisation de l'eau, la germination et la croissance, la quantité de sucres et d'autres métabolites, et le nombre de vitamines, entre autres, ont été constatés et peuvent être expliqués par des interactions avec le métabolisme du calcium. Chez les animaux, les ETR sont utilisés comme additifs alimentaires car ils peuvent améliorer la production de lait, d'œufs et de viande. Cependant, certaines études montrent l'effet inverse, avec des effets toxiques associés à la substitution de Mg, Ca, Fe et d'autres éléments par des ETR. Ces effets positifs ou négatifs dépendent de la dose d'ETR (Patel, 2022). Les études ont également démontré que les ETR peuvent suivre une tendance hormétique liée à la concentration, ce qui les rend stimulants ou protecteurs à de faibles doses et néfastes à des concentrations élevées.

### 1.2.3.4 Impacts sanitaires

Alors que la pollution radioactive est un problème important qui retient l'attention de la santé publique depuis un certain temps, la toxicité directe des ETR est souvent négligée en raison des quantités insignifiantes que l'on trouve naturellement dans l'environnement. Chez l'homme, l'exposition avancée aux ETR est particulièrement critique pour les travailleurs et les résidents des environnements miniers ainsi que pour les travailleurs dans le domaine du raffinage des minerais et du traitement des déchets électroniques. Les ETR peuvent pénétrer dans le corps humain par plusieurs voies, s'accumuler dans les cheveux, les reins ou le sang et affecter la santé humaine en provoquant de nombreuses maladies liées à la production d'espèces réactives de l'oxygène, des dommages à l'ADN et la mort cellulaire. Chez l'homme, les ETR provoquent une fibrose systémique néphrogène et des dommages graves aux systèmes néphrologiques associés à un trouble neurologique dysfonctionnel, à des lésions du tissu fibreux, au stress oxydatif, à la pneumoconiose, à la cytotoxicité, aux effets anti-testiculaires et à la stérilité masculine. Les données épidémiologiques établissant un lien direct entre les ETR dans l'environnement et la santé

humaine demeurent faibles, sauf en ce qui concerne les ETR dans les dispositifs médicaux (Balaram, 2019).

Dans des conditions naturelles, les ETR ne sont disponibles qu'en faibles concentrations dans les milieux aquatique et atmosphérique. Le niveau de base en ETR dans les eaux, tant de surface que souterraines, varie considérablement et dépend principalement de la géologie locale. Toutefois, leur utilisation intensive et croissante dans les technologies modernes, ainsi que la combustion de la biomasse et du charbon, les engrais, l'alimentation du bétail, les installations médicales, les déchets électroniques, les installations de recyclage et le raffinage du pétrole, augmentent leurs concentrations dans l'environnement. En tant que composés anthropogéniques, ils pénètrent alors dans les sols et les eaux par le biais des rejets, des eaux usées et des émissions atmosphériques et sont ensuite dispersés dans tous les compartiments par le vent, le ruissellement, la lixiviation\* ou l'irrigation, libérant de la radioactivité ou d'autres sous-produits chimiques en créant plusieurs nouvelles voies de bioaccumulation dans les plantes, les animaux et les êtres humains (Balaram, 2019). Les ETR provenant de sources anthropiques sont particulièrement préoccupants pour l'environnement car émis sous forme ionique ; ils sont très mobiles et donc disponibles pour les organismes, y compris pour l'homme.

### 1.2.4 Le « balance problem »

Contrairement aux autres éléments, les ETR sont une famille d'éléments qui sont forcément extraits ensemble. Néanmoins, ils ne sont pas tous utilisés pour les mêmes applications. Ainsi, un déséquilibre peut apparaître entre leur production et leur consommation. En effet, les besoins des technologies sont très spécifiques : elles n'utilisent chacune souvent qu'un à cinq ETR alors que dans la nature et en particulier dans les gisements, les 17 ETR sont toujours associés avec des abondances relatives qui peuvent varier en fonction de l'origine géologique du substrat. **Il y a donc un fort déséquilibre entre la production et les besoins, connu sous le nom de « balance problem »** (Binnemans et al., 2018). Ce déséquilibre entraîne une sur-production de certains ETR (ex. : cérium et lanthane qui sont aussi les plus abondants naturellement) et des tensions autour des ETR les plus consommés et/ou les moins naturellement concentrés (ex. : dysprosium et terbium) avec des conséquences importantes sur le marché. Il est donc important de considérer l'offre et la demande des ETR de manière individualisée, en particulier dans un contexte de demande croissante en aimants permanents qui exacerbe ce phénomène pour le néodyme, le praséodyme, le dysprosium et le terbium.

### 1.2.5 Le marché des ETR

Le marché des métaux dépend de leur production et de leur prix. En 2018, la valeur de marché des terres rares était de quelques milliards de \$ et principalement contrôlée par le néodyme, le praséodyme et le dysprosium, utilisés pour les aimants permanents.

#### 1.2.5.1 Structure et dimension du marché

La structure et dimension du marché des ETR s'explique principalement par leur plus faible production annuelle. Bien qu'en constante croissance, le volume total de production en ETR à 350 000 tonnes reste bien inférieur aux milliards de tonnes de fer produites annuellement. La production annuelle des ETR individuels est en lien direct avec leur concentration crustale. Les ETR légers qui sont plus abondants que les ETR lourds représentent les plus gros volumes de la production. À eux seuls, la production de lanthane, de cérium et de néodyme doit représenter autour de 90% du volume total d'ETR. L'yttrium est

l'ETR lourd le plus abondant avec une production de l'ordre de 10000 t. Enfin, le lutécium, l'ETR le moins abondant, a la production la plus faible avec quelques centaines de tonnes produites annuellement. Il existe donc un rapport de volume de production de 1/10 millions entre le fer et le lutécium.

Spécifiquement, la valeur marché des ETR dépend non seulement des volumes mais aussi du prix de chacune d'entre elles. Là encore, le prix des ETR est en premier ordre fixé par leurs abondances crustales. Les ETR légers plus abondants ont des prix plus faibles que les ETR lourds. Le lanthane et le cérium, les deux ETR les plus abondants, sont les moins chers avec un prix analogue autour de 1000 \$/t. Le lutécium quant à lui est le plus cher avec un prix qui se rapproche du million \$/t. Néanmoins, au vu de leur prix et volume, le lanthane, cérium et lutécium, mais aussi le gadolinium, s'alignent sur une valeur de marché équivalent autour de 100 millions \$/an (Fortier et al., 2022). Certains ETR vont s'éloigner de cette tendance selon leurs usages qui jouera sur leur prix. Par exemple, le néodyme qui a une concentration crustale proche du lanthane, mais est utilisé spécifiquement pour les aimants, a un prix quelques dizaines de fois supérieur à celui-ci. Le marché du néodyme s'aligne donc sur une valeur autour du milliard \$/an. Similairement, le praséodyme et le dysprosium se rapprochent de cette valeur de marché. Inversement, la plupart des ETR lourds (Y, Er, Eu, Tb, Ho) ont des marchés inférieurs à 100 millions \$/an. Le samarium est l'ETR avec le marché le moins important et représente à peine 10 millions \$/an.

### 1.2.5.2 Évolution des prix des ETR entre 2015 et 2024

Entre 2015 et 2024, le marché des ETR apparaît assez stable pour la majorité des ETR (source USGS). Le prix de chacun des ETR dépend de leur rareté en concentration et de leur usage expliquant les variations d'évolution des prix pour le lanthane, le cérium, le néodyme, l'euprôm, le dysprosium et le terbium. Parmi ces ETR, l'euprôm est l'ETR dont la valeur a chuté de manière plus significative pour passer de 344 à 27 \$/kg. Pour les autres, les fluctuations des prix sont plus modérées. Le lanthane et le cérium ont vu leur prix diminuer pour passer de 3 à 1 \$/kg. Inversement, les prix du néodyme, dysprosium et terbium ont plutôt une tendance en faible croissance, avec un pic en 2021/2022, où ceux-ci ont été multipliés par 2-3 par rapport à 2015. Le mischmétal, qui correspond au mélange d'ETR non séparés à un prix stable légèrement inférieur à 10 \$/kg.

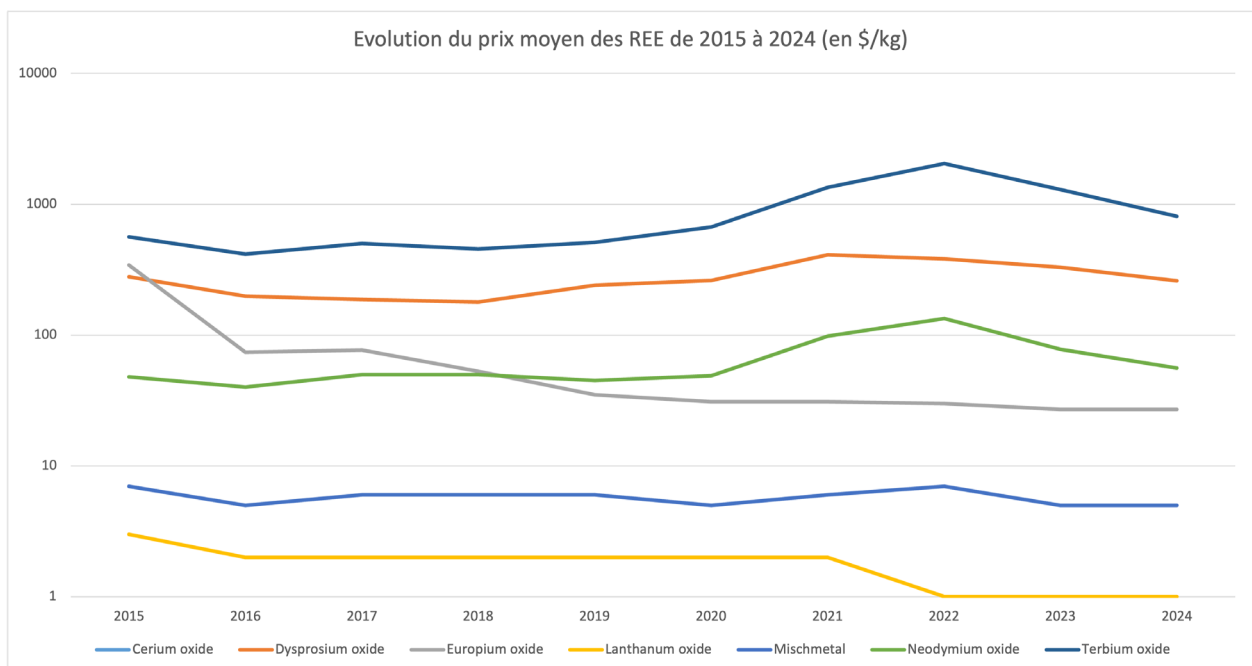


Figure 1.12 Évolution du prix des ETR de 2015 à 2024 (en \$/kg) selon les données de l'USGS.

## 1.3 La mise en politique des ETR

Face à l'importance économique des ETR pour un grand nombre d'usages stratégiques, aux risques d'approvisionnement et à l'ampleur des impacts environnementaux et sociaux associés à leur extraction, la question de leur gouvernance devient centrale. Ces enjeux ne relèvent pas uniquement de considérations techniques ou écologiques, mais s'inscrivent également dans un ensemble de rapports de pouvoir, de stratégies économiques et de choix politiques. Dès lors, les ETR ne sont plus seulement des ressources industrielles : ils deviennent des objets géopolitiques et géoéconomiques, au cœur de dispositifs d'intervention portés par une pluralité d'acteurs publics et privés.

Il convient ici de s'intéresser à la façon dont les ETR sont utilisés comme objet d'intervention par les institutions publiques et privées de différents pays ou institutions internationales pour organiser leur mise en circulation globale, ou au contraire, restreindre leur circulation selon les intérêts stratégiques et économiques des différentes parties prenantes. Le marché mondial des ETR s'est principalement structuré, historiquement, autour des interventions étatiques très importantes de la Chine et des États-Unis. La littérature intéressée à la géopolitique et à la marchandisation des ETR permet de comprendre avec une meilleure acuité la célèbre « crise des terres rares de 2010 » et les réponses étatiques qui se sont succédé au niveau national et international.

La « crise de terres rares de 2010 » correspond à un épisode de tension géopolitique largement analysé dans la littérature. Cette année-là, la Chine a menacé de restreindre ses exportations en ETR vers le Japon pour obtenir la libération d'un capitaine de chalutier chinois. Une panique sur les marchés mondiaux s'en est suivie. Entre septembre 2010 et août 2011, les prix des ETR sont multipliés par 10 environ : le prix de l'oxyde de dysprosium a connu une augmentation de 1100% et celui du néodyme plus de 1 000% (Boudia, 2019). Cette crise a pu être interprétée comme la révélation d'une stratégie chinoise de démonstration de son hégémonie en matière de production d'ETR, hégémonie préparée de longue date pour s'accaparer un pouvoir de marché (Gholz & Hughes, 2021). Néanmoins, la littérature nuance fortement cette lecture en observant que la structuration du marché mondial des ETR est liée à une pluralité d'interventions étatiques et privées entremêlées sur un temps long. La littérature rappelle que la Chine n'a pas exécuté l'ensemble des mesures annoncées et que l'explosion des prix est davantage liée à des épisodes de paniques boursières spéculatives (Boudia, 2019). Par ailleurs, les États producteurs d'ETR ont tous cherché, à un moment ou à un autre, à agir sur la restructuration des marchés mondiaux en renforçant les chaînes de valeur dont ils ont la maîtrise totale ou partielle (Hatakeyama, 2015).

### 1.3.1 La structuration du marché mondial des ETR des années 1950 aux années 1980

La Chine n'a pas toujours dominé la production mondiale d'ETR. Des années 1950 aux années 1980, une pluralité de producteurs coexistait.

Lors de la période évoquée, le principal producteur d'ETR à l'échelle mondiale n'était pas la Chine mais les États-Unis. L'exploitation minière et la production étaient concentrées à Mountain Pass, dans le désert de Mojave en Californie (Medeiros & Trebat, 2017). Durant cette période, cette mine approvisionnait non seulement les réserves stratégiques du gouvernement, mais constituait également le principal fournisseur mondial d'ETR à l'exportation jusqu'aux années 1980. En 1982, la mine de Mountain Pass assurait 70% de la production mondiale annuelle d'oxydes d'ETR (Goldman, 2014). Les États-Unis possédaient, en plus de la mine de Mountain Pass, l'ensemble de la chaîne de valeur des ETR, de la séparation, du raffinage à la production de biens manufacturés à partir des ETR. Les États-Unis produisaient divers produits à plus forte valeur ajoutée contenant des ETR, comme les aimants néodyme-fer-bore liés, développés et

brevetés en 1983 par General Motors et fabriqués pendant deux décennies par une entreprise filiale dénommée Magnequench.

Par ailleurs, si la Chine a été historiquement un des premiers pays au monde à structurer une économie nationale autour des ETR à partir des années 1950, ce n'était pas initialement pour chercher une domination du marché mondial des ETR mais plutôt pour des raisons de politique nationale et de sécurité intérieure (Kraus, 2010). La concentration des recherches géologiques et d'exploitation des ETR chinoises se situent dans la région de Bayan Obo, près de la ville de Baotou, au nord de la Chine, à la frontière de la Mongolie. Cette géographie de la chaîne de valeur chinoise n'est pas due au hasard ni à de seules conditions géologiques favorables. La littérature en géopolitique pointe notamment le fait que dès 1949 la République populaire de Chine a développé son économie d'ETR dans cette zone afin d'intégrer davantage ce territoire proche de la Mongolie à son projet national, d'une part en créant des opportunités économiques pour ces habitants dans un territoire défavorisé, mais aussi pour localiser les pollutions liées à l'exploitation des ETR à la périphérie de son propre territoire national en s'assurant de l'assentiment des populations locales par une militarisation du territoire (Klinger, 2018b).

De surcroît, l'accélération de l'exploitation des ETR dans la région de Bayan Obo a eu lieu lors de la guerre froide dans le cadre d'un programme de prévention militaire porté à la fois par la République populaire de Chine et l'URSS. L'enjeu était pour la Chine de se doter de l'arme nucléaire afin de se prémunir contre des menaces potentielles venant de l'ouest du monde. Le lancement de ce programme a eu pour effet d'accélérer les recherches technologiques et la prospection minière sur le territoire. Dès les années 60, la Chine a investi massivement dans la recherche sur les ETR par la création de centres de recherche, notamment l'institut de recherche de Baotou sur les ETR et l'Institut général de recherche sur les métaux non ferreux. Ces deux institutions ont soutenu la recherche et le développement dans l'ensemble de l'industrie des métaux, en amont et en aval de leur production à travers la Chine (Barteková & Kemp, 2016).

### **1.3.2 La structuration du marché des ETR des années 1980 aux années 2010**

À partir des années 1980, des transformations politiques dans les deux contextes ont engendré une dynamique qui a refaçonné la division mondiale de production et d'exportation des ETR. Ces transformations politiques sont à la fois liées à la libéralisation des économies anglo-américaines sous l'ère de Ronald Reagan et de Margaret Thatcher, ainsi qu'aux nouvelles politiques économiques impulsées par le gouvernement chinois au tournant des années 2000 pour restructurer sa chaîne de valeur (Dobransky, 2015). Dans ce contexte, l'enrichissement et le traitement à valeur ajoutée des ETR ont commencé à se transférer des États-Unis vers la Chine, culminant avec la concentration de la production mondiale d'ETR à Baotou et Bayan Obo à l'orée du millénaire (Butler, 2014).

#### **1.3.2.1 Aux États-Unis : une politique de délocalisation de la production**

Du côté des États-Unis, deux facteurs ont présidé à la délocalisation de la chaîne de valeur des ETR. À la sortie de la période de la guerre froide, un consensus gouvernemental autour de l'idée qu'un marché international était susceptible de fournir les métaux et ETR dont les États-Unis pouvaient avoir besoin sans avoir besoin de soutenir une filière avec des politiques publiques dédiées a progressivement émergé. Cette analyse était notamment renforcée par la chute importante du prix des matières premières à la fin de la guerre froide, suite notamment à la vente des stocks de guerre américains et soviétiques qui ont provoqué un effondrement de leur prix (Humphreys, 1995). Par ailleurs, la sous-traitance de certaines

étapes du processus d'enrichissement des ETR vers la Chine a été mue par une volonté politique issue d'acteurs privés et publics de délocaliser les conséquences environnementales du raffinage des ETR loin des lieux de consommation (Dobransky, 2015).

En effet, à partir des années 1980, la mine de Mountain Pass a été à l'origine de nombreuses pollutions documentées et sanctionnées par l'agence américaine de l'environnement (l'Environmental Protection Agency). Mountain Pass a notamment connu de nombreuses fuites de ses eaux usées dans l'environnement. Une enquête de l'EPA a révélé soixante déversements entre 1984 et 1998, dont plusieurs non signalés. Entre 1994 et 1997, sept déversements auraient libéré 350 000 gallons le long d'un tronçon de tuyauterie près du parc national de Mojave (Klinger, 2018b). Les autorités fédérales ont estimé qu'environ 600 000 gallons d'eaux usées radioactives s'étaient déversés dans le désert. En 1998, la mine a interrompu ses opérations de traitement sur ordre du procureur du district de San Bernardino, qui a émis une injonction de nettoyage.

Au début des années 1980, Edward Nixon, géoscientifique travaillant dans le conseil et frère du Président des États-Unis Richard Nixon, a suggéré aux dirigeants de Mountain Pass de sous-traiter certaines opérations d'enrichissement à la Chine pour réduire les responsabilités environnementales en Californie et réaliser des économies (Klinger, 2020). Confrontée à des amendes répétées pour infractions environnementales et à la pression sur les prix exercée par les produits chinois bon marché, la mine de Mountain Pass a fermé en 2000 (Goldman, 2014). Cela a consolidé 97 % de la production d'ETR en Chine.

Concomitamment à la délocalisation d'une partie (Barteková & Kemp, 2016; Elwert et al., 2013) de l'activité de Mountain Pass puis à sa fermeture, les entreprises américaines clés en matière de fabrication d'aimants permanents à base d'ETR ont également délocalisé leurs activités en Chine. Il en est ainsi de l'entreprise de Magnequench dont les dirigeants délocaliseront l'entreprise en 1998 suite à un rachat par ses deux principaux clients de l'époque qui étaient San Huan New Materials et la China National Non-Ferrous Metals Import and Export Corporation, deux acteurs majeurs du commerce chinois des ETR. Au moment de cette décision, des représentants des deux partis au Congrès ont exigé que le Comité du contrôle des investissements étrangers aux États-Unis (*Committee on Foreign Investment in the United States*) examine ce qu'ils estimaient être une prise de contrôle chinoise de la production d'aimants permanents. Ils ont demandé au président George W. Bush d'intervenir, invoquant l'amendement Exxon-Florio de la loi de 1988 sur les crédits à la défense, qui impose un examen présidentiel des investissements étrangers menaçant la sécurité nationale. Le Comité de contrôle américain ne s'est finalement pas opposé à cette délocalisation (Barteková & Kemp, 2016).

#### **1.3.2.2 En Chine : le choix d'une conservation stratégique des ETR à partir des années 2000**

À la délocalisation des grandes entreprises américaines au tournant des années 1980, a succédé la transformation de la politique économique chinoise à l'égard des ETR. Des années 2000 aux années 2010, la Chine est passée de la production maximale d'ETR à des fins notamment de développement économique, à une progressive conservation stratégique de ces ressources, doublée d'une exportation de biens manufacturés à plus forte valeur ajoutée.

Pour expliquer ce renversement, la littérature avance deux facteurs principaux qui sont : d'une part gérer les conséquences économiques liées aux surcapacités industrielles, d'autre part restreindre la production d'ETR pour faire face aux conséquences environnementales et épidémiologiques de leur extraction dans la région de Bayan Obo (Klinger, 2020).

En 2003, le gouvernement central a publié une version actualisée de sa politique sur les ressources minérales. Contrairement à des lois précédentes datant de 1986 et de 1993, ce nouveau texte

gouvernemental insistait sur la nécessité de promouvoir une exploration minière et une exploitation plus technologique ainsi que d'améliorer la surveillance environnementale dans la région de Bayan Obo. En janvier 2004, le taux de remboursement de la taxe à l'exportation, établi par le ministère du Commerce en 1985, est passé de 13 % à 0 %, et celui applicable aux composés d'yttrium et de scandium a été abaissé de 17 % à 5 %. À partir du 1er mai 2005, ces remboursements ont été entièrement supprimés.

L'annulation de ces remboursements s'inscrivait dans un changement plus large de stratégie de développement économique autour des matières premières. L'objectif était de décourager les exportations, d'augmenter les importations de matières premières, tout en développant les capacités nationales de traitement et de fabrication de composants.

Dans cette optique, le 1er novembre 2006, le ministère du Commerce a annoncé qu'une taxe à l'exportation de 10 % sur les ETR entrerait en vigueur le 1er juin 2007 (Klinger, 2018a). Le ministère a ensuite relevé les droits de douane à 15–25 % pour tous les produits d'ETR, sauf pour le praséodyme, le gadolinium, l'holmium, l'erbium, le thulium, l'ytterbium et le lutécium.

De plus, la nouvelle politique du gouvernement chinois au tournant des années 2000 vise à acquérir des ressources stratégiques à l'étranger, dont des ETR pour limiter les conséquences de leur production sur le territoire national. Cette politique a été réalisée par le biais d'investissements dans le secteur minier de différents pays ainsi que par des transferts technologiques via les investissements directs étrangers (Humphreys, 1995).

En ce qui concerne les investissements, les entreprises chinoises ont réussi à acquérir une participation dans le producteur australien d'ETR Arafura, et ont également tenté de prendre le contrôle de Lynas, le plus grand producteur d'ETR australien, mais ce projet a échoué en raison d'un veto du gouvernement australien (Barteková & Kemp, 2016). En outre, la Chine a offert des subventions et des prêts à certains pays en échange de l'accès à leurs matières premières (pas uniquement pour les ETR), notamment en Afrique (Hanauer & Morris, 2014).

En 2006, le gouvernement central chinois a lancé une campagne de fermeture et de consolidation visant à réduire le nombre d'entreprises privées dans le secteur des ETR à vingt entreprises d'État ou militaires d'ici 2015 (Klinger, 2018b).

À cette période, le gouvernement chinois a également massivement amplifié ses efforts en matière de financement de la recherche pour renforcer la position de la Chine comme leader mondial scientifique et industriel sur l'ensemble de la chaîne de valeur des ETR. La Chine repose ainsi sa politique scientifique sur le programme national de recherche et de développement en haute technologie (Programme 863), le programme national de recherche fondamentale (Programme 973) et le programme national de développement scientifique et technologique à moyen et long terme, ayant tous pour objectif commun de renforcer les capacités d'innovation de la Chine dans les secteurs de haute technologie (Barteková & Kemp, 2016).

### 1.3.3 Les réponses des États et entreprises non chinoises à la crise des ETR

#### 1.3.3.1 Une plainte à l'Organisation mondiale du commerce (OMC) suite à la crise de 2010

En 2011, le Gouvernement chinois a procédé à la publication d'un plan d'action de haut niveau pour une réglementation globale de l'industrie mettant l'accent sur le développement durable, et annoncé l'imposition de quotas d'exportation et de réglementations plus strictes pour le secteur des ETR. Le gouvernement chinois avait, dans le même temps, adopté un livre blanc constatant les effets néfastes de la production d'ETR sur l'environnement et la santé publique, notamment par la production de déchets toxiques, que ce soit dans le contexte des sites miniers de Bayan Obo, de Sichuan, ou encore - et surtout - des petites mines opérant illégalement et se développant en dehors de tout contrôle du gouvernement (Gavin, 2015; Goldman, 2014). Le pays a ainsi affiché l'objectif de restructurer et de protéger son industrie en imposant notamment aux États importateurs des restrictions à leur exportation. Ces mesures, officiellement justifiées par la nécessité de conserver les ressources naturelles et d'assurer un développement durable du secteur minier, permettraient dans le même temps à la Chine de renforcer sa position industrielle et géopolitique, en réservant notamment ces ressources stratégiques aux les industries chinoises à haute valeur ajoutée.

Ces restrictions non ciblées imposées aux exportations ont été interprétées comme une véritable déclaration de guerre. Le 13 mars 2012, l'Union européenne, suivie par les États-Unis et le Japon le 22 mars et le Canada le 26 mars, a demandé l'ouverture de consultations avec la Chine puis l'établissement d'un groupe spécial le 27 juin - ce qui équivaut à une plainte - devant l'Organe de règlement des différends (ORD) de l'Organisation mondiale du commerce (OMC), du fait des restrictions imposées. Selon les plaignants, les restrictions mises en place par la Chine ont provoqué des distorsions massives et des interruptions dans la chaîne d'approvisionnement des ETR sur le marché mondial<sup>5</sup>. Elles violaient ainsi le droit du commerce international qui prévoit un principe d'interdiction des restrictions quantitatives au commerce, qu'elles soient directes ou indirectes, des droits d'exportation sous forme de taxes et faisaient valoir que les restrictions étaient destinées à accorder aux branches de production chinoises un accès protégé aux matières visées.

Le Groupe spécial a rendu son rapport le 26 mars 2014 et a considéré que les exceptions générales invoquées par la Chine (protection de l'environnement et de la santé publique) ne pouvaient pas être utilisées pour justifier une violation de l'obligation de supprimer les droits d'exportations sur les produits listés lors de son accession à l'Accord général sur les tarifs douaniers et le commerce (GATT, 1947). Il a conclu que les contingents d'exportation imposés visaient à réaliser des objectifs en matière de politique industrielle autres que la conservation des ressources naturelles - la « conservation » n'autorisant pas les Membres à adopter des mesures visant à contrôler le marché international d'une ressource naturelle (Verrax, 2014; Wang, 2018). La Chine a directement fait appel de cette décision. L'Organe d'appel de l'ORD a rendu son rapport le 7 août 2014, rejetant ses demandes. La Chine, à la suite de cette affaire, a largement modifié son cadre législatif : en plus de l'arrêt des restrictions à l'exportation, la mise en conformité au droit de l'OMC a impliqué de réglementer de manière plus poussée les impacts environnementaux de ses activités, tout en reprenant la main sur son industrie afin de lutter contre les mines illégales (Gavin, 2015; Wang, 2018).

Le 4 avril 2025, en réponse à la mise en place de droits de douane par les États-Unis sur une série de produits chinois, la Chine a décidé de restreindre à nouveau les exportations d'ETR. Le retour de cette

---

<sup>5</sup> OMC, affaires DS431, DS432, DS433: Chine — Mesures relatives à l'exportation d'ETR, de tungstène et de molybdène.

« guerre commerciale des terres rares » dans l'actualité traduit bien l'ampleur des conséquences résultant de changements de politiques sur l'ensemble de la chaîne de valeur et d'approvisionnement, dans un contexte de quasi-monopole chinois. En outre, ce retour traduit la nécessité pour les États d'anticiper ces problématiques, notamment en mettant en place une politique des métaux critiques. Plusieurs États, dans ce contexte, tentent en effet de développer une stratégie visant à garantir progressivement une chaîne d'approvisionnement complète en ETR et limiter ainsi leur dépendance à la Chine (États-Unis, Australie, Brésil, Afrique du Sud, Arabie Saoudite, Japon ou encore Vietnam). C'est également ce qu'a fait l'Union européenne avec l'adoption du Critical Raw Materials Act (CRMA) en 2024 (Règlement (UE) 2024/1252 du Parlement européen et du Conseil du 11 avril 2024 établissant un cadre visant à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques dit « Règlement Matériaux Critiques », analysé dans la partie 2.2 de ce rapport).

### 1.3.3.2 Le renouveau de l'interventionnisme étatique états-unien

Les États-Unis sont un pays clé dans l'organisation de la production des ETR (lorsqu'il organise une délocalisation ou une relocalisation de la production). Promoteur du libéralisme économique, ce dernier est paradoxalement très interventionniste depuis 2010 pour tenter de relocaliser une chaîne de valeur sur son territoire national. Cela passe à la fois par des politiques de recherche et développement, de subventions, mais également des mesures de défense liées au stockage d'ETR (visant, donc, à s'affranchir de logiques marchandes au nom d'intérêts stratégiques).

Plus de trente projets de loi concernant les éléments d'ETR ont été examinés au Congrès américain entre 2010 et 2014 (Klinger, 2018b). Bien que le cadrage législatif varie selon les propositions, elles appelaient toutes à une intervention étatique sur le marché mondial des ETR afin de rapatrier la production aux États-Unis. Les propositions allaient de l'élimination des réglementations minières aux États-Unis pour inciter le retour d'investisseurs, à la création de fonds fédéraux pour soutenir la relance d'une industrie considérée comme stratégiquement vitale. Les débats ont été âpres au Congrès quant aux conséquences environnementales et financières des différentes propositions.

Suite à ces débats, le gouvernement fédéral a élaboré la « Critical Materials Strategy »<sup>6</sup>. Cette stratégie repose sur trois piliers principaux :

- 1) La diversification des chaînes d'approvisionnement mondiales en TR pour réduire les risques.
- 2) Le développement de matériaux et de technologies de substitution (notamment l'amélioration des performances des technologies sans ETR pour les batteries, ainsi que des conceptions alternatives pour les moteurs électriques et les générateurs d'éolienne).
- 3) La promotion du recyclage, de la réutilisation et de l'utilisation plus efficace des matériaux critiques.

Les politiques de recherche et développement ont été renforcées, comme en témoigne la création de nouveaux laboratoires dédiés à la recherche sur les matériaux critiques, la mise en place de programmes universitaires sur la prochaine génération d'aimants permanents (notamment à l'Université du Delaware), et le financement de l'innovation technologique en phase initiale (programme REACT de l'ARPA). Le département américain de la Défense a également autorisé la Defense Logistics Agency à constituer des stocks d'ETR lourds (Barteková & Kemp, 2016). Un sous-comité sur les chaînes d'approvisionnement en minéraux critiques et stratégiques, établi par l'Office of Science and Technology Policy de la Maison-Blanche a également été créé pour coordonner les efforts entre agences fédérales.

---

<sup>6</sup> [https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE\\_CMS2011\\_FINAL\\_Full.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf)

Par ailleurs, la hausse du cours des ETR à la suite de la crise de 2010 a incité certains acteurs privés à relancer la production de celles-ci sur le territoire américain (Machacek & Fold, 2018). C'est ainsi que la mine de Mountain Pass a été réouverte en 2012. Celle-ci a néanmoins fait faillite en 2015 en raison de la concurrence chinoise et de la retombée des cours mondiaux.

En juin 2017, un consortium américain dénommé MP Materials — et composé de MP Mine Operations LLC, constitué majoritairement de JHL Capital (65 %), accompagné de QVT Financial (25 %) et de l'entreprise chinoise Shenghe Resources (10 %, sans droit de vote) — rachète la mine aux enchères. En 2020, le Département de la Défense des États-Unis a apporté un soutien stratégique à MP Materials dans le cadre de la relance de la mine de Mountain Pass, afin de sécuriser l'approvisionnement national en ETR. En avril, un premier financement a été accordé pour planifier la construction d'une installation de séparation d'ETR lourds. Puis, en novembre, un contrat de 9,6 millions de dollars a été octroyé pour permettre la reprise du raffinage sur place des ETR légers, jusque-là exportées vers la Chine. Ce soutien a été renforcé en février 2022 par une subvention supplémentaire de 35 millions de dollars pour la construction d'une unité industrielle de séparation des ETR lourds. Ces investissements s'inscrivent dans une stratégie plus large visant à restaurer une chaîne de valeur complète sur le sol américain, à réduire la dépendance à la Chine, et à soutenir les besoins critiques en aimants permanents pour la défense, les énergies renouvelables et les technologies de pointe.

### **1.3.3.3 Les interventionnismes européens s'arrimant à des politiques de criticité**

Dans les autres pays du monde, et particulièrement en Europe, les réponses à la crise des ETR de 2010 se sont arrimées pour la plupart à ce qu'il convient des « politiques de criticité ». Les politiques de criticité ne concernent pas exclusivement les ETR, et ont pour pierre angulaire de reposer sur des études de criticité.

Ces études s'appuient sur des connaissances géologiques et économiques pour anticiper les besoins en métaux ou ressources minérales pour une économie donnée afin d'en sécuriser les approvisionnements via des actions publiques ou privées. Les études de criticité ont une histoire plus longue que la crise des ETR et ne concernent pas uniquement les ETR. Elles ont fait l'objet de théorisations et de recherches tout au long du XX<sup>ème</sup> siècle, dans l'ensemble des pays développés, et particulièrement aux États-Unis en périodes de guerres pour trouver des façons d'anticiper et de sécuriser les approvisionnements en métaux critiques (De Young et al., 2017)

La crise des ETR a eu pour effet de générer un regain d'intérêt pour ces études en raison de la recrudescence des tensions géopolitiques et d'une prise de conscience internationale accrue en la fragilité du fonctionnement des règles du commerce international.

#### **1.3.3.3.1 Principes généraux de fonctionnement des études de criticité**

Ces études peuvent être faites de façon relativement différente selon les centres de recherche, les matières qu'elles considèrent ou encore les temporalités qu'elles intègrent (Schrijvers et al., 2020) mais visent à générer une matrice sur laquelle placer des ressources pour en apprécier le niveau de criticité. Généralement cette matrice comporte deux axes : un axe représentant l'importance économique des ressources pour une économie donnée et un axe représentant les risques en approvisionnement des ressources étudiées (cf. Figure 1.13).

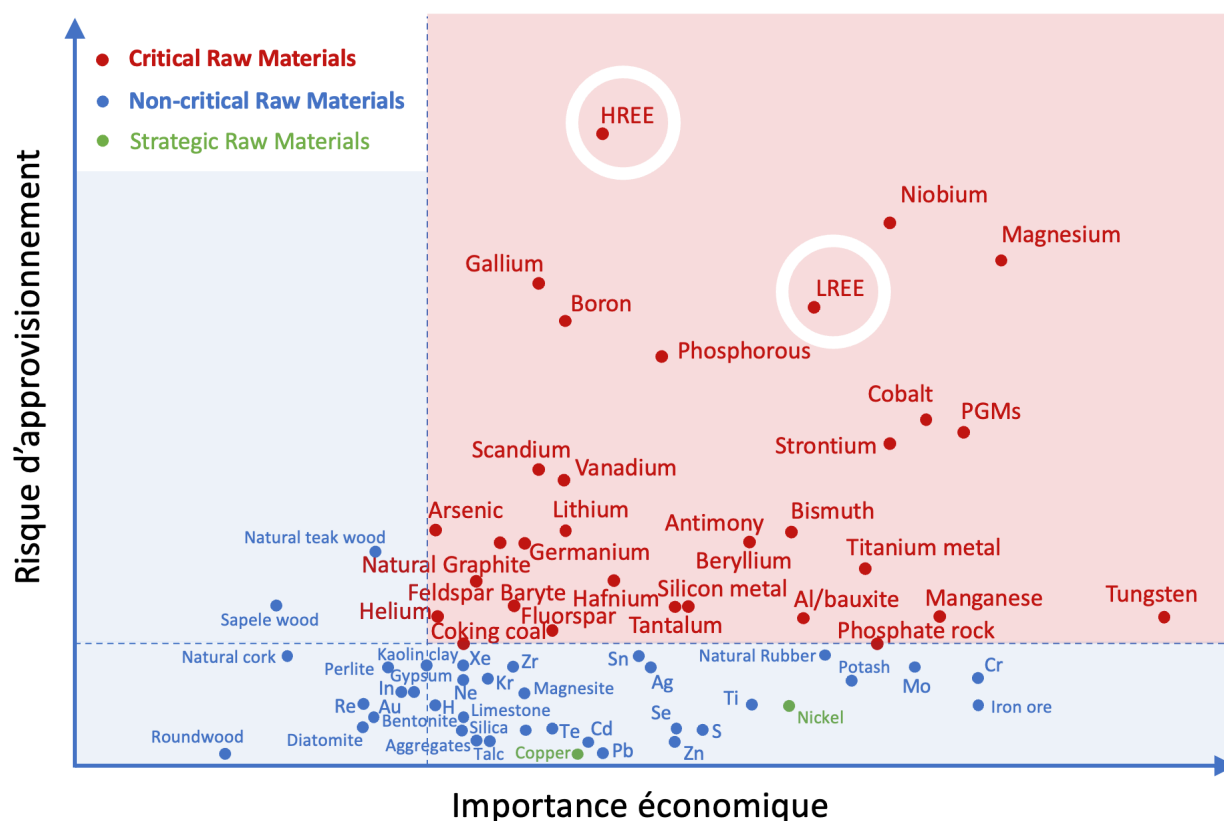


Figure 1.13 Évaluation de la criticité de différents éléments. HREE et LREE se réfèrent aux ETR lourds et légers respectivement (Heavy/Light Rare Earth Elements). Schéma adapté du CRMA européen (Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 — Final).

Ainsi, plus une ressource est considérée comme importante pour une économie donnée (en raison par exemple de besoins jugés incompressibles pour développer des technologies ou innovations considérées comme stratégiques) et plus celle-ci présente des risques d'approvisionnement (en raison par exemple de la nécessité d'en importer de grandes quantités depuis des pays connaissant des conflits armés ou encore en raison du faible nombre de gisements), plus ladite ressource est considérée comme critique pour l'économie étudiée. À l'inverse, si une ressource présente une importance économique non négligeable mais est produite localement, ou présente dans une quantité de pays suffisamment variée pour ne pas craindre de ruptures d'approvisionnement (la production de la ressource est faiblement concentrée dans un pays), moins cette ressource sera considérée comme critique. Il est à noter que la recherche économique très récente tend à montrer les limites du pouvoir prédictif de l'indicateur de concentration de marché pour anticiper les risques en approvisionnement. En effet, une analyse systématique et diachronique des prix de marché de différents métaux stratégiques montre qu'une mise en équivalence attentive entre faible concentration des marchés et faibles risques en approvisionnement sous-estime les faillites de marchés susceptibles de survenir (Bucciarelli et al., 2025). Bien qu'imparfait, cet indicateur est pour le moment un élément central du raisonnement des institutions publiques en matière de criticité. Ces études ne sont néanmoins pas menées de la même façon dans l'ensemble des pays et n'équipent en conséquence pas l'action publique de la même manière.

1.3.3.3.2 Les études de criticité et leurs politiques publiques en Europe et en France

Au sein de l’Union européenne, la Commission européenne a structuré une communauté de recherche pour l’élaboration des études de criticité depuis 2010. De telles études ont été réalisées par des géologues pour le compte de la Commission européenne en 2011, 2014, 2017, 2023 grâce au financement d’un réseau de recherche européen (Lovik et al., 2018).

La dernière étude de criticité européenne en date a été réalisée dans le cadre du Règlement européen sur les matières premières critiques adopté en 2024<sup>7</sup>. Ce règlement européen se donne pour objectif de sécuriser les approvisionnements européens en métaux critiques en diversifiant au maximum les sources d’approvisionnements européens. Le règlement donne des objectifs chiffrés. À l’horizon 2030, l’Union européenne s’engage à extraire au minimum 10% de sa consommation annuelle en métaux critiques en Europe, de traiter 40% des ressources sur le sol européen, recycler 25% sur son territoire et de ne pas dépendre à plus de 65% de sa consommation annuelle d’un pays tiers à l’Union européenne (article 5 : « niveaux de référence » du Règlement Métaux Critiques UE<sup>8</sup>). Pour identifier quels sont les métaux critiques susceptibles d’être ciblés par des politiques européennes, la Commission justifie sa politique par la mobilisation d’une matrice de criticité parue en 2023 qui compare les substances entre elles (cf. matrice de la section précédente). Cette matrice repose sur les prix de marchés actuels des substances pour en déduire leur importance économique en prenant notamment en considération les prévisions de consommation croissantes de métaux réalisées par l’OCDE à l’horizon 2060 (plus le prix d’une substance est élevé, plus cette substance est susceptible d’être demandée à l’avenir et plus elle a de chance d’être critique). La disposition sur une même matrice à deux axes de l’ensemble des substances a permis aux experts de la Commission d’identifier 34 substances critiques selon des seuils établis à dire d’experts.

La Commission européenne n’est pas la seule institution à coordonner des études de criticité en Europe. Il existe également de nombreuses initiatives qui n’informent pas l’action publique de la même manière, car elles ne prennent pas en considération les mêmes préoccupations politiques, géologiques et économiques (Machacek, 2017) (Machacek, 2017).

**Les minéraux critiques (✓) pour l’UE, la Chine et les États-Unis** (les gouvernements établissent des listes de minéraux critiques en fonction de leurs besoins industriels et de leurs évaluations stratégiques des risques d’approvisionnement) :

| Minéral        | UE | Chine | USA |
|----------------|----|-------|-----|
| ETR            | ✓  | ✓     | ✓   |
| Cobalt (Co)    | ✓  | ✓     | ✓   |
| Graphite (C)   | ✓  | ✓     | ✓   |
| Lithium (Li)   | ✓  | ✓     | ✓   |
| Tungstène (W)  | ✓  | ✓     | ✓   |
| Antimoine (Sb) | ✓  | ✓     | ✓   |
| Cuivre (Cu)    | ✓  | ✓     | ✓   |

<sup>7</sup> Règlement (UE) n° 2024/1252 du Parlement européen et du Conseil du 11/04/24 établissant un cadre visant à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques et modifiant les règlements (UE) n° 168/2013, (UE) n° 2018/858, (UE) n° 2018/1724 et (UE) n° 2019/1020.

<sup>8</sup> <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj?locale=fr>

|                              |   |   |   |
|------------------------------|---|---|---|
| Nickel (Ni)                  | ✓ | ✓ | ✓ |
| Fluorine (CaF <sub>2</sub> ) | ✓ | ✓ | ✓ |
| Aluminium (Al)               | ✓ | ✓ | ✓ |
| Magnésium (Mg)               | ✓ |   | ✓ |
| Manganèse (Mn)               | ✓ |   | ✓ |
| Platine (Pt)                 | ✓ |   | ✓ |
| Titane (Ti)                  | ✓ |   | ✓ |
| Vanadium (V)                 | ✓ |   | ✓ |
| Tantalum (Ta)                | ✓ |   | ✓ |
| Niobium (Nb)                 | ✓ |   | ✓ |
| Hafnium (Hf)                 | ✓ |   | ✓ |
| Germanium (Ge)               | ✓ |   | ✓ |
| Béryllium (Be)               | ✓ |   | ✓ |
| Barite (BaSO <sub>4</sub> )  | ✓ |   | ✓ |
| Arsenic (As)                 | ✓ |   | ✓ |
| Bismuth (Bi)                 | ✓ |   | ✓ |
| Niobium                      | ✓ |   | ✓ |
| Phosphore (P)                | ✓ | ✓ |   |
| Strontium (Sr)               | ✓ |   |   |
| Bore (B)                     | ✓ |   |   |
| Gallium (Ga)                 | ✓ |   |   |
| Helium (He)                  | ✓ |   |   |
| Scandium (Sc)                | ✓ |   |   |
| Silicium (Si)                | ✓ |   |   |
| Feldspath                    | ✓ |   |   |
| Phosphorite                  | ✓ |   |   |
| Charbon à coke               | ✓ |   |   |
| Or (Au)                      |   | ✓ |   |
| Fer (Fe)                     |   | ✓ |   |
| Molybdène (Mo)               |   | ✓ |   |
| Potasse (K)                  |   | ✓ |   |
| Uranium (U)                  |   | ✓ |   |

|                |  |   |   |
|----------------|--|---|---|
| Étain (Sn)     |  | ✓ | ✓ |
| Zirconium (Zr) |  | ✓ | ✓ |
| Césium (Cs)    |  |   | ✓ |
| Chrome (Cr)    |  |   | ✓ |
| Indium (In)    |  |   | ✓ |
| Rubidium (Rb)  |  |   | ✓ |
| Tellure (Te)   |  |   | ✓ |
| Zinc (Zn)      |  |   | ✓ |
| Samarium (Sm)  |  |   | ✓ |

**Tableau 1-2 La Chine domine le traitement des minéraux, contrôlant 100 % de l'approvisionnement mondial en graphite naturel, plus de 90 % de celui du manganèse, 70 % du cobalt, près de 60 % du lithium et 40 % du raffinage du cuivre. Source : IRENA, U.S. Department of Energy.**

Le tableau ci-dessus montre que des substances peuvent être considérées comme critiques ou non critiques de façon différente selon les approches par pays.

En France, des études de criticité ont également été réalisées régulièrement par le Bureau de recherche géologique et minière (BRGM) depuis la crise de 2010. Dorénavant, ces études sont menées par l'Observatoire français des ressources minérales pour les filières industrielles (OFREMI), créé en 2022, et rattaché au BRGM. Une variété d'acteurs issus de différentes institutions françaises (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, Institut français du pétrole et des énergies nouvelles, BRGM) mettent leurs expertises en commun pour élaborer de nouvelles matrices de criticité. Comme la majorité des études de criticité nationales et internationales, les matrices de l'OFREMI cherchent à apprécier la criticité des ressources minérales ou de métaux selon l'importance économique des ressources pour l'économie nationale française et les risques en matière d'approvisionnement. Les matrices réalisées diffèrent conceptuellement sur différents points avec celles coordonnées par la Commission européenne (Laurent et al., 2025). Par exemple, l'OFREMI ne mesure pas la criticité des ressources en les comparant les unes avec les autres à partir de seuils critiques ou non critiques. Les experts des études apprécient le caractère critique des ressources à partir de notes 1 à 5 pour chaque ressource (lithium, cuivre, etc.) selon leur connaissance qualitative et quantitative de l'évolution des marchés de chaque ressource. La matrice de l'OFREMI intègre également un troisième axe d'analyse intitulé « capacité à faire face à un défaut d'approvisionnement ». Pour chaque ressource, les experts évaluent si l'organisme qui commande une étude est en situation de faire face économiquement à une rupture en approvisionnement d'une ressource à un horizon temporel de cinq ans. La différence de temporalité analysée par la Commission européenne (prévision de l'OCDE à l'horizon 2060) et l'OFREMI (crise en approvisionnement à l'horizon de 5 ans) ou encore la manière d'analyser les ressources (comparaison des prix de marché puis comparaison des ressources les unes vis-à-vis des autres versus analyse quantitative et qualitative des dynamiques de marché de chaque ressource prise isolément), ne conduisent pas aux mêmes manières de définir si une substance est critique ou non-critique, ni au même débat d'action publique. Pour la Commission européenne, il s'agit de « dérisquer » les investissements privés pour le développement de nouvelles mines ou encore de favoriser la structuration d'une industrie du recyclage. Pour leur part, les études de l'OFREMI produites pour une ressource donnée, à destination d'un usager spécifique (acteur public ou privé) ouvrent des réflexions prospectives de gestion de crise, comme l'opportunité de constituer ou non des stocks de ressources critiques (Laurent et al., 2025).

Cette comparaison tirée de la littérature ne vise pas à évaluer la qualité des études de criticité ou de les critiquer, mais plutôt de pointer les différentes manières de les faire à partir d'une pensée initiale commune (en termes d'importance économique et de risque d'approvisionnement). Celles-ci diffèrent

car elles n'intègrent pas les mêmes horizons temporels, variables, préoccupations liées aux marchés et à leurs défaillances potentielles. Ce commentaire illustre les différentes façons dont les ETR peuvent être mis en politique avec des préoccupations d'actions publiques différentes. L'analyse montre également que les ETR sont pris dans des études et politiques plus vastes, liées à la criticité d'ensemble de ressources, et ne sont pas nécessairement ciblées spécifiquement par l'action publique européenne ou française.

#### 1.3.3.3.3 Les critiques des études de criticité soulevées dans l'espace public

Les études de criticité font fréquemment l'objet de critiques dans l'espace public dont certaines sont intéressantes à rappeler ici en ce qu'elles justifient l'approche scientifique complémentaire défendue dans ce rapport, à savoir une analyse portée sur les ETR sous l'angle de la sobriété.

À titre d'illustration, il s'agit ici de mentionner deux registres de critiques portées à l'égard des études de criticité. Tout d'abord, des organisations internationales, des parlementaires de différents partis politiques européens ont ainsi critiqué l'étude de la Commission européenne de 2023 en commentant d'abord son cadrage général<sup>9</sup>. Cette étude équilibre en effet le Règlement européen sur les matières premières critiques, texte juridique adopté en 2024 qui vise à réaliser une « twin transition » au sein de l'Union européenne, à savoir la réalisation d'une transition énergétique et d'une transition numérique. Le Règlement cherche à assurer les approvisionnements en matières premières de l'Union européenne afin de permettre à l'Europe de s'émanciper des énergies fossiles, tout en numérisant le plus grand nombre de services possible au nom d'un idéal d'accessibilité plus grande des services publics, de développement d'une nouvelle économie de la connaissance et d'une croissance économique considérée comme plus soutenable par les tenants de cette politique. Or les critiques du CRMA considèrent pour leur part que les « twin transition » peuvent être potentiellement contradictoires l'une vis-à-vis de l'autre. Pour les détracteurs de l'étude européenne, il est possible que la numérisation accélérée des sociétés européennes pose des tensions supplémentaires sur l'approvisionnement en métaux critiques, ce qui risquerait d'entraver la réalisation d'une transition énergétique. Ces acteurs regrettent la considération de scénarios de sobriété dans la politique européenne. Il ne s'agit en l'espèce pas de valider ou d'invalidier scientifiquement la critique mais plutôt de souligner l'originalité de l'approche du présent rapport à l'égard de ces débats. Le questionnement développé en termes de sobriété peut en effet contribuer au débat public, non pas en prescrivant l'action publique à mener au sujet des ETR, mais davantage à mettre en exergue les questionnements auxquels la littérature scientifique peut répondre ou non lorsqu'il est question de sobriété dans l'usage des ETR.

Une autre critique récurrente des études de criticité est la difficulté de ces dernières à prendre en considération les conséquences environnementales de l'extraction des ressources. En effet, à de rares exceptions près (Graedel et al., 2015), la majorité des études considèrent de façon prioritaire l'importance économique et les risques en approvisionnement, ce qui a pour effet d'invisibiliser les conditions dans lesquelles elles sont extraites. Or l'extraction de ressources ayant des effets sociaux et environnementaux souvent non négligeables, la prise en compte des conséquences environnementales de l'extraction pourrait rendre davantage critiques certaines ressources en raison des coûts parfois difficilement acceptables pour les communautés concernées (Glöser et al., 2015). Le présent rapport peut en l'occurrence contribuer à informer le débat public sur les conséquences environnementales de l'extraction des ETR en mettant en avant les principales conclusions de la littérature scientifique sur le sujet et en donnant des pistes de réflexion sur ce que peut signifier un usage responsable des TR.

---

<sup>9</sup> <https://friendsoftheearth.eu/wp-content/uploads/2023/07/Mining-the-depths-of-influence.pdf>



## 1.4 Les 3 axes de l'ESCo

Le rapport aborde la question des ETR à partir de leurs *usages*. Cette démarche est originale parce qu'elle échappe à la focalisation sur la production primaire : elle permet de montrer que la sobriété des usages contribue à la sécurisation des approvisionnements. Questionner les usages en analysant les leviers de sobriété permet d'identifier où et comment il est possible d'optimiser l'utilité des ETR tout en minimisant leur consommation. Le rapport permet ainsi d'envisager une consommation future qui ne prend pas simplement la forme d'une augmentation exponentielle, irréfléchie, de la demande : il invite à problématiser et à territorialiser le recours systématique aux ETR pour tous les usages, et à introduire une dimension de responsabilité économique et environnementale dans leur extraction, leur transformation, leur utilisation et leur recyclage. Par sa focalisation sur les usages et leur variation, le rapport se prête bien à des exercices de prospective.

La sobriété dans l'usage des ETR est déclinée selon trois axes dans la suite du rapport (cf. Figure 1.14).

Le premier axe, intitulé « Réduire », analyse les leviers de réduction de la consommation permis par un recours aux stratégies d'économie circulaire, et en particulier, d'éco-conception. Il s'agit ici de présenter les possibilités techniques de substitution ou de diminution des quantités nécessaires, par usage ; mais aussi d'évoquer les démarches économiques, juridiques ou politiques qui permettent de réduire la consommation sans diminuer significativement l'utilité produite par l'usage des ETR.

Le second axe, intitulé « Recycler », revient sur le faible niveau de recyclage des ETR, qu'il analyse à la fois d'un point de vue technique et d'un point de vue économique, social et juridique. De ce fait, il identifie les points aveugles qui expliquent le faible niveau de recyclage des ETR et les initiatives qui permettraient de le développer.

Enfin, le troisième axe s'intitule « Produire autrement » : il analyse les conditions pour une relance de l'extraction qui fasse un meilleur usage des ressources secondaires d'ETR (déchets miniers, cendres de charbon) tout en minimisant les impacts sociaux, territoriaux et environnementaux de l'extraction.

On trouvera en fin de volume la bibliographie sur laquelle s'est fondé ce travail d'expertise, et à la fin de chaque chapitre, la liste exhaustive des références citées.

## RÉDUIRE, RECYCLER, EXTRAIRE AUTREMENT LES ETR

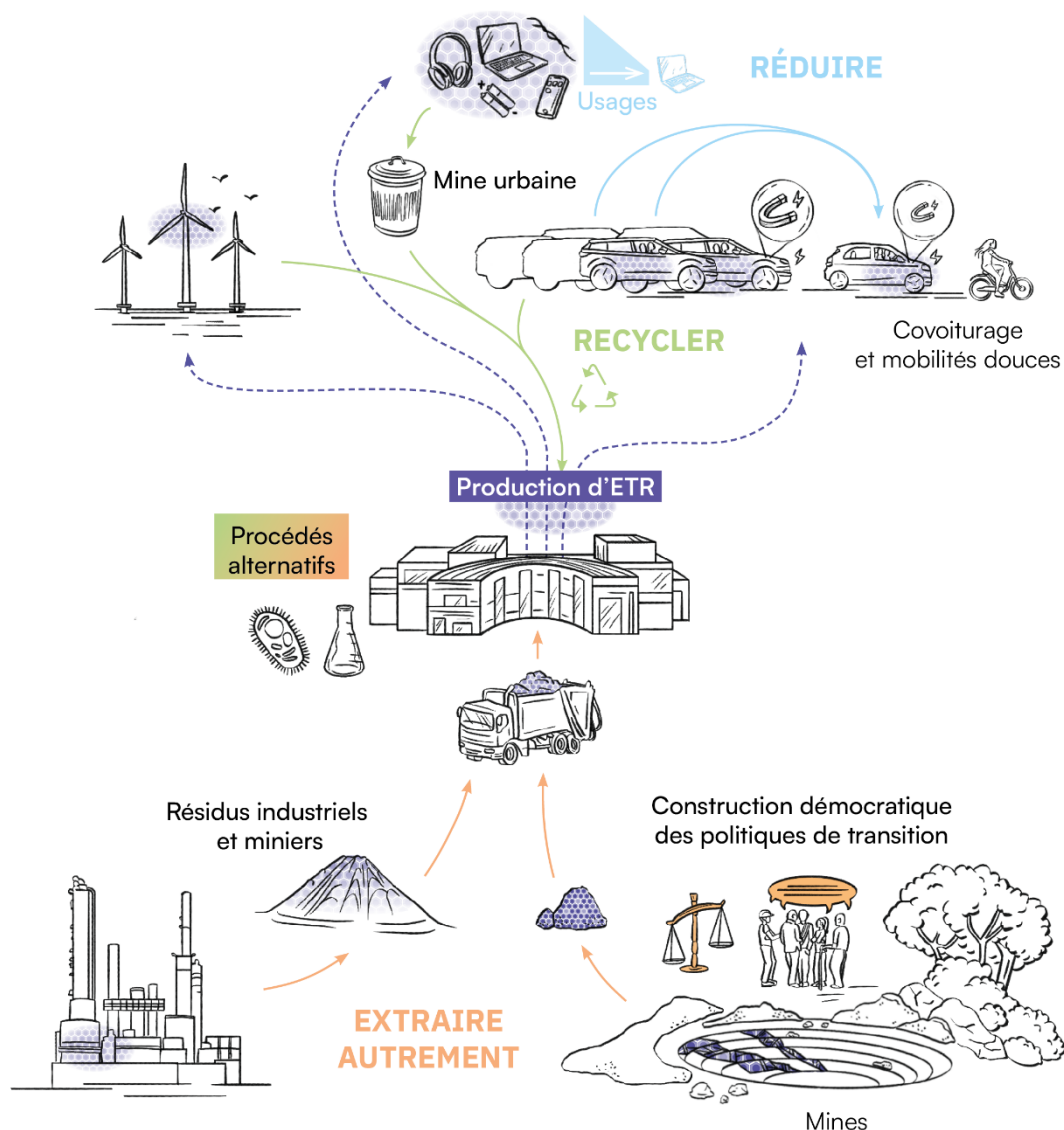


Figure 1.14 Les 3 axes de cette expertise : 1. Réduire, 2. Recycler et 3. Extraire autrement les ETR. 1. L'écoconception et la sobriété des usages (ici les voitures et les déchets électriques et électroniques ont été sélectionnés pour représenter les usages) 2. La circularité permise par le recyclage (avec ici par exemple les éoliennes) 3. L'extraction d'ETR dans des déchets miniers et industriels (ici les cendres de charbon) ou par des projets de mines d'ETR réalisés dans des conditions de justice sociale et environnementale.

## 1.5 Liste des références du chapitre 1

- Alonso, E., Pineault, D. G., Gambogi, J., & Nassar, N. T. (2023). Mapping first to final uses for rare earth elements, globally and in the United States. *Journal of Industrial Ecology*, 1-11. (rayyan-1273125205). <https://doi.org/10.1111/jiec.13354>
- Alonso, E., Sherman, A. M., Wallington, T. J., Everson, M. P., Field, F. R., Roth, R., & Kirchain, R. E. (2012). Evaluating rare earth element availability : A case with revolutionary demand from clean technologies. *Environmental Science & Technology*, 46(6), 3406-3414. <https://doi.org/10.1021/es203518d>
- Arienzo, M., Ferrara, L., Trifuoggi, M., & Toscanesi, M. (2022). Advances in the fate of rare earth elements, REE, in transitional environments : Coasts and estuaries. *Water*, 14(3), 1-23. (rayyan-13566213). <https://doi.org/10.3390/w14030401>
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements : A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 1-19. (rayyan-726051423). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
- Barakos, G., Gutzmer, J., & Mischo, H. (2016). Strategic evaluations and mining process optimization towards a strong global REE supply chain. *Journal of Sustainable Mining*, 15(1), 26-35. (rayyan-1279580415). <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.05.002>
- Barteková, E., & Kemp, R. (2016). National strategies for securing a stable supply of rare earths in different world regions. *Resources Policy*, 49, 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.05.003>
- Binnemans, K., Jones, P. T., Mueller, T., & Yurramendi, L. (2018). Rare earths and the balance problem : How to deal with changing markets? *Journal of Sustainable Metallurgy*, 126-146. (rayyan-726050681). <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0162-8>

- Boudia, S. (2019). Quand une crise en cache une autre : La « crise des terres rares » entre géopolitique, finance et dégâts environnementaux: *Critique Internationale*, N° 85(4), 85-103. <https://doi.org/10.3917/criti.085.0085>
- Browning, C., Northey, S., Haque, N., Bruckard, W., & Cooksey, M. (2016). Life cycle assessment of rare earth production from monazite. *REWAS 2016: Towards Materials Resource Sustainability*, 1-8. (rayyan-10656743). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48768-7\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48768-7_12)
- Bucciarelli, P., Hache, E., & Mignon, V. (2025). Evaluating criticality of strategic metals : Are the herfindahl—hirschman index and usual concentration thresholds still relevant? *Energy Economics*, 143, 108208. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108208>
- Bünzli, J.-C. G. (2022). Applications of rare earths. In S. T. Liddle, D. P. Mills, & L. S. Natrajan, *The lanthanides and actinides* (p. 633-685). WORLD SCIENTIFIC (EUROPE). [https://doi.org/10.1142/9781800610163\\_0017](https://doi.org/10.1142/9781800610163_0017)
- Butler, C. (2014). *Rare earth elements: China's monopoly and implications for U.S. national security*. *The Fletcher Forum of World Affairs*, 38(1), 23-39.
- Charles, N., Tuduri, J., Lefebvre, G., Pourret, O., Gaillard, F., & Goodenough, K. (2022). Ressources en terres rares de l'europe et du groenland. In S. Decrée, *Ressources métalliques 1* (p. 1-137). ISTE Group. <https://doi.org/10.51926/ISTE.9135.ch1>
- Chen, P., Ilton, E. S., Wang, Z., Rosso, K. M., & Zhang, X. (2024). Global rare earth element resources : A concise review. *Applied Geochemistry*, 175, 106158. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2024.106158>
- Couturier, J. (2024). *Dissolution des éléments de terres rares dans les résidus de bauxite : Étude de la spéciation et des mécanismes de sélectivité par l'utilisation de solvants eutectiques profonds*. 1-359.
- De Young, J., John H., McCartan, L., & Gambogi, J. (2017). *What's been (and what will be) strategic—my metal or your paint? in proceedings of the 42nd forum on the geology of*

- industrial minerals: Information circular 34, north carolina geological survey*, (Professional Paper) [Proceedings edited by Jeffrey C. Reid].  
<https://pubs.usgs.gov/pp/1802/a/pp1802a.pdf>
- de Koning, A., Kleijn, R., Huppel, G., Sprecher, B., van Engelen, G., & Tukker, A. (2018). Metal supply constraints for a low-carbon economy? *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 202-208. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.040>
- Deng, X., & Ge, J. (2020). Global wind power development leads to high demand for neodymium praseodymium (NdPr): A scenario analysis based on market and technology development from 2019 to 2040. *Journal of Cleaner Production*, 277. (rayyan-1251264660). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123299>
- Dobransky, S. (2015). The curious disjunction of rare earth elements and US politics : Analyzing the inability to develop a secure REE supply chain. In R. D. Kiggins (Éd.), *The political economy of rare earth elements* (p. 85-105). Palgrave Macmillan UK. [https://doi.org/10.1057/9781137364241\\_5](https://doi.org/10.1057/9781137364241_5)
- Elwert, T., Goldmann, D., Schmidt, F., & Stollmaier, R. (2013). Hydrometallurgical recycling of sintered NdFeB magnets. *World of Metallurgy - ERZMETALL*. (rayyan-726051097).
- Fan, J., Wang, W., Yi, X., & Yang, Z. (2022). Contamination, source identification, ecological and human health risks assessment of potentially toxic-elements in soils of typical rare-earth mining areas. *Int. J. Environ. Res. Public Health*.
- Figueiredo, G., Correia, S. F. H., Fu, L., de Zea Bermudez, V., Carneiro Neto, A. N., André, P. S., & Ferreira, R. A. S. (2024). Chapter 344 - luminescent solar concentrators : Current and future applications in smart cities. In J.-C. G. Bünzli & S. M. Kauzlarich (Éds.), *Handbook on the physics and chemistry of rare earths* (Vol. 66, p. 51-123). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.hpcrc.2024.06.001>

- Fortier, S. M., Nassar, N. T., Day, W. C., Hammarstrom, J. M., Seal, R. R., Graham, G. E., & Lederer, G. W. (2022). *USGS critical minerals review*. 1-15.
- Ganguli, R., & Cook, D. R. (2018). Rare earths : A review of the landscape. *MRS Energy & Sustainability*, 1-16. (rayyan-726049300). <https://doi.org/10.1557/mre.2018.7>
- Gavin, B. (2015). Sustainable development of China's rare earth industry within and without the WTO. *Journal of World Trade*, 49(3), 495-516. (rayyan-1279580463). <https://doi.org/10.54648/trad2015020>
- Gholz, E., & Hughes, L. (2021). Market structure and economic sanctions : The 2010 rare earth elements episode as a pathway case of market adjustment. *Review of International Political Economy*, 28(3), 611-634. <https://doi.org/10.1080/09692290.2019.1693411>
- Gkika, D. A., Chalaris, M., & Kyzas, G. Z. (2024). Review of methods for obtaining rare earth elements from recycling and their impact on the environment and human health. *Processes*, 12(6), 1235. <https://doi.org/10.3390/pr12061235>
- Glöser, S., Tercero Espinoza, L., Gandenberger, C., & Faulstich, M. (2015). Raw material criticality in the context of classical risk assessment. *Resources Policy*, 44, 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.12.003>
- Goldman, J. A. (2014). The U.S. rare earth industry : Its growth and decline. *Journal of Policy History*, 26(2), 139-166. <https://doi.org/10.1017/s0898030614000013>
- Gonzalez, V., Vignati, D. A. L., Leyval, C., & Giamberini, L. (2014). Environmental fate and ecotoxicity of lanthanides : Are they a uniform group beyond chemistry? *Environment International*, 71, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.06.019>
- Graedel, T. E., Harper, E. M., Nassar, N. T., Nuss, P., & Reck, B. K. (2015). Criticality of metals and metalloids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(14), 4257-4262. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112>

- Granvik, P., Hanski, J., Lähdesmäki, S., Jokilaakso, A., & Huttunen-Saarivirta, E. (2025). Critical raw materials for green transition : Key parameters and feasibility index for sufficiency. *Resources, Conservation and Recycling*, 218, 108197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108197>
- Habib, K., Hansdottir, S. T., & Habib, H. (2020). Critical metals for electromobility : Global demand scenarios for passenger vehicles, 2015-2050. *Resources, Conservation and Recycling*, 1-14. (rayyan-726050041). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104603>
- Hanauer, L., & Morris, L. J. (2014). *Chinese engagement in Africa : Drivers, reactions, and implications for U.S. policy*. 1-173. <https://doi.org/10.7249/RR521>
- Hatakeyama, K. (2015). Rare earths and Japan : Traditional vulnerability reconsidered. In R. D. Kiggins (Éd.), *The political economy of rare earth elements* (p. 43-61). Palgrave Macmillan UK. [https://doi.org/10.1057/9781137364241\\_3](https://doi.org/10.1057/9781137364241_3)
- Haynes, W. M. (2014). Section 14—Geophysics, astronomy, and acoustics. In *CRC handbook of chemistry and physics* (p. 2400-2454).
- Humphreys, D. (1995). Whatever happened to security of supply? Minerals policy in the post-cold war world. *Resources Policy*, 21(2), 91-97. [https://doi.org/10.1016/0301-4207\(95\)00057-w](https://doi.org/10.1016/0301-4207(95)00057-w)
- Kleijn, R., & van der Voet, E. (2010). Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources : An exploration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2784-2795. (rayyan-8829553). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.066>
- Klinger, J. M. (2018a). Rare earth elements : Development, sustainability and policy issues. *Extractive Industries and Society*, 5(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.12.016>
- Klinger, J. M. (2018b). *Rare earth frontiers*. Cornell University Press.

- Klinger, J. M. (2020). Environment, development, and security politics in the production of belt and road spaces. *Territory, Politics, Governance*, 8(5), 657-675.  
<https://doi.org/10.1080/21622671.2019.1582358>
- Kraus, C. (2010). Creating a soviet “semi-colony”? Sino-soviet cooperation and its demise in xinjiang, 1949-1955. *The Chinese Historical Review*, 17(2), 129-165.  
<https://doi.org/10.1179/tcr.2010.17.2.129>
- Lachaux, N., Catrouillet, C., Marsac, R., Poirier, L., Pain-Devin, S., Gross, E. M., & Giamberini, L. (2022). Implications of speciation on rare earth element toxicity : A focus on organic matter influence in daphnia magna standard test. *Environmental Pollution*, 307, 119554.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119554>
- Lachaux, N., Cossu-Leguille, C., Poirier, L., Elisabeth Maria Gross, & Giamberini, L. (2022). Integrated environmental risk assessment of rare earth elements mixture on aquatic ecosystems. *Frontiers in Environmental Science*, 1-18. (rayyan-726049217).  
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.974191>
- Laurent, B., Louvet, G., Solé-Pomies, R., & Violle, A. (2025). What makes minerals critical? Problematizing sovereignty in times of crisis. *Extractive Industries and Society*, 24, 101720. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101720>
- Li, J., Peng, K., Wang, P., Zhang, N., Feng, K., Guan, D., Meng, J., Wei, W., & Yang, Q. (2020). Critical rare-earth elements mismatch global wind-power ambitions. *One Earth*, 3(1), 116-125. (rayyan-9601108). <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.06.009>
- Liang, Y., Kleijn, R., & Voet, E. van der. (2023). Increase in demand for critical materials under IEA net-zero emission by 2050 scenario. *Applied Energy*, 1-10. (rayyan-1273125349).  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121400>

- Lovik, A. N., Hagelueken, C., & Wager, P. (2018). Improving supply security of critical metals : Current developments and research in the EU. *Sustainable Materials and Technologies*, 15, 9-18-18. (rayyan-1251264269). <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.01.003>
- Machacek, E. (2017). Constructing criticality by classification : Expert assessments of mineral raw materials. *Geoforum*, 84, 368-377. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.03.028>
- Machacek, E., & Fold, N. (2018). Competitors contained? Manufacturer strategies in the global rare earth value chain : Insights from the magnet filament. *Extractive Industries and Society-an International Journal*, 5(1), 18-27. (rayyan-1279580215). <https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.12.012>
- Malhotra, N., Hsu, H.-S., Liang, S.-T., Roldan, M. J. M., Lee, J.-S., Ger, T.-R., & Hsiao, C.-D. (2020). An updated review of toxicity effect of the rare earth elements (REEs) on aquatic organisms. *Animals*, 1-27. (rayyan-726051189). <https://doi.org/10.3390/ani10091663>
- Marx, J., Schreiber, A., Zapp, P., & Walachowicz, F. (2018). Comparative life cycle assessment of NdFeB permanent magnet production from different rare earth deposits. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1-10. (rayyan-9601147). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04165>
- Medeiros, C. A. D., & Trebat, N. M. (2017). Transforming natural resources into industrial advantage : The case of China's rare earths industry. *Brazilian Journal of Political Economy*, 37(3), 504-526. <https://doi.org/10.1590/0101-31572017v37n03a03>
- Moreira, A., Henriques, B., Leite, C., Libralato, G., Pereira, E., & Freitas, R. (2020). Potential impacts of lanthanum and yttrium through embryotoxicity assays with *crassostrea gigas*. *Ecological Indicators*, 108, 105687. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105687>
- Neira, P., Romero-Freire, A., Basallote, M. D., Qiu, H., Cobelo-García, A., & Cánovas, C. R. (2022). Review of the concentration, bioaccumulation, and effects of lanthanides in

- marine systems. *Frontiers in Marine Science*, 9, 920405.  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2022.920405>
- Pagano, G., Brouziotis, A. A., Lyons, D., Čarapar, I., Oral, R., Tez, S., Thomas, P. J., Tommasi, F., Libralato, G., Guida, M., & Trifuoggi, M. (2023). Hormetic effects of cerium, lanthanum and their combination at sub-micromolar concentrations in sea urchin sperm. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 110(3), 65-68.  
<https://doi.org/10.1007/s00128-023-03701-z>
- Patel, D. K. (2022). Stream sediment geochemical survey of rare earth elements in and around daringbadi, kandhamal district, odisha. *Journal of the Geological Society of India*, 98(3), 411-416. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-1993-2>
- Peiro, L. T., & Mendez, G. V. (2013). Material and energy requirement for rare earth production. *JOM*, 1-14. (rayyan-10656737). <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0719-8>
- Peiró, L. T., Méndez, G. V., & Ayres, R. U. (2013). Material flow analysis of scarce metals: Sources, functions, end-uses and aspects for future supply. *Environmental Science & Technology*, 47(6), 2939-2947. <https://doi.org/10.1021/es301519c>
- Piarulli, S., Hansen, B. H., Ciesielski, T., Zocher, A.-L., Malzahn, A., Olsvik, P. A., Sonne, C., Nordtug, T., Jenssen, B. M., Booth, A. M., & Farkas, J. (2021). Sources, distribution and effects of rare earth elements in the marine environment: Current knowledge and research gaps. *Environmental Pollution*, 291, 118230.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118230>
- Piguet, C. (2019). Set aside when building the periodic table 150 years ago, are rare earths any better considered by chemists in the 21st century? *Chimia*, 73(3), 165-172.  
<https://doi.org/10.2533/chimia.2019.165>
- Plante, B., Pabst, T., & Wilson, D. (2023). Editorial for special issue “environmental geochemistry in the mining environment”. *Minerals*, 13(1), 112-114. <https://doi.org/10.3390/min13010112>

- Revel, M., Van Drimmelen, C. K. E., Weltje, L., Hursthouse, A., & Heise, S. (2025). Effects of rare earth elements in the aquatic environment: Implications for ecotoxicological testing. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 55(5), 334-375. <https://doi.org/10.1080/10643389.2024.2406992>
- Romero-Freire, A., Turlin, F., André-Mayer, A.-S., Pelletier, M., Cayer, A., & Giamberini, L. (2019). Biogeochemical cycle of lanthanides in a light rare earth element-enriched geological area (quebec, canada). *Minerals*, 9(10), 573-589. <https://doi.org/10.3390/min9100573>
- Sabour, M. A. (2014). Uranium fixation and removal from different soil types : Review. *Nuclear Energy Science & Power Generation Technology*, 3(3). <https://doi.org/10.4172/2325-9809.1000126>
- Sager, M., & Wiche, O. (2024). Rare earth elements (REE): Origins, dispersion, and environmental implications—a comprehensive review. *Environments*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/environments11020024>
- Schrijvers, D., Hool, A., Blengini, G. A., Chen, W.-Q., Dewulf, J., Eggert, R., Van Ellen, L., Gauss, R., Goddin, J., Habib, K., Hagelüken, C., Hirohata, A., Hofmann-Antenbrink, M., Kosmol, J., Le Gleuher, M., Grohol, M., Ku, A., Lee, M.-H., Liu, G., ... Wäger, P. A. (2020). A review of methods and data to determine raw material criticality. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104617. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104617>
- Squadrone, S., Brizio, P., Stella, C., Mantia, M., Battuello, M., Nurra, N., Sartor, R. M., Orusa, R., Robetto, S., Brusa, F., Mogliotti, P., Garrone, A., & Abete, M. C. (2019). Rare earth elements in marine and terrestrial matrices of northwestern Italy : Implications for food safety and human health. *Science of the Total Environment*, 660, 1383-1391. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.112>

- Talan, D., & Huang, Q. (2022). A review of environmental aspect of rare earth element extraction processes and solution purification techniques. *Minerals Engineering*, 179, 1-19. (rayyan-2244071). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107430>
- Vaughan, J., Gontijo, V., Valenta, R., & Alonso, E. (2023). *Rare earth element sources, end-use demand trends, and hydrometallurgical separations*.
- Verrax, F. (2014). Governance of mineral resources: Towards the end of national states' supremacy? The WTO and the case of rare earth elements as an illustrative example. *Etikk I Praksis*, 8(1), 41-51. (rayyan-1279580490). <https://doi.org/10.5324/eip.v8i1.1802>
- Vidal, O., Le Boulzec, H., Andrieu, B., & Verzier, F. (2022). Modelling the demand and access of mineral resources in a changing world. *Sustainability*, 14(1), 11-26. <https://doi.org/10.3390/su14010011>
- Wang, C. (2018). WTO rare earths case's influence on China's domestic regulatory changes. *Journal of World Trade*, 52(2), 307-330. (rayyan-1279580286). <https://doi.org/10.54648/trad2018014>
- Yin, X., Martineau, C., Demers, I., Basiliko, N., & Fenton, N. J. (2021). The potential environmental risks associated with the development of rare earth element production in Canada. *Environmental Reviews*, 29(3), 354-377. (rayyan-1279579983). <https://doi.org/10.1139/er-2020-0115>
- Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., & Kuckshinrichs, W. (2022). Environmental impacts of rare earth production. *MRS Bulletin*, 1-9. (rayyan-10656641). <https://doi.org/10.1557/s43577-022-00286-6>
- Zepf, V. (2013). *Rare earth elements : A new approach to the nexus of supply, demand and use: exemplified along the use of neodymium in permanent magnets*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35458-8>

Zhou, B., Li, Z., & Chen, C. (2017). Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. *Minerals*, 7(11), Article 11.  
<https://doi.org/10.3390/min7110203>