



cnrs

SYNTHÈSE DE L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE COLLECTIVE

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

quelles perspectives en termes
de sobriété, recyclage
et mode de production ?

Pour citer ce document :

CNRS. *Vers une utilisation plus responsable des terres rares tout au long de leur cycle de vie : Quelles perspectives en termes de sobriété, recyclage et mode de production ?* Synthèse de l'Expertise Scientifique Collective. 2025.

Photo de couverture : © Crédit photo Cyril FRESILLON / Mecaware / CNRS Images

Illustration : © Julie BORGESE

Mise en page : Morwenna Moal d'après la conception de Sarah Landel

Directeur de publication

Antoine PETIT, président-directeur général du CNRS.

Les expert.e.s et auteur.ice.s qui ont contribué à ce document

Pilotes scientifiques

Pascale RICARD est juriste, spécialiste en droit international, de la mer et de l'environnement, chargée de recherche au CNRS au laboratoire Droits international, comparé et européen — DICE (Aix-Marseille Université — CNRS).

Clément LEVARD est physicochimiste, spécialiste de géoscience de l'environnement, directeur de recherche au CNRS au Centre de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement — CEREGE (Aix-Marseille Université — CNRS-INRAE — IRD).

Romain GARCIER est géographe, spécialiste des approches géographiques des matériaux critiques et des terres rares, maître de conférences à l'ENS de Lyon rattaché au laboratoire Environnement Ville Société — EVS (CNRS — ENTPE — ENS de Lyon — ENSA Lyon — Université Jean Monnet — Université Lumière Lyon 2 — Université Lyon 3 Jean Moulin).

Expert.e.s principaux

Kevin BERNOT est chimiste, professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Rennes à l'Institut des sciences chimiques de Rennes — ISCR (CNRS — ENSC Rennes — Université de Rennes).

Bénédicte CENKI est géologue, professeure à l'Université de Montpellier au laboratoire Géosciences Montpellier (CNRS — Université de Montpellier).

Marie FORGET est géographe, maîtresse de conférences à l'Université Savoie Mont Blanc au laboratoire Environnement, Dynamique et Territoires de la Montagne Edytem (CNRS — Université de Savoie Mont Blanc).

Olga FUENTES est spécialiste de l'analyse du cycle de vie avec un parcours en ingénierie électronique, post-doctorante à l'Université de Bordeaux à l'Institut des Sciences Moléculaires — ISM (Bordeaux INP — CNRS — Université de Bordeaux), en binôme avec Guido Sonnemann.

Laure GIAMBERINI est écotoxicologue, professeure classe exceptionnelle à l'Université de Lorraine et directrice du Laboratoire interdisciplinaire des environnements continentaux — LIEC (CNRS — Université de Lorraine).

Émilie JANOTS est géologue, maîtresse de conférences hors classe à l'Université Grenoble-Alpes à l'Institut des Sciences de la Terre — ISTerre (CNRS — IRD — Université Grenoble Alpes — Université Savoie Montblanc).

Brice LAURENT est sociologue, chercheur aux Mines Paris-PSL à l'Institut interdisciplinaire de l'innovation-I3 (CNRS — École Polytechnique — Mines Paris-PSL — Télécom Paris). Il est également directeur de la Direction Sciences Sociales, Économie et Société de l'Anses.

Gilles LHUILIER est juriste, professeur de droit privé à l'ENS de Rennes, membre senior de l'Institut Universitaire de France.

Frédéric MAZALEYRAT est physicien, professeur à l'ENS Paris-Saclay au laboratoire Systèmes et applications des technologies de l'information et de l'énergie — Satie (CNAM — CNRS — CY Cergy Paris Université — ENS Paris-Saclay — Université Paris-Saclay).

Stéphane PELLET-ROSTAING est chimiste, directeur de recherche CNRS à l'Institut de chimie séparative de Marcoule-ICSM (CEA — CNRS — ENSC Montpellier — Université de Montpellier).

Guido SONNEMANN est chimiste et spécialiste de l'analyse du cycle de vie, professeur à l'Université de Bordeaux à l'Institut des Sciences Moléculaires — ISM (Bordeaux INP — CNRS — Université de Bordeaux).

Eric VAN HULLEBUSCH est biogéochimiste, professeur à l'Institut de physique du globe de Paris — IPGP/IPGP-UMR (CNRS — IPGP-Université Paris Cité).

Fanny VERRAX est philosophe, professeure associée en transition écologique et entrepreneuriat social à l'EmLyon Business School.

Alexandre VIOLLE est sociologue, post-doctorant aux Mines Paris-PSL à l'Institut interdisciplinaire de l'innovation -I3 (CNRS — Ecole Polytechnique — Mines Paris-PSL — Télécom Paris), en binôme avec Brice Laurent.

Expert.e.s contributeur.ice.s¹

Yacine AMARA, Université Le Havre Normandie.
Valentin BAUDOUIN, Université de Haute Alsace.
Philippe BILLET, Université Lyon 3.
Laurent CALVEZ, Université de Rennes.
Laurent CASSAYRE, CNRS.
Florian JAROSCHIK, CNRS.
Elsa LAFAYE DE MICHEAUX, Institut national des langues et civilisations orientales.
Alexandra LANGLAIS, CNRS.
Florian LEBLANC, CNRS.
Louis-Marie MALBEC, IFPEN.
Alexander STINGL, University of Galway.
Luca TENREIRA, European University Institute.
Raphaël TRIPER, Université de Bretagne Occidentale.
Francesco RICCI, Université de Montpellier, pour le travail de préfiguration de l'expertise et son audition.

Remerciements

Camille DE SALABERT et Viviane HAGUENAUER, Institut de l'Information Scientifique et Technique (INIST), CNRS, pour leur appui dans la constitution du corpus bibliographique.

Sandrine MALJEAN-DUBOIS, Jean-François GERARD, Stéphane GUILLOT et Franck LECOCQ, membres du Comité de Suivi de l'expertise.

Les membres du Comité d'Orientation de l'Expertise du CNRS.

Jean-Claude BÜNZLI, pour sa conférence donnée lors d'une réunion plénière du groupe d'expert.e.s.

Mission Pour l'Expertise Scientifique du CNRS

Directrice : Valérie LALLEMAND-BREITENBACH

Responsable de la conduite des expertises : Aude VEDRINES

Responsable de projet de l'expertise « Terres rares » : Marie DÉCHELLE puis Simon BEYNE

Version de novembre 2025

¹ Ces expert.e.s ont apporté leur contribution par leur lecture des publications et/ou la rédaction de notes intégrées au rapport et à la synthèse et/ou par leur relecture du rapport et de la synthèse.



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

quelles perspectives en termes
de sobriété, recyclage
et mode de production ?

SYNTHÈSE DE L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE COLLECTIVE

Introduction

L'expertise scientifique collective (ESCo) Terres rares vise à répondre à la question suivante : comment la littérature scientifique peut-elle éclairer le débat et la décision publics sur les usages responsables des terres rares en France, dans un contexte de renforcement de la souveraineté nationale en matière d'approvisionnement en ressources stratégiques ?

Les usages des terres rares sont d'abord **industriels** : les propriétés magnétiques, chimiques, catalytiques, mécaniques et optiques des dix-sept éléments du tableau périodique — regroupés sous le terme de éléments de terres rares (ETR) — justifient leur utilisation dans de nombreux domaines tels que l'énergie, le numérique, le secteur médical, les applications militaires ou la transition environnementale. Les ETR sont presque partout : voitures électriques, smartphones, éoliennes *offshore*, lasers, avions, missiles, etc., et sont peu substituables.

Répondre à ces besoins dépend étroitement de l'**extraction minière**. La France ne dispose pas de ressources* géologiques exploitables à court terme. En 2017, les ressources en ETR se répartissaient entre une dizaine de pays : la Chine (35 %)¹, le Brésil (11 %), l'Australie (10 %), la Russie (10 %), le Groenland (9 %), le Canada (7 %), la Suède (6 %), le Vietnam (3 %), les États-Unis (3 %) et les autres (6 %), mais l'extraction mondiale est dominée par la Chine (70 % et un monopole sur des ETR critiques). L'utilisation industrielle des ETR suppose au

préalable une transformation complexe, nécessitant un savoir-faire dont la maîtrise a fait de la Chine le principal opérateur mondial. La plupart des ETR extraits doivent aujourd'hui être envoyés en Chine pour y être raffinés. L'Union européenne et les États-Unis, par exemple, ont donc classé les ETR parmi les métaux critiques. Un matériau critique est soumis à des risques d'approvisionnement qui pèsent sur la souveraineté ou l'autonomie des pays importateurs. Ces risques d'approvisionnement peuvent naître d'un manque de disponibilité géologique des matériaux, mais dépendent bien plus souvent de l'origine des matières premières utilisées.

C'est pourquoi les usages des ETR revêtent également une dimension **politique**. Même s'il devenait techniquement possible de relancer une extraction métallique sur nos territoires longtemps délaissés par l'activité minière, les réserves d'ETR disponibles en Europe ne suffiraient pas à satisfaire les besoins actuels ou à court terme de nos industries dans un contexte de transition environnementale. **Cela appelle une réflexion sur la sobriété dans l'usage des ressources en ETR.** Comment revisiter notre consommation, en arbitrant par exemple entre les usages essentiels et ceux qui le sont moins, en développant la recherche de matériaux de substitution, en promouvant de nouvelles formes de consommation finale, etc. ? Développer la circularité de nos économies apparaît comme un levier clé pour la soutenabilité de leur approvisionnement. Et alors même que l'extraction reste

nécessaire, celle-ci doit pouvoir se faire dans des conditions socialement, politiquement et écologiquement acceptables pour l'Europe, sans pour autant externaliser les impacts négatifs de l'activité minière vers les pays du sud global.

Dans ce contexte, le CNRS a souhaité conduire une **expertise scientifique collective, avec pour ambition d'apporter un éclairage scientifique à la décision et au débat publics**. Cette ESCo a pour objet d'établir un état des lieux critique des connaissances scientifiques sur la possibilité d'une utilisation responsable des ETR, tout au long de leur cycle de vie, et les défis et opportunités d'une telle utilisation. Elle a été conduite dans le respect des principes de compétence, d'indépendance, d'impartialité et de transparence. Un collectif pluridisciplinaire de 17 experts et expertes scientifiques en sciences physiques, géologiques, environnementales, en chimie et en sciences humaines et sociales, ont analysé plus de 4100 publications, avec l'aide ponctuelle de 13 autres scientifiques pour produire un rapport de référence et permettre l'élaboration du présent document de synthèse (cf. annexe méthodologique). L'ESCo recense les acquis, les lacunes de connaissances et les controverses. Trois axes sont développés pour une exploration interdisciplinaire et systémique de l'usage responsable des terres rares : **réduire** leur consommation, les **recycler** et les **extraire autrement**.

¹ Ces chiffres sont tirés du rapport de l'USGS, l'Institut d'études géologiques des États-Unis (United States Geological Survey).

Sommaire

INTRODUCTION

I USAGES, RESSOURCES ET ENJEUX GÉOPOLITIQUES 8

I.1 Définition 9

- Ce que ne sont pas les ETR 9
- Ce que sont les ETR 9

I.2 Les usages 9

- Liens entre propriétés des constituants, matériaux et dispositifs 9
- Dynamique des usages 13
- Des usages dispersés aux usages concentrés en ETR 15

I.3 Ressources, réserves, production 16

- Des ressources et réserves géologiques bien distribuées géographiquement 16
- Une centralisation de la majorité de l'extraction et du raffinage en Chine 16
- Les impacts environnementaux et sanitaires de l'extraction 16
- Le « *balance problem* » 19
- Le marché des terres rares 19

I.4 La mise en politique des terres rares 19

- La structuration du marché mondial des terres rares des années 1950 aux années 1980 19
- La structuration du marché des terres rares des années 1980 aux années 2010 20
- Les réponses des États et entreprises non chinoises à la crise des terres rares 21

I.5 Objectifs et plan 24

II RÉDUIRE 26

II.1 Panorama des usages et des possibilités de réduction ou de substituabilité des ETR 27

- Les matériaux à fortes teneurs en ETR 28
- Les matériaux à faibles teneurs en ETR 30

II.2 Le cadre juridique applicable aux ETR : de la sécurité de l'approvisionnement à l'économie circulaire 32

- L'encadrement européen de la production et de l'approvisionnement en ETR sous le prisme de la sécurité 32
- L'articulation de la réglementation relative aux ETR avec les principes de l'économie circulaire 33

II.3 Concevoir, consommer et posséder autrement 36

- Concevoir et fabriquer autrement 36
- Posséder autrement 36
- Consommer autrement 37
- Conclusion 38
- Mise en perspective 38

III RECYCLER **42**

III.1 Institutionnalisation du recyclage **43**

- Le recyclage : une activité systémique 43
- La nécessité d'une vision systémique relative aux freins du recyclage des ETR 45
- L'existence d'un cadre juridique général, applicable au recyclage des produits contenant des ETR en France et en Europe 47

III.2 Organisation concrète et étapes du recyclage **49**

- Tête de procédés : démontage et prétraitement 51
- Cœur de procédé 52
- Conclusion 54

IV EXTRAIRE AUTREMENT **60**

IV.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe : cartographie des ressources **61**

- Les gisements primaires formés en conditions géologiques profondes 61
- Les gisements formés en conditions géologiques peu profondes 62
- Les « pistes du futur » 62
- Les sources secondaires 64

IV.2 L'existence de procédés innovants, environnementalement plus respectueux **66**

- Nouvelles pistes de techniques d'exploration 66
- Extraction des ETR à partir de sources primaires 67
- Extraction des ETR à partir de sources secondaires 69

IV.3 L'intégration des considérations humaines et environnementales dans l'extraction **71**

- L'émergence des exigences de « responsabilité sociale » et de « durabilité » : des mots d'ordre limités pour extraire autrement 71
- Le « durcissement » et l'adaptation du cadre juridique en réponse aux insuffisances de la RSE 73
- La réactualisation de l'ambition de responsabilité (sociale) et de durabilité par la transition énergétique, source de nouvelles asymétries 73
- Comment mieux faire pour extraire autrement ? 74
- Conclusion et mise en perspective 76

CONCLUSION GÉNÉRALE **79**

GLOSSAIRE (Les termes décrits dans le glossaire sont annotés d'un astérisque* à leur première occurrence) **81**

ANNEXE MÉTHODOLOGIQUE **83**

- Constitution du groupe d'experts 83
- Constitution de la base de ressources scientifiques 83
- Écriture et modalités de travail 84

RÉFÉRENCES **85**

I. Usages, ressources et enjeux géopolitiques

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

Synthèse de l'expertise scientifique collective

I. Usages, ressources et enjeux géopolitiques

I.1 Définition

Les éléments de terres rares (ETR) font référence à une famille de **17 éléments chimiques** (figure 1). La plupart se trouvent sur la même ligne du tableau périodique : ce sont les 15 lanthanides (lanthane au lutécium). À ceux-là, s'ajoutent l'yttrium (Y) et le scandium (Sc), mais ce dernier est exclu de l'expertise. Les ETR sont souvent classés en deux groupes : les ETR légers (du lanthane (La) au gadolinium (Gd)) et les ETR lourds (du terbium (Tb) au lutécium (Lu), avec l'yttrium). La distinction entre éléments légers et lourds est purement conventionnelle et ne correspond pas à une classification fondée sur leurs propriétés⁴.

Au-delà de cette définition purement chimique, cette expertise aborde la question des ETR sous leur dimension géologique, économique, sociale, géographique, juridique, politique et environnementale et s'intéresse en particulier à leurs usages et leur dynamique, leur disponibilité, les rapports de force et les controverses qu'elles cristallisent à l'échelle mondiale, ainsi que leurs implications pour les politiques publiques de transition et d'affirmation de la souveraineté. Ces différentes dimensions sont développées dans le rapport de l'ESCo (chapitre I) et synthétisées dans les sections suivantes.

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.

Métaux rares : les ETR sont relativement abondants dans la croûte terrestre, bien plus que les métaux comme l'or, le rhénium ou l'iridium. 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, 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 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.

Ce que sont les ETR

Métaux stratégiques* : métaux associés à certains secteurs stratégiques comme la défense ou ceux des politiques de transition (énergétique, 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.

I.2 Les usages

Liens entre propriétés des constituants, matériaux et dispositifs

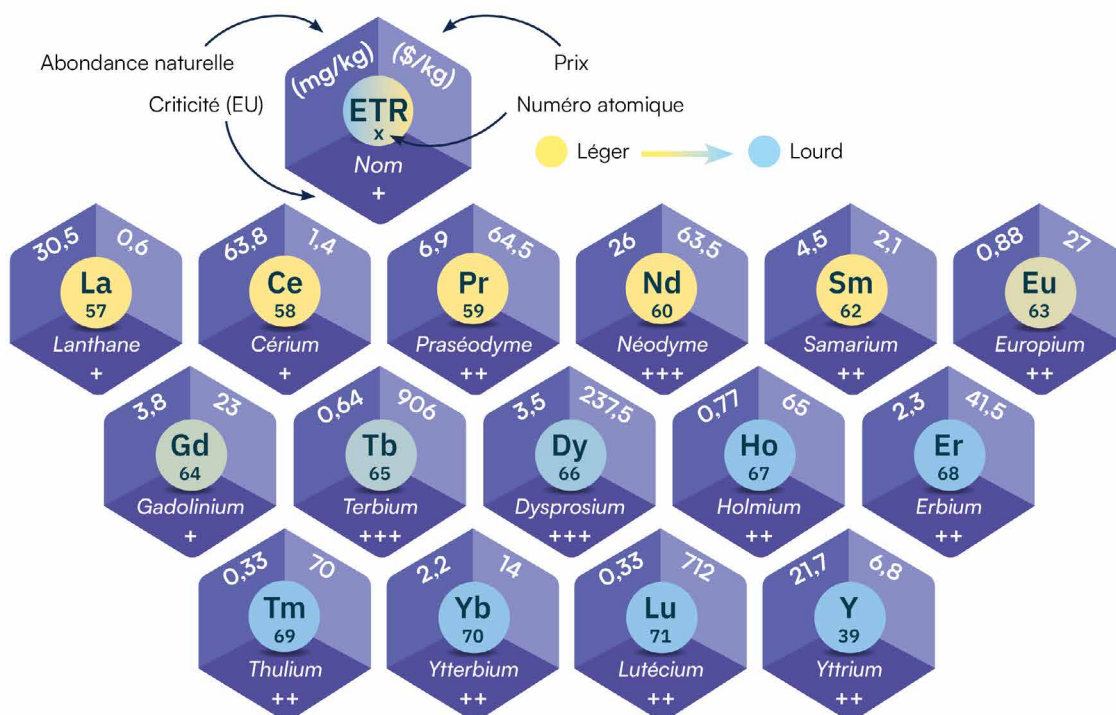
Les ETR possèdent des propriétés uniques qui les rendent essentiels dans de nombreux domaines technologiques (Bünzli, 2022; Piguet, 2019) (figure 3) : le néodyme, le dysprosium, le praséodyme, le terbium et le samarium (constituants) possèdent par exemple des **propriétés magnétiques** uniques utilisées pour la fabrication d'aimants permanents* (matériaux) qui équipent un grand nombre de technologies telles que les

² Selon l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC).

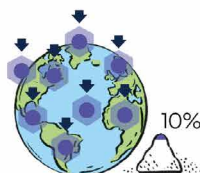
³ Le scandium se distingue par son rayon ionique et ses affinités géochimiques. Il ne se trouve pas avec les autres ETR dans les environnements géologiques. Il représente donc des ressources et des marchés distincts.

⁴ Par contre le rayon ionique, lui par exemple, décroît progressivement du Lanthane au Lutécium dans le tableau périodique et c'est cela qui peut influencer leur comportement géologique et physico-chimique.

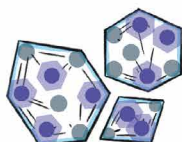
CE QUE SONT LES ETR



LES ETR FACE AUX IDÉES REÇUES



Les ETR ne sont pas rares, ils sont abondants, mais faiblement concentrés dans la croûte terrestre.



Les ETR ne sont pas des terres, ce sont des métaux répartis naturellement dans des minéraux.



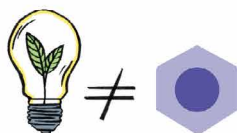
Les ETR ne sont pas uniquement utilisés dans les technologies de la transition environnementale.



Les ETR ne sont pas radioactifs, mais sont naturellement associés à des éléments radioactifs (uranium).



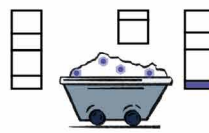
L'extraction des ETR n'est pas sans danger sur l'environnement, les impacts sont plus élevés que ceux des métaux de base.



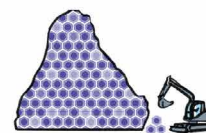
Certaines technologies de la transition énergétique consomment beaucoup d'ETR (éoliennes en mer), mais d'autres n'en utilisent pas du tout (certaines voitures électriques et éoliennes terrestres).



Le recyclage des ETR est très peu pratiqué (<1%), il est complexe, parfois encore peu rentable et manque actuellement d'une chaîne de valorisation.



La quantité d'ETR extraits par an est très faible, comparée aux autres métaux (0,007% des métaux extraits sont des ETR).



Les réserves mondiales d'ETR sont conséquentes, mais leur accessibilité et leur rentabilité varient en fonction des avancées technologiques et des enjeux géopolitiques.

Figure 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 2025⁵. 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.

⁵Liste des prix des produits à base de terres rares au 3 mars 2025. Source : Epoch Material.

Pour identifier les étapes permettant de former un objet et d'en permettre l'usage, on utilise généralement le continuum « **constituant, matériau, dispositif** » (figure 2).

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 donc par essence fondamentale et caractérise leurs propriétés physico-chimiques spécifiques (luminescence, magnétisme, chimique, etc.). Le matériau

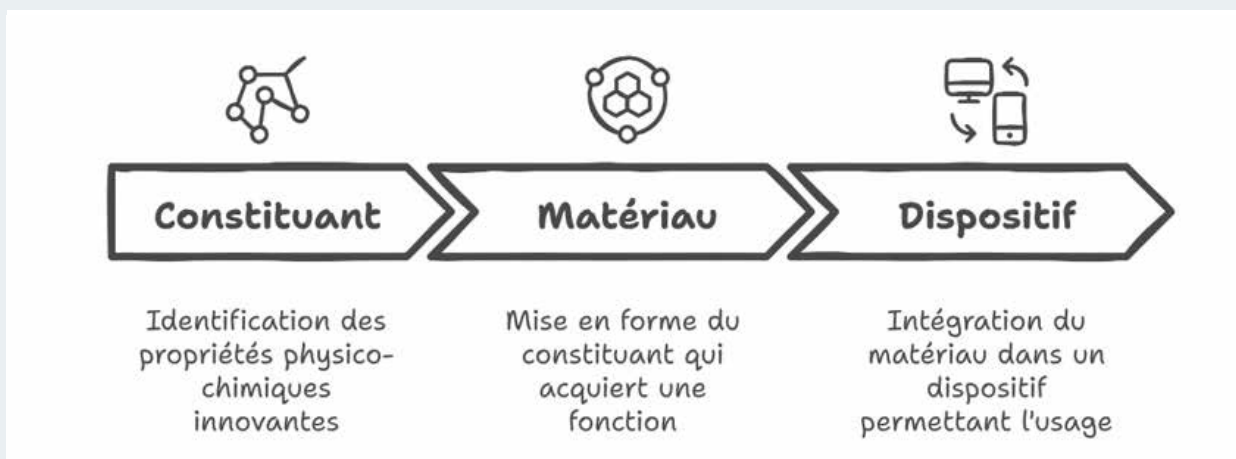


Figure 2 : Du constituant à l'usage : le continuum « constituant, matériau, dispositif ».

est un constituant (ou un ensemble de constituants) que l'on a mis en forme afin de maximiser et de rendre exploitable une ou plusieurs de ses propriétés (par ex. le flux magnétique d'un aimant). La littérature associée se base alors sur les études fondamentales des constituants et étudie leur conversion en matériau. Le dispositif (ou produit) est le stade qui permettra l'usage en remplissant une fonction donnée (par ex. la rotation d'un flux magnétique pour entraîner un moteur). 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 souvent appliquée voire dérive sur des études technologiques, des brevets, etc.

moteurs des voitures hybrides et de certaines voitures électriques et les éoliennes *offshore*, mais aussi de nombreux appareils électroniques (dispositifs ou produits). Les aimants représentent aujourd'hui près d'un tiers de l'utilisation des ETR et sont particulièrement stratégiques pour la décarbonation de l'énergie. Le cérium, le lanthane, le néodyme et le praséodyme possèdent des **propriétés chimiques dont certaines catalytiques** et sont utilisés depuis plus de 60 ans comme catalyseurs de nombreuses réactions chimiques à l'échelle industrielle (craquage du pétrole pour la production de combustible notamment) et dans le secteur de l'automobile (pots catalytiques pour réduire l'émission nocive des gaz d'échappement), ce qui représente près de 21% des usages. Les **propriétés chimiques et (thermo-)mécaniques** de certains ETR (lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, gadolinium) sont utilisées pour améliorer la résistance à l'oxydation à haute température de plusieurs métaux et alliages (en particulier pour l'aéronautique), ainsi que de certains verres. Les poudres de polissage fabriquées principalement à partir de CeO_2 sont utilisées pour polir tous les types de verre et principalement ceux qui nécessitent un polissage très fin tels que des écrans d'ordinateur, des lentilles optiques,

ou des semi-conducteurs. Ces applications représentent à peu près 20 % des usages d'ETR. Les **propriétés optiques** uniques de certains ETR (cérium, praséodyme, néodyme, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, ytterbium) en font par ailleurs des éléments clés de nombreux dispositifs photoniques : lasers solides, amplificateurs optiques de télécommunication, écrans et lampes à phosphores, biomarqueurs luminescents pour l'imagerie médicale, convertisseurs de lumière dans les panneaux solaires (Figueiredo et al., 2024) ou marqueurs anti-contrefaçon luminescents (Bünzli, 2019). Enfin, leurs **propriétés électrochimiques** (cérium, lanthane, néodyme, praséodyme) sont utilisées pour la fabrication des anodes des batteries nickel-hydrure métalliques (NiMH).

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, utilisés pour leurs propriétés magnétiques dans les aimants permanents). Ces matériaux sont quant à eux utilisés dans divers dispositifs couvrant des domaines d'application très variés 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.).

TERRES RARES : PROPRIÉTÉS, MATÉRIAUX ET APPLICATIONS

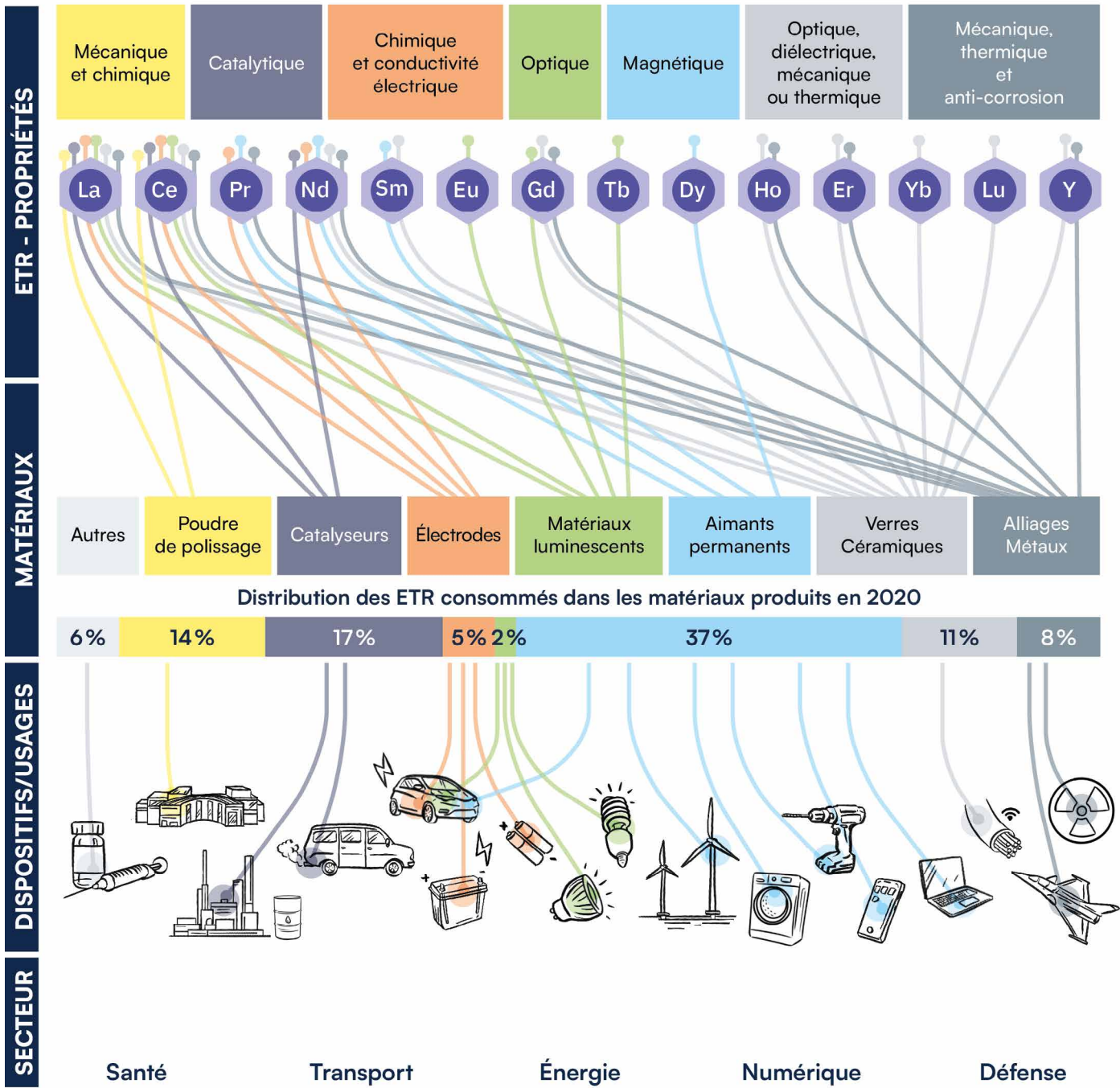


Figure 3. L'utilisation des ETR dans les matériaux selon leurs propriétés, la répartition de la consommation des ETR dans les matériaux produits en 2020 (seules les contributions des ETR représentant au moins 2% des ETR utilisés dans un matériau donné sont illustrées ici) et l'utilisation de ces matériaux pour de nombreux dispositifs. Ces dispositifs sont impliqués de façon variée dans plusieurs secteurs. Cette figure a été réalisée à partir des données de Vaughan et al. 2023 et Alonso et al. 2023.

Dynamique des usages

Une autre particularité des ETR est que contrairement à d'autres métaux, leur domaine d'application a considérablement évolué au fil du temps et s'est diversifié, jusqu'à ce que les ETR deviennent incontournables dans de nombreuses technologies.

Le marché des technologies utilisant des ETR croît globalement très fortement, mais certains domaines ont des dynamiques différentes (figure 4). Ainsi, certains usages tels que les aimants permanents sont en forte croissance et la quantité d'ETR utilisée dans le monde pour les **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. La plupart des ETR sont utilisés dans plusieurs domaines d'application pour lesquels les besoins en ETR évoluent rapidement.

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 **doublément 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). 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. 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.

Depuis 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

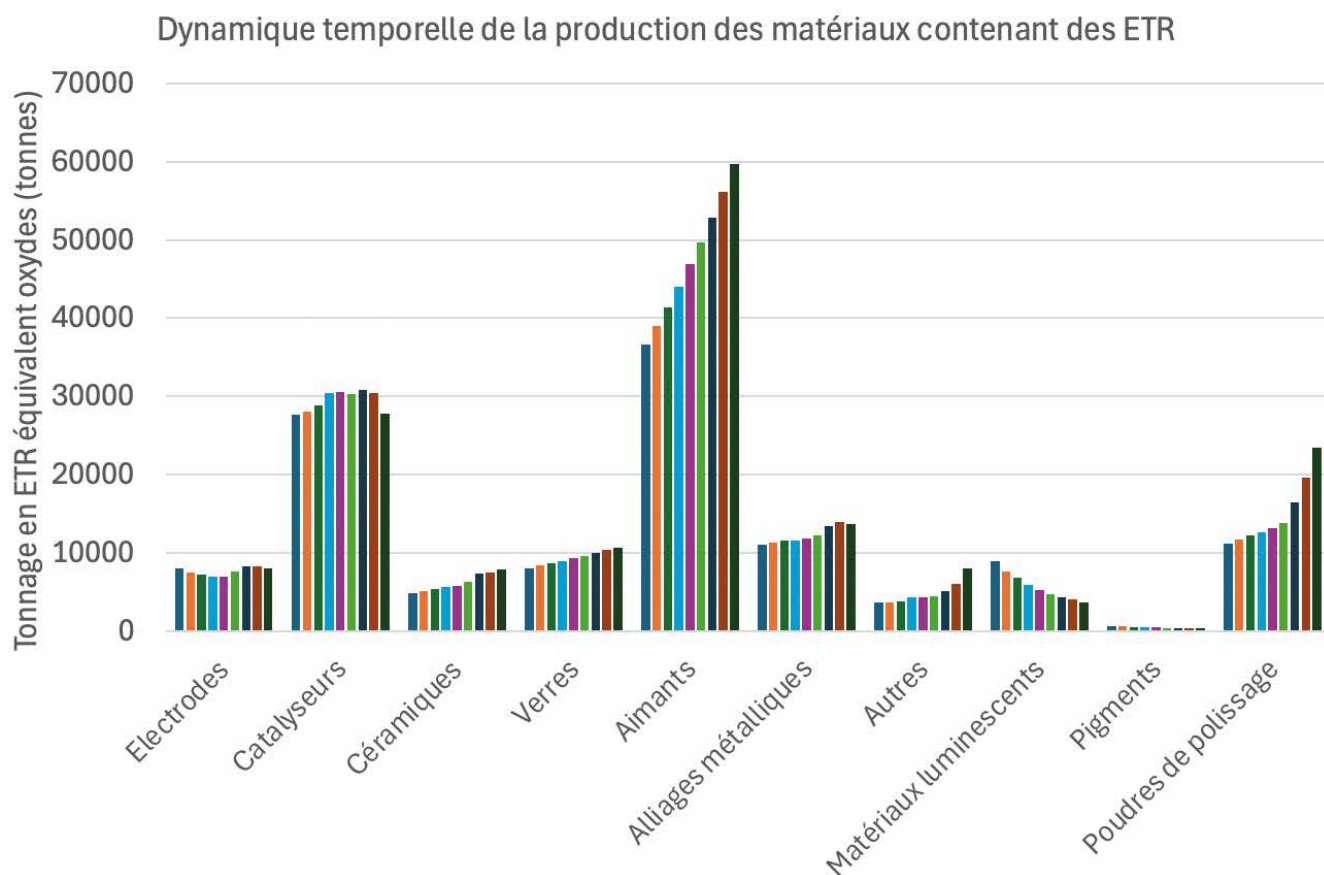


Figure 4 : Dynamique temporelle des principaux usages des ETR, d'après Vaughan et al. 2023.

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. (2012) proposaient 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). 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 CO₂ 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 reconnues 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. (2023) estiment que la demande primaire en néodyme passera de 60 à environ 25 kt/an (Fig. 5 ; 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. (2025) 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. 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 (2010) 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. 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), selon 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 technologique neutre et d’absence d’efficacité matière supplémentaire d’ici à 2050. Projetant la demande en éolienne, Deng et Ge (2020) 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.

Pour les véhicules électriques, Kleijn et van der Voet (2010) 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). D’après Habib et al. (2020) 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.

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

De manière générale, les ordres de grandeur évoqués dans les différentes publications sont convergents (tableau 1).

	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 ⁶
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

Tableau 1 : Comparaison des estimations provenant de plusieurs études de la demande annuelle en néodyme en 2050 (cf. rapport).

⁶ Kleijn et van der Voet (2010) estiment également que 2 à 4 Mt de néodyme seront en circulation en 2050.

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

Des usages dispersés aux usages concentrés en ETR

Cependant, 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 phosphores, et les **matériaux à faible teneur en ETR** (< 10 % en masse et parfois de l'ordre du 1 mg/kg soit 0,0001 %) tels que les verres. Ces 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 (figure 5). 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).

Les besoins croissants en ETR, portés en particulier par les exigences de la transition énergétique, soulèvent une question centrale : celle de l'approvisionnement. Ces éléments, devenus stratégiques pour de nombreux secteurs, sont naturellement répartis à travers le monde, mais 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.

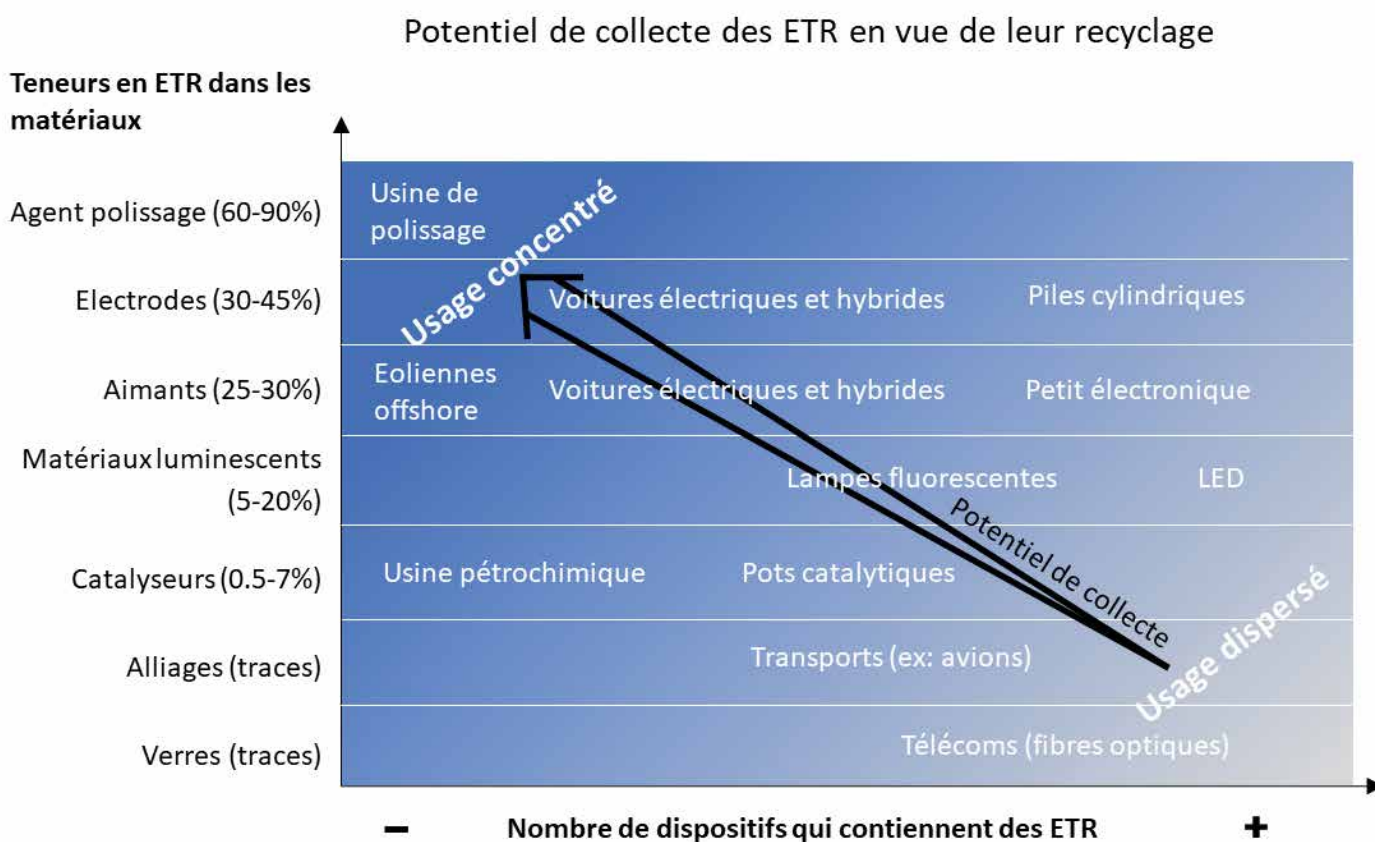


Figure 5 : Impact de la dispersion des ETR dans les technologies sur le potentiel de collecte en vue du recyclage.

I.3 Ressources, réserves, production

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 des 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 exploitables en réserves.

En 2017, **les ressources** mondiales en ETR sont estimées à 478,14 millions de tonnes (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. La distribution inégale des ressources en ETR entre une dizaine de pays (cf. introduction et figure 6) 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). Dans la croûte terrestre profonde, les gîtes d'ETR se forment à partir de magmas ou en interaction avec des fluides hydrothermaux. Des enrichissements d'ETR peuvent également se produire à la surface de la Terre soit par accumulation de sédiments soit par altération de roches. 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.

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 la quatrième partie de cette synthèse.

Une centralisation de la majorité 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 pas 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 devient majoritairement contrôlée par la Chine à partir des années 1990 (figure 7). 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 la transformation en produits intermédiaires (matériaux) ou finis (incorporés 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, suscitée par l'embargo sur les exportations vers le Japon et une hausse des prix d'un facteur 10 (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 extraites sont ensuite envoyées en Chine pour leur raffinage (environ 90 % en 2024 selon l'IEA).

Les impacts environnementaux et sanitaires de l'extraction

Les impacts environnementaux de l'extraction sont à considérer au-delà de la toxicité intrinsèque des éléments. Les impacts du procédé d'extraction des ETR sont significativement plus élevés que ceux concernant les métaux de base (aluminium, cuivre, acier, nickel et zinc) mais plus faibles que ceux qui accompagnent l'extraction des métaux précieux (or, palladium, platine, rhodium et argent) (Ikhlail, 2017). 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,

RÉSERVES, RESSOURCES ET PRODUCTION D'ETR DANS LE MONDE

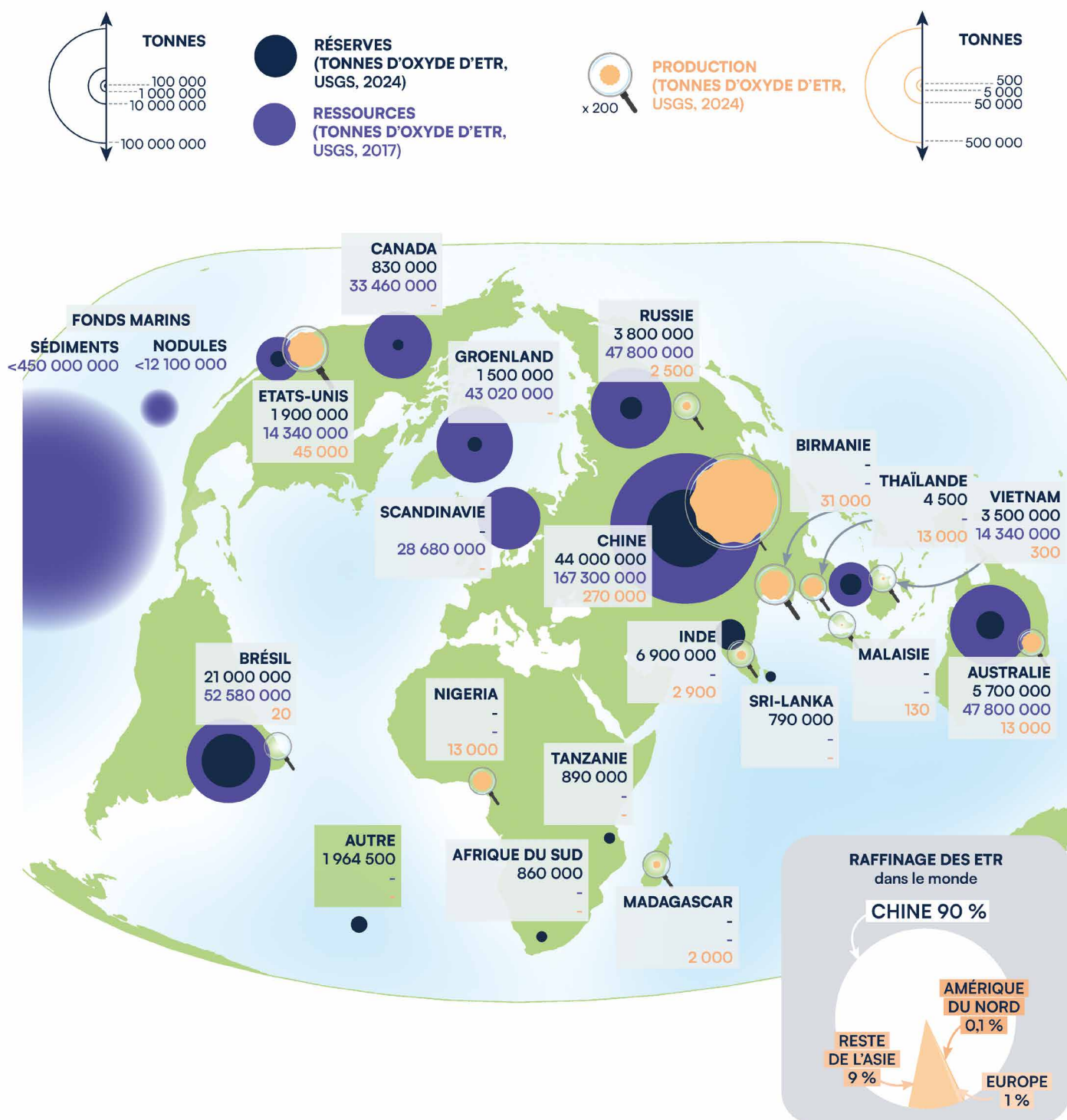


Figure 6 : Cartographie des réserves, ressources et productions d'ETR dans le monde (selon les données de l'USGS), ainsi que la répartition de la production d'ETR raffinés (selon les données de l'IEA).

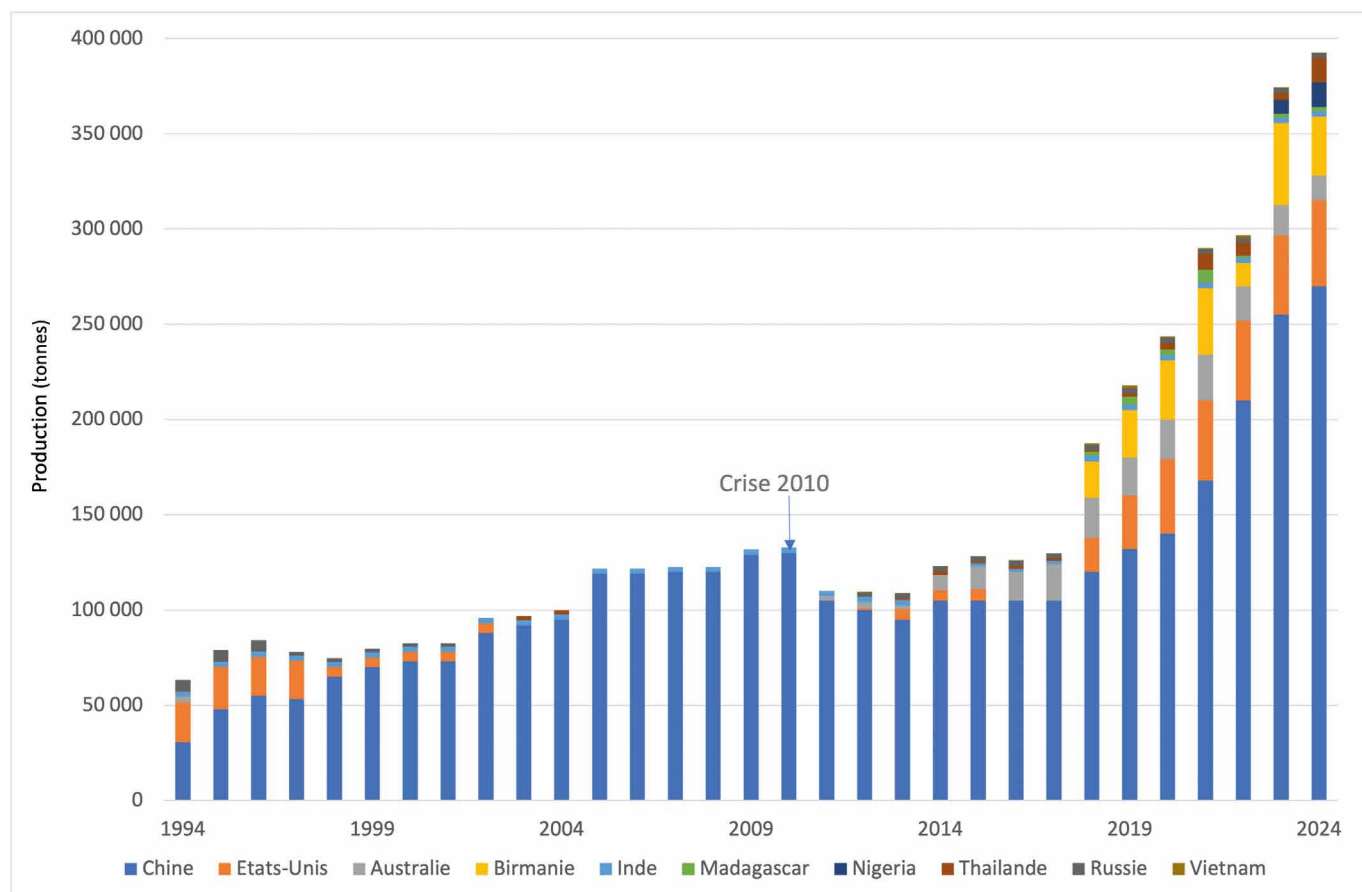


Figure 7 : Évolution de la production mondiale en ETR entre 1994 et 2024 (USGS).

1,90 t d'eau et le broyage de près de 50 t de minéral (Yin et al., 2021). Cependant, ces impacts varient significativement en fonction du type de gisement, de la minéralogie, de la teneur en minéral, des techniques de traitement et des co-produits (Peiro et Mendez, 2013). 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 bastnaésite. 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.

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. C'est notamment le cas en Chine, où les concentrations en métaux toxiques dans les sols des régions d'extraction dépassent le fond géochimique. L'exploitation minière génère également une forte pollution de l'air et des eaux de surface, avec des niveaux d'ETR parfois 200 fois supérieurs à la normale (Yin et al., 2021). Ces impacts sont amplifiés par la présence de déchets miniers qui, exposés aux intempéries, sont susceptibles eux-mêmes de polluer l'air, le sol, les eaux de surface

et les eaux souterraines, aggravant ainsi la dégradation de l'environnement et les risques pour la santé humaine. Les ETR s'accumulent surtout dans les niveaux les plus bas des chaînes trophiques et particulièrement dans les plantes, augmentant l'exposition humaine par le biais de l'alimentation (Sager et Wiche, 2024). Les ETR légères sont généralement plus mobiles et plus absorbées que les lourdes. La toxicité des ETR varie selon l'élément et les conditions, avec des effets observés tels que stress oxydatif, neurotoxicité ou malformations. Les effets sur les organismes aquatiques sont encore mal connus, notamment en milieu marin. Des essais montrent des variations importantes de toxicité selon les espèces testées et les protocoles. Au-delà des sites d'extraction, les ETR provenant de sources anthropiques (issus des divers usages) peuvent être particulièrement préoccupants pour l'environnement quand ils sont émis sous forme mobile et plus disponible pour les organismes, y compris pour l'homme (Balaram, 2019).

En ce qui concerne les **impacts sanitaires**, la toxicité des ETR est souvent sous-estimée malgré leurs effets potentiellement graves sur la santé humaine, notamment chez les travailleurs exposés dans les secteurs miniers, du raffinage et du recyclage. Les ETR peuvent s'accumuler dans l'organisme et provoquer des dommages cellulaires, du stress oxydatif et divers troubles pulmonaires et rénaux. Cependant, les données épidémiologiques directes restent limitées, à l'exception de certains usages médicaux (Balaram 2019).

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* ».** 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.

Le marché des ETR

Le marché des ETR est modeste (environ 7 milliards \$/an), bien plus petit que celui des métaux de base, en raison de volumes de production bien plus faibles (390 000 t/an en 2024 contre plus de 2,5 milliards t pour le fer).

Les ETR légers (lanthane, cérium, néodyme) sont les plus abondants et représentent environ 90 % de la production. À l'inverse, les ETR lourds comme le lutécium sont plus rares et chers. **Le prix des ETR varie selon l'abondance naturelle dans les gisements et selon leurs usages.** Par exemple, le lanthane et le cérium coûtaient environ 1000 \$/t en mars 2025, alors que le lutécium coûtait 700 000 \$/t. Le néodyme, prisé pour les aimants et dont la concentration dans les gisements est du même ordre de grandeur que le lanthane et le cérium, atteint des prix 60 fois supérieurs (environ 63 000 \$/t).

Entre 2015 et 2024, le marché apparaît assez stable pour la majorité des ETR (selon l'USGS). Un cas particulier concerne l'euporium. Sa valeur a chuté de manière très significative, pour passer de 344 à 27 \$/kg. Cela s'explique par la chute de la production des lampes à phosphores, principale application de cet ETR, remplacées par la technologie LED. 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 sur cette période. Inversement, les prix du néodyme, du dysprosium et du terbium (utilisés dans la fabrication des aimants permanents) croissent régulièrement mais faiblement, avec un pic en 2021/2022, où ceux-ci ont été multipliés par 2-3 par rapport à 2015.

Si les ETR sont devenus des ressources clés pour accompagner la transition énergétique et numérique, leur extraction, leur traitement et leur raffinage soulèvent en parallèle de lourds enjeux environnementaux et sanitaires.

I.4 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.**

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 s'intéressant 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 des 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 d'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 1000 % (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 et Hughes, 2021).

Néanmoins, la littérature nuance 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.** Les États producteurs d'ETR ont tous cherché à agir sur la restructuration des marchés mondiaux en renforçant les chaînes de valeur dont ils ont la maîtrise totale ou partielle (Hatakeyama, 2015).

La structuration du marché mondial des terres rares des années 1950 aux années 1980

La Chine n'a pas toujours dominé la production mondiale de terres rares. **Des années 1950 aux années 1980, une pluralité de producteurs coexistait.** Dans les années 1950, le principal producteur d'ETR à l'échelle mondiale était les États-Unis (Medeiros et Trebat, 2017). L'exploitation minière et la production étaient concentrées à Mountain Pass dans le désert de Mojave en Californie. 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, 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 d'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 situe 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 l'exploitation 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 ses 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 (Klinger, 2018a).

La structuration du marché des terres rares des années 1980 aux années 2010

À partir des années 1980, des transformations politiques aux États-Unis et en Chine ont engendré une dynamique qui a refaçoné 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 (Kiggins, 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).

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, il y a d'abord eu l'émergence progressive d'un consensus gouvernemental autour de l'idée selon laquelle un marché international était susceptible de fournir les métaux et ETR dont les États-Unis pouvaient avoir besoin sans nécessiter de soutenir une filière avec des politiques publiques dédiées. 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 (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 1,3 million de litres d'eau usée le long d'un tronçon de tuyauterie près du parc national de Mojave (Klinger, 2018a). Les autorités fédérales ont estimé qu'environ 2,3 millions de litres 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 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 leurs conséquences 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 de l'activité de Mountain Pass puis à sa fermeture, les entreprises américaines clés en matière de **fabrique d'aimants permanents à base d'ETR ont également délocalisé leurs activités en Chine** (Barteková et Kemp, 2016). Il en est ainsi de l'entreprise Magnequench dont les dirigeants délocalisent l'entreprise en 1998 suite à un rachat par ses deux principaux clients de l'époque qui étaient San Huan New Materials et 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. Le Comité de contrôle américain ne s'est finalement pas opposé à cette délocalisation (Barteková & Kemp, 2016).

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 **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 : 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 (1986 et 1993), ce nouveau texte 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. Pour mettre en œuvre cette politique, le gouvernement chinois a acté la suppression du remboursement d'une variété de taxes à l'exportation d'ETR. L'objectif était de décourager les exportations et d'augmenter les importations de matières premières, tout en développant les capacités nationales de traitement et de fabrication de composants. Dans cette optique, le 1^{er} novembre 2006, le ministère du Commerce a annoncé qu'une **taxe à l'exportation de 10 % sur les ETR entrerait en vigueur le 1^{er} juin 2007** (Klinger, 2018b).

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, ou à encourager des entreprises chinoises à le faire, pour limiter les conséquences de leur production sur le territoire national. 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 et 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 et Morris, 2014).

Les réponses des États et entreprises non chinoises à la crise des terres rares

Une plainte à l'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). Le pays a ainsi affiché l'objectif de restructurer et de protéger son industrie en imposant notamment aux États importateurs, de manière générale, des quotas d'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, notamment en réservant ces ressources stratégiques aux 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 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 mondial⁷. Elles **violeraient 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'exportation 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 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 (Wang, 2018 ; Gavin, 2015).

⁷ OMC, affaires DS431, DS432, DS433 : Chine — Mesures relatives à l'exportation de terres rares, de tungstène et de molybdène.

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 « guerre 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 » (Critical Raw Materials), analysé infra).

Le renouveau de l'interventionnisme étatique états-unien

Les États-Unis sont un pays clé dans l'organisation de la production d'ETR (lorsqu'ils organisent 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 ETR ont été examinés au Congrès américain entre 2010 et 2014 (Klinger, 2018a). 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** » (US Department of Energy (2011) Critical Materials Strategy).

Cette stratégie repose sur trois piliers principaux :

- 1 • La **diversification** des chaînes d'approvisionnement mondiales en ETR 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 et de l'utilisation plus efficace** des matériaux critiques.

L'importance de la recherche et développement a été renforcée, 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) (US Department of Energy (2011) Critical Materials Strategy). Le département américain de la Défense a également autorisé la **Defense Logistics Agency à constituer des stocks d'ETR lourds** (Barteková et Kemp, 2016). Un sous-comité sur les chaînes d'approvisionnement en métaux 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.

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 et 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. Cette même année, 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 exportés 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 autre 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.

Les interventionnismes européens s'arriment 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 des « politiques de criticité ». Celles-ci reposent sur des études de criticité, qui ne concernent pas exclusivement les ETR. 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 fait l'objet de théorisations et de recherches tout au long du XX^e siècle, dans l'ensemble des pays développés, et particulièrement aux États-Unis en période de guerres (De Young et al., 2017).

Des études de criticité ont été réalisées par des géologues pour le compte de la Commission européenne en 2011, 2014, 2017 et 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 Critical Raw Materials Act. La Commission justifie sa politique en mobilisant une matrice de criticité parue en 2023 (figure 8). Cette matrice repose sur les prix des marchés des matières premières 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 matrice a permis aux experts de la Commission d'identifier 34 substances critiques selon des seuils établis par des experts. En France, des études de criticité ont également été réalisées régulièrement par le Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM) depuis la crise des terres rares. Dorénavant, ces études sont menées par l'Observatoire Français des Ressources Minérales pour les Filières Industrielles (OFREMI) créé fin 2022 au sein du BRGM et regroupant 5 autres établissements partenaires (CEA, ADEME, IFRI, IFPEN, CNAM).

Les matériaux critiques: définition

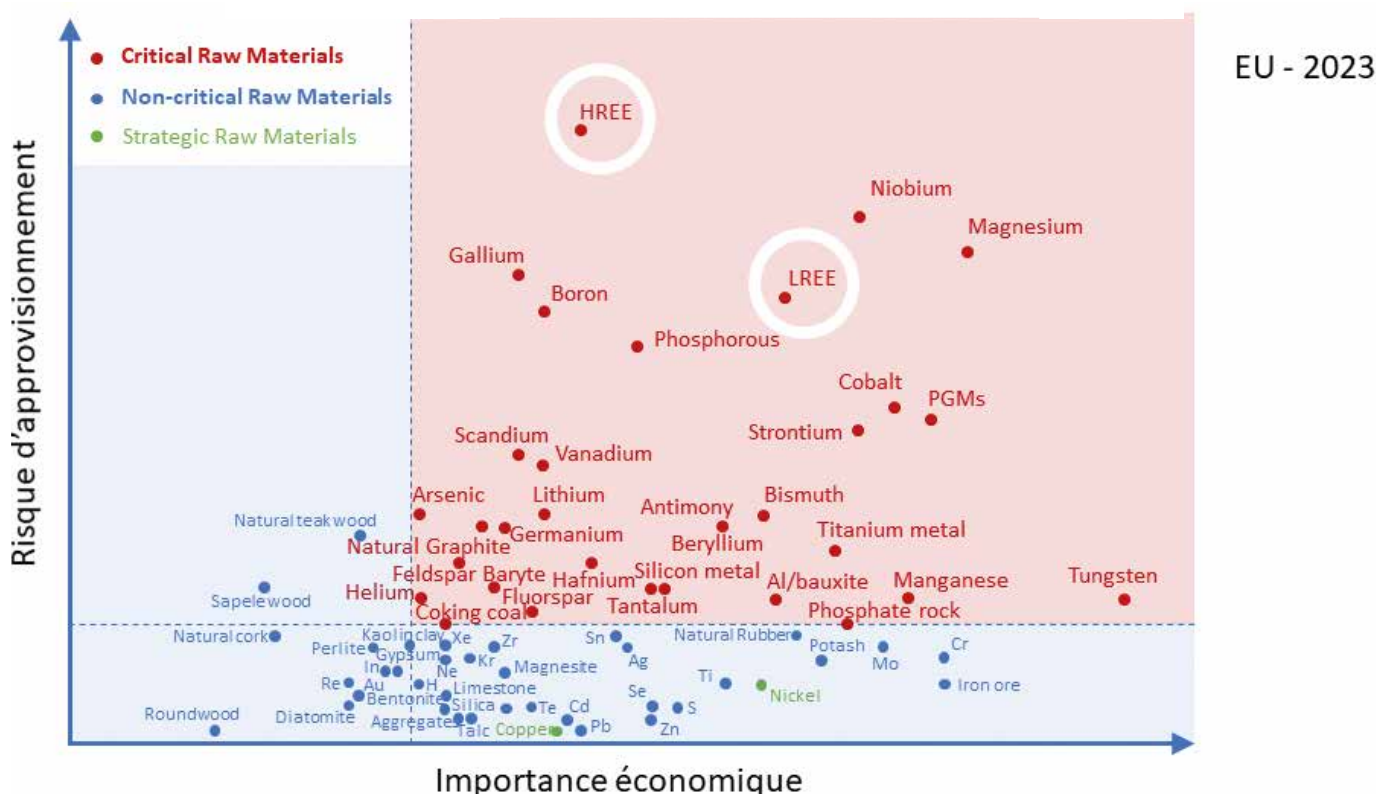


Figure 8 : Évaluation de la criticité de différents éléments. HREE et LREE se réfèrent aux ETR lourds et légers respectivement (Heavy/Light Rare Earth Elements). Source : Schéma adapté du CRMA européen (Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 — Final).

I.5 Objectifs et plan

Les besoins en ETR sont à l'heure actuelle présentés comme essentiels aux domaines de la transition énergétique, du militaire et du numérique. Ces besoins en ressources ne peuvent être assurés uniquement par une relance de l'extraction sur le territoire national, leur origine restant majoritairement chinoise, ce qui pose des questions de souveraineté pour les États. Ainsi, des usages plus responsables, qui réduisent notre dépendance à des approvisionnements étrangers, peuvent contribuer à répondre à ces enjeux. La littérature scientifique identifie trois leviers en ce sens (figure 9) :

1 • réduire la consommation d'ETR (chapitre II) ;

2 • les recycler (chapitre III) ;

3 • les extraire autrement, dans des conditions sociales, politiques et environnementales démocratiquement plus acceptables — tout au long de la chaîne de valeur (chapitre IV).

L'ambition de ce document de synthèse est de fournir l'accès à un vaste corpus de publications scientifiques issues de disciplines variées, constitué sur la base d'un protocole rigoureux élaboré chapitre par chapitre et détaillé dans l'annexe du rapport de l'ESCo. Il permet ainsi de fournir des éléments scientifiques solides au débat et à la décision publics, en pointant les incertitudes qui subsistent en lien avec ces trois leviers.

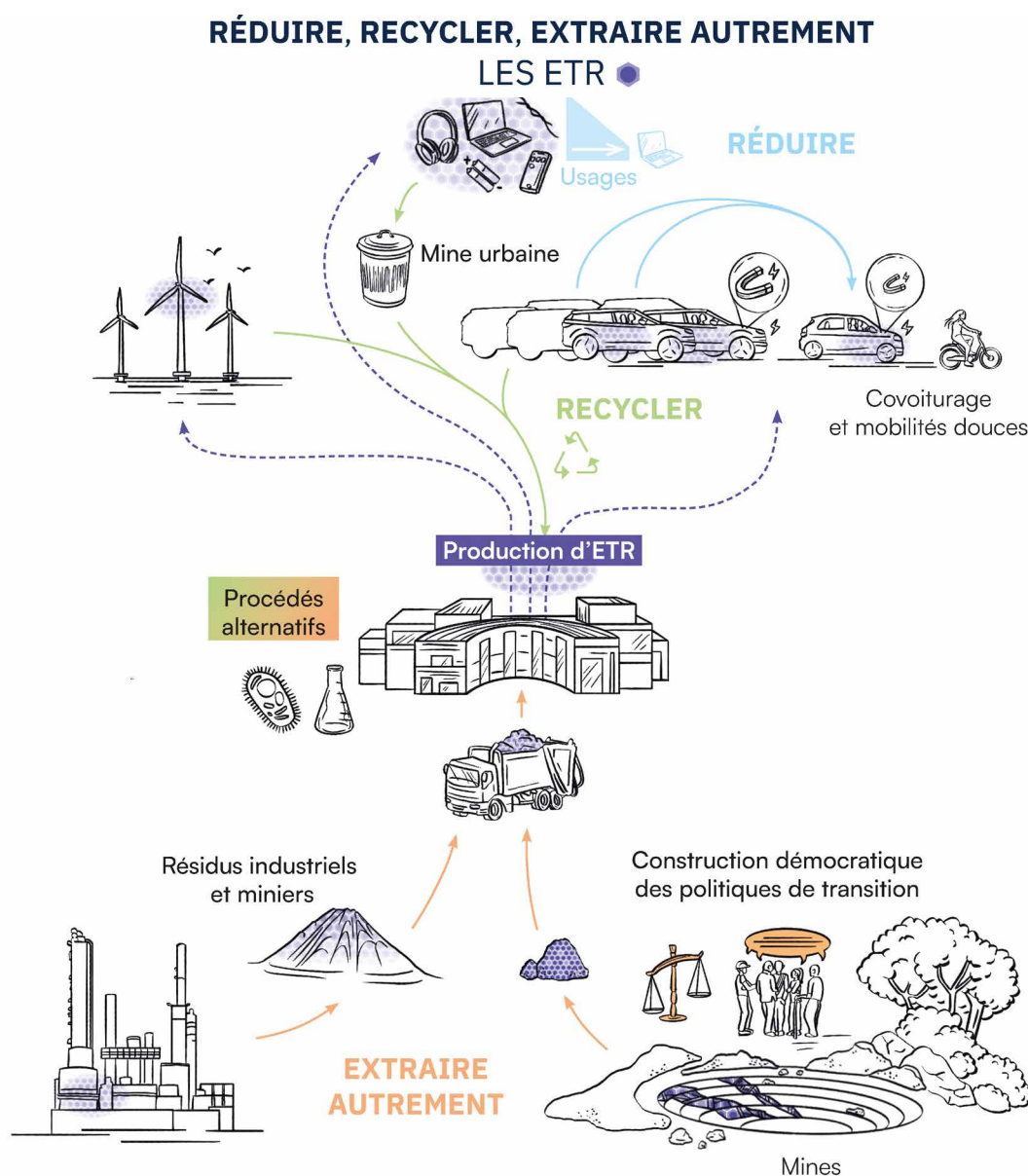


Figure 9 : Les 3 axes de l'expertise Terres rares : 1. Réduire, 2. Recycler et 3. Extraire autrement les ETR. 1. L'écoconception et la sobriété des usages (ici les voitures et les déchets électriques et électroniques ont été sélectionnés pour représenter les usages) 2. La circularité permise par le recyclage (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, environnementale et épistémique.

II. Réduire

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

Synthèse de l'expertise scientifique collective

II. Réduire

Les leviers de réduction de la consommation d'ETR sont multiples. Ils incluent la **substitution** des ETR par d'autres éléments moins critiques, **l'amélioration de l'efficacité des dispositifs qui les utilisent**, ainsi qu'une **diminution de la quantité des produits consommateurs d'ETR**. Cette sobriété en ETR peut s'inscrire dans le cadre de l'économie circulaire — grâce notamment à l'écoconception et à l'allongement de la durée de vie des produits — ainsi que de l'économie de la fonctionnalité — en privilégiant l'usage plutôt que la possession grâce à la mutualisation des équipements. Ces deux approches permettent de réduire la demande en matières premières tout en maintenant le service attendu. Enfin, la sobriété vise à réduire les usages eux-mêmes et questionne leur pertinence. Certaines de ces approches ne sont pas spécifiques aux ETR et permettent des bénéfices environnementaux plus larges que la sécurisation des ressources (consommation énergétique et utilisation d'autres ressources).

La littérature académique est lacunaire à propos de certains usages. La réduction des usages très consommateurs d'ETR dans certains matériaux (polissage, catalyse...) ne fait que très peu l'objet de publications académiques : elle semble surtout relever du secret industriel et/ou de la propriété intellectuelle. L'analyse de la littérature fait état d'une forte proportion d'études incrémentales ou itératives présentant peu de ruptures conceptuelles. Pour une vision systémique, il apparaît un besoin d'intégrer des hypothèses de sobriété et substituabilité dès les approches faisant appel aux sciences des matériaux. De son côté, la littérature en sciences humaines et sociales explicite peu la relation entre l'usage de dispositifs et le fait que ces dispositifs contiennent des ETR.

II.1 Panorama des usages et des possibilités de réduction ou de substituabilité des ETR

L'essentiel

De façon générale, les ETR peuvent faire l'objet d'une substitution dans la plupart des usages mais souvent au prix de compromis sur les performances des matériaux et dispositifs. Toutefois, dans certains cas, l'innovation technologique a permis de créer des dispositifs performants avec moins ou sans ETR, tels que :

- Des moteurs de véhicules électriques optimisés visant à réduire la quantité d'aimants permanents aux ETR tout en maintenant des performances équivalentes
- Le développement de la technologie LED en remplacement des lampes à phosphores, permettant de réduire significativement la quantité de poudre phosphorescente riche en ETR nécessaire par dispositif d'éclairage, à performance équivalente.
- Le développement des batteries Li-ion sans ETR en remplacement des batteries NiMH, permettant de s'affranchir totalement des ETR, mais en déplaçant la dépendance vers d'autres métaux critiques (lithium, cobalt, manganèse).

Cependant, l'innovation technologique demeure aujourd'hui davantage orientée vers l'amélioration des performances que vers une réelle démarche de sobriété en ETR.

Les usages des ETR, tels qu'ils ont été brièvement introduits dans le chapitre 1, sont si nombreux et variés qu'il est difficile d'être exhaustif ; le panorama présenté dans ce chapitre 2 (et plus largement décliné dans la partie II.2 du

rapport) se concentre sur ceux qui représentent une fraction significative de l'utilisation des ETR (ex. : aimants permanents) et/ou ceux représentant un effort de recherche académique se traduisant par de nombreuses publications

scientifiques (ex. : agents de contraste). Une majorité de publications fait état de résultats qui n'ouvrent pas nécessairement à une perspective de montée en TRL (*Technology Readiness Level*)⁸ ou d'applications de marché. Les études ayant atteint ou pouvant atteindre un niveau de TRL proche de l'usage sont prioritairement reportées ici.

Les matériaux à fortes teneurs en ETR

Aimants permanents

De l'écouteur intra-auriculaire à l'éolienne en mer, du joint de réfrigérateur au drone, les aimants sont impliqués dans de très nombreuses applications pour assurer les fonctions les plus diverses.

L'utilisation des aimants permanents est surtout documentée pour les secteurs des **véhicules électriques** (1 à 2 kg d'aimants dans le moteur d'une voiture) et des **éoliennes** (plus d'une tonne d'aimants dans une éolienne). Si la proportion en masse des aimants produits pour ces deux applications est aujourd'hui modeste, les études de prospective suggèrent qu'elle est appelée à croître significativement dans les décennies futures (IEA, 2024).

Les autres usages sont soit moins exigeants du point de vue des performances⁹, soit liés à des produits pour lesquels le prix de l'aimant est négligeable. La grande majorité des aimants ETR est dispersée sous forme de petits aimants, parfois de seulement quelques dizaines de milligrammes, cachés dans un dispositif et qui deviendront des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) : les haut-parleurs et les auto-focus de téléphones portables, les écouteurs, les stylets et les connecteurs de recharge des tablettes, etc.

Les aimants se divisent en deux familles principales, ceux de type ferrites et ceux à base d'ETR qui représentent respectivement 50 et 40 % du marché. Ces derniers affichent des performances inégalées en termes de capacité à produire un flux magnétique permanent. Leur usage apparaît parfois indispensable (moteurs de drone quadricoptère, haut-parleurs de téléphone...), parfois utile pour minimiser la masse des machines électriques (éoliennes, véhicules électriques, micro-mobilités...), parfois futile (aimant de tableau, fermeture de sac à main...). Les trois quarts des aimants à base d'ETR sont composés d'environ 30 % de néodyme : les aimants NdFeB. Ils occupent la grande majorité de la littérature scientifique sur les aimants car le potentiel applicatif est très fort et la technologie associée évolue significativement.

Les aimants NdFeB du commerce se déclinent actuellement en 72 catégories d'énergie et de température.

ZOOM : La voiture électrique : sa dépendance aux ETR

Dans une voiture électrique, la batterie alimente des bobines via un convertisseur électronique. Ces bobines produisent un champ magnétique tournant qui entraîne la rotation de la pièce mobile du moteur (le rotor) où sont généralement fixés les aimants, générant ainsi l'effort mécanique nécessaire pour actionner la transmission et faire tourner les roues de la voiture. Les aimants ne sont pas indispensables au fonctionnement, il est possible de produire le champ magnétique avec des bobinages en cuivre, mais ceux-ci vont consommer davantage d'énergie pour fonctionner, en sollicitant la batterie. Les aimants à base d'ETR sont également substituables par des aimants sans ETR, mais à performances égales, la masse d'aimants nécessaire sera nettement plus importante. Quelle que soit la solution, celle à base d'ETR conduira toujours à une masse totale du moteur plus faible. En plus de son moteur de traction, la voiture électrique peut contenir plus de trente composants à base d'aimants NdFeB pour les différents actionneurs et capteurs.

Pour les basses énergies ou les utilisations à température ambiante, la voie du panachage peut être envisagée. Elle consiste à **remplacer une partie du néodyme par des ETR moins critiques** (praseodyme principalement et plus récemment du cérium). Néanmoins, le taux de substitution doit rester faible pour ne pas dégrader les propriétés, à moins que l'on admette un sacrifice des performances au bénéfice du prix. Pour les hautes températures, le néodyme est substitué par des ETR lourds (dysprosium et éventuellement terbium). Compte tenu de sa criticité, les recherches actuelles sont focalisées sur la réduction du dysprosium. La voie de réduction la plus directe identifiée par la littérature scientifique s'opère au niveau de la **structure du matériau**. Elle consiste à infiltrer le dysprosium dans les joints des grains constituant l'aimant plutôt qu'à l'intérieur des grains au moment de sa constitution. Cela permet d'en réduire la proportion d'un facteur 2 environ, à performance constante (Wu et al., 2023).

Ces deux principales stratégies peuvent être combinées et sont d'ores et déjà pratiquées à l'échelle industrielle.

Pour des utilisations à température ambiante, à l'échelle des constituants, de très nombreux articles traitent de la recherche de **constituants intrinsèquement moins riches en ETR** (par ex., au lieu d'un rapport d'un atome d'ETR pour

⁸ L'échelle TRL est un outil pour mesurer le degré de maturité d'une technologie en cartographiant les jalons critiques du développement d'un produit, de son concept initial à son déploiement industriel. Une rupture technologique apparaît généralement à la découverte de nouveaux constituants, induisant de nouveaux matériaux puis des 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.

⁹ Certains aimants ne sont pas utilisés dans des conditions de haute de température, et donc, n'ont pas besoin d'être composé d'ETR lourds tels que le dysprosium pour conserver leurs performances.

7 atomes de métaux non critiques (par ex. $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), on a un rapport de 1 pour 12 (par ex. NdFe_{12}N). La stabilité structurale de ces composés reste cependant un obstacle important à leur développement. La recherche de nouveaux aimants sans ETR a également généré une littérature importante, mais la grande majorité des travaux relève de simulations. Bien que des composés intéressants aient été pointés par le calcul, aucun composé aux propriétés équivalentes ne semble encore avoir été élaboré. Sur le volet expérimental, les alliages de manganèse (sans ETR) restent les principaux composés étudiés, mais on ne note pas de réels progrès depuis des décennies en termes de performances, qui sont inférieures ou égales à celles des ferrites. Une autre piste, celle du « nitrure de fer $\alpha''\text{Fe}_{16}\text{N}_2$ », présente un meilleur potentiel d'évolution avec quelques avancées observées depuis 10 ans. S'il n'est pas envisageable que cet alliage puisse se substituer au NdFeB , il pourrait, dans un avenir proche, concurrencer une famille d'aimants sans ETR mais contenant du cobalt : les AlNiCo . Néanmoins, les revendications de performances des entreprises qui produisent ces aimants à base de nitrure de fer sont sujettes à caution. Finalement, les « ferrites hexagonales » (composées d'oxydes de fer et de strontium selon une structure hexagonale) restent les seuls aimants sans ETR utilisables si l'on exclut les AlNiCo en raison de la criticité du cobalt. Cependant, leurs performances nettement inférieures à celles des NdFeB (8 fois moins en termes d'énergie) impliquent une baisse de puissance massique qui n'est pas acceptable dans toutes les applications en raison des contraintes techniques, économiques ou marketing. Les ferrites hexagonales présentent un potentiel d'évolution très faible.

À l'échelle des machines électriques, la voie la plus fréquente consiste à travailler sur la **disposition des aimants et de barrières de flux magnétique**. De nombreuses variantes existent, mais toutes concourent à mieux diriger le flux produit par les aimants pour obtenir la même induction avec moins d'aimants et donc moins d'ETR. Un autre principe permet d'éliminer les aimants en exploitant le « couple réluctant » (un effet qui joue avec le chemin du flux magnétique), mais cette solution seule ne permet pas d'obtenir les performances voulues. La combinaison de ces deux principes est depuis plusieurs années privilégiée par les constructeurs automobiles.

Le recours à la **combinaison d'aimants** est aussi envisagé en remplaçant une partie des NdFeB par des ferrites (Y. Chen et al., 2020; Zhu et al., 2019). Une solution plus innovante revient fréquemment dans la littérature, en particulier pour les générateurs et pour la traction. Il s'agit de machines dans lesquelles les aimants sont cette fois disposés dans la partie fixe du moteur, ce qui permet de mieux refroidir ces derniers et donc d'avoir moins besoin d'ETR lourds (Raminosoa et al., 2015). Encore **loin de l'application industrielle**, ces machines sont néanmoins très prometteuses. Les études actuelles tendent à prouver que ce concept permettrait d'atteindre des **puissances proches** de celles des machines à base de NdFeB utilisées dans l'automobile aujourd'hui uniquement avec des ferrites (Tahanian et al., 2020; Mohammadi et al., 2023).

Cela impliquerait un surpoids de 5 kg environ, mais sans réelle conséquence sur un véhicule de type SUV de 2t embarquant une batterie de 500 kg. Le recours aux machines sans aimants, s'il est majoritaire dans la production d'énergie (centrales thermiques, éolien terrestre...) et le ferroviaire, reste pour le moment réservé aux entrées de gamme dans l'automobile, mais en réalité, il n'existe aucun obstacle technologique à éliminer les aimants à base d'ETR pour la traction automobile.

Poudre de polissage

Les poudres de polissage principalement à base de cérium et lanthane sont utilisées pour le polissage de matériaux durs et transparents nécessitant un grand poli de surface tels que les verres optiques (lentilles, écrans plats, smartphones, etc.) ou les semi-conducteurs. Bien que les poudres de polissage représentent une part significative de l'usage des ETR (14 % en masse de l'ensemble des ETR consommés en 2020 dans le monde soit 23 kt), aucun article académique concernant la réduction ou la substitution des ETR n'a été recensé. Les faibles coûts et criticité des deux ETR impliqués, cérium et lanthane, expliquent certainement le peu d'engouement pour identifier des alternatives à leur utilisation. Le polissage étant toutefois une étape clé de certains secteurs industriels, il n'est pas exclu que des développements récents soient couverts par le secret industriel ou la propriété intellectuelle.

Électrodes

Les ETR sont présents dans les anodes des batteries NiMH utilisées dans les voitures hybrides (5 % en masse des usages d'ETR en 2020 soit 8 kt), mais pas dans les batteries Li-ion qui représentent la plus grande partie de la croissance de l'usage. Si le remplacement des batteries NiMH par des batteries Li-ion permet une diminution de la consommation d'ETR pour cet usage, la durabilité d'un tel changement de technologie est questionnable au regard de la criticité du lithium ou du cobalt et des impacts environnementaux liés à leur extraction/purification.

Matériaux luminescents (Phosphores)

Les ETR sont utilisés dans plusieurs types d'applications photoniques, dont les dispositifs d'éclairage LED de lumière blanche, les « W-LED ». Cet usage représentait 2 % des usages en 2020 soit 3,6 kt mais avec une dynamique en forte baisse (voir figure 4) liée au remplacement des lampes phosphores par des dispositifs LED. En effet, les quantités d'ETR nécessaires dans une LED sont d'un à deux ordres de grandeur inférieurs à celles requises pour produire une quantité équivalente de lumière avec des lampes phosphores (Ku, et al., 2015). Les systèmes les plus répandus sont des dispositifs où le rayonnement bleu

d'une puce est converti in fine par un matériau luminescent à base de cérium en une lumière blanche. Une très grande variété de composés alternatifs aux matériaux luminescents à base d'ETR pour l'application W-LED est proposée par la communauté scientifique. Néanmoins, les études restent globalement à un stade de développement précoce et peu de dispositifs crédibles ressortent de la littérature, notamment à cause de la dégradation des propriétés lumineuses ou de l'instabilité thermique en condition d'usage. Cependant, l'utilisation de matériaux luminescents à base d'ETR de taille nanométrique dans les dispositifs existants semble pouvoir être une approche efficace pour maximiser les performances des W-LED (Cesaria et Baldassare Di Bartolo, 2019; Cesaria et al., 2018). De plus, les approches par « Quantum Dots » (des nanocristaux semi-conducteurs sans ETR qui permettent un contrôle du spectre lumineux à l'échelle nanométrique) semblent progresser très vite (par ex. Chen et al., 2020). À l'inverse, certaines LED organiques, les « OLED » (utilisées notamment dans les écrans de smartphones ou de téléviseurs), qui initialement ne contenaient pas d'ETR, commencent à en être pourvues pour améliorer la qualité de couleur des écrans et leur durée de vie (Utochnikova, 2021).

Les matériaux à faibles teneurs en ETR

Dans la plupart des matériaux à faibles teneurs en ETR, les ETR sont utilisés à l'état de traces (on parle de « dopage ») et jusqu'à quelques pour cent en masse et améliorent considérablement l'usage visé, voire lui sont indispensables.

Verres

Bien qu'utilisés à l'**état de traces**, la proportion de la consommation d'ETR dans les verres représentait 6 % de la consommation d'ETR totale en 2020 soit 10,7 kt. Il apparaît clairement que l'ajout d'ETR est efficace pour protéger les verres (ou leur assurer une fonction de protection) des altérations causées par les radiations. Cependant, le nombre de publications scientifiques est faible par rapport aux usages connus ; les alternatives aux ETR n'y sont pas envisagées. Mais la principale application des ETR dans les verres concerne la télécommunication. Pour étendre l'émission d'un signal sur des longues distances (>50km), les fibres optiques de la télécommunication utilisent des amplificateurs dopés aux ETR. La littérature montre que les dispositifs les plus efficaces sont basés sur les amplificateurs à fibre dopée à l'erbium (EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifiers) et les amplificateurs à guide d'onde dopés à l'erbium (EDWA, Erbium-Doped Waveguide Amplifier). Ils ne demandent qu'une **faible quantité d'erbium, et aucune alternative raisonnable** n'a été trouvée dans l'ensemble des publications scientifiques examinées. L'évolution de l'usage semble faible, avec une prévalence pour les EDWA car ils sont plus compacts et intégrables. L'impact et l'applicabilité des dispositifs alternatifs sans ETR SOA (Semi-conductor Optical Amplifiers, basés sur des semi-conducteurs de type GaAs/AlGaAs, InP/InGaAs, etc...) et Raman sont difficiles à évaluer sur la base des publications scientifiques.

Matériaux actifs pour lasers

Malgré une abondance de l'usage de lasers contenant des ETR dans différents domaines (par ex. fabrication de matériaux, fusion nucléaire), les seules analyses comparatives se concentrent dans le domaine de la santé. Deux applications particulières présentent une substitution d'un ETR à un autre : la lithotripsie (le traitement des calculs rénaux) et l'adénomectomie prostatique (ablation de la prostate dans le cas d'hypertrophie bénigne). Les lasers dopés à l'holmium (YAG:Ho) y sont progressivement remplacés par des lasers dopés au thulium (YAG:Tm). Le thulium est un ETR qui n'est pas moins critique ou moins cher, mais ces lasers diminuent les durées et les complications post-opératoires pour le patient (Petov et al., 2022), ainsi que le coût et la périodicité de maintenance de l'équipement (Wilson et al., 2016).

Agents de contraste pour l'imagerie médicale

Lors d'une IRM, des agents de contraste peuvent être injectés aux patients afin d'améliorer la qualité de l'image et faciliter ainsi le diagnostic. L'usage des agents de contraste dopés au gadolinium (GBCA) est extrêmement répandu et repose sur une base clinique solide. La quantité de gadolinium consommée annuellement pour ces agents de contraste est marginale par rapport à la quantité totale d'ETR consommée à l'échelle mondiale. Cependant, la recherche de composés alternatifs avec moins ou sans ETR fait l'objet d'un nombre significatif de publications (une centaine de publications analysées pour cette expertise). En France, l'augmentation de la demande en GBCA suit directement l'augmentation du nombre d'IRM (Chazot et al., 2020). Les recherches actuelles sur les GBCA se concentrent principalement sur la réduction de leur usage chez les patients atteints d'insuffisances rénales. Plusieurs voies sont explorées : diminuer la dose de GBCA en développant des agents plus efficaces, comme le Gadopichlenol qui permettrait d'injecter deux fois moins de produit ; ou remplacer les GBCA par des agents alternatifs à base de manganèse ou surtout de fer (Ferumoxytol) (par ex. Gupta et al., 2020). Aussi, la recherche est importante sur des agents de contraste d'un autre type, les CEST (Chemical Exchange Saturation Transfer), actuellement à base d'ETR, mais pour lesquels certains métaux de transition ont récemment été proposés comme alternative aux ETR (Morrow et al., 2017). Néanmoins, ces approches restent à un niveau de TRL encore modéré. L'alternative aux GBCA la plus aboutie réside dans la modification des séquences de paramétrage de l'IRM, ainsi que dans l'utilisation de l'intelligence artificielle permettant par exemple pour certaines applications, une analyse d'image en 1 seconde au lieu de 15 minutes (Zhang et al., 2021). Dans l'ensemble, les articles portant sur des essais cliniques sont sous-représentés par rapport aux études fondamentales.

Alliages métalliques

L'incorporation d'ETR dans les alliages métalliques (utilisés notamment dans l'aéronautique pour leurs propriétés de résistance aux conditions extrêmes) permet d'en améliorer de nombreuses propriétés physico-chimiques, en particulier les propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion. L'ajout est souvent inférieur à 1 % en masse mais représente une part significative de la consommation d'ETR en 2020 (8 % soit 13,7 kt). Les publications fiables et pertinentes, sélectionnées parmi une très vaste littérature, comparent les alliages avec ou sans ETR. Elles convergent vers une haute efficacité de l'ajout d'ETR. Si aucun des articles analysés ne démontre que ce dopage s'accompagne d'effet négatif indésirable avec de faibles quantités de lanthane, de cérium ou d'yttrium, l'ajout des autres ETR en revanche est moins concluant.

Catalyseurs

Les ETR sont utilisés comme catalyseurs pour de nombreuses réactions chimiques à l'échelle industrielle (craquage du pétrole lors de son raffinage notamment pour la production de combustibles, catalyse de gaz d'échappement, synthèse de composés organiques...). Il y a néanmoins un écart conséquent entre la part de l'usage d'ETR pour cette application (17 % des usages d'ETR consommés en 2020 soit 27,8 kt) et le nombre de publications identifiées sur le sujet (seulement 18 articles pertinents sur les 39 analysés) ; probablement pour des raisons similaires à celles du polissage (secret industriel et propriété intellectuelle). La plupart des publications analysées représentent des activités de recherche fondamentale à faible potentiel applicatif à court terme. L'utilisation des ETR présente souvent un avantage important. Dans le cas des catalyseurs pour le cracking du pétrole brut (FCC), une tendance est à la réduction de l'utilisation des ETR comme stabilisants, au profit de mélanges entre ETR et du phosphore. Au contraire, les catalyseurs au nickel utilisés pour de nombreuses réactions sont substitués par des catalyseurs avec ETR qui montrent des augmentations de rendement significatives. Toutefois, une étude montre que ce gain de rendement n'est pas souhaitable si l'on prend en compte d'autres critères de soutenabilité tels que les impacts environnementaux et sanitaires, la production de déchets ou encore le coût global du procédé (Omodara et al., 2020).

L'utilisation de matériaux contenant de faibles teneurs d'ETR ne stimule pas particulièrement les efforts de recherche en matière de substitution ou de réduction, car les volumes concernés et/ou les coûts associés sont limités, tandis que les gains fonctionnels apportés justifient leur maintien dans les dispositifs. C'est une problématique importante pour le recyclage où les boucles courtes* restent possibles, mais où les boucles longues sont complexes et coûteuses (voir chapitre III).

ZOOM : La réduction de la consommation d'ETR dans la mobilité électrique

L'objectif de réduction de la consommation d'ETR dans la mobilité électrique ne se limite pas à la phase de fabrication des aimants ou des véhicules. En fin de vie des voitures, deux stratégies peuvent également être mises en œuvre pour prolonger la durée de vie des aimants permanents, contribuant ainsi à limiter la demande en ETR :

- **Le réemploi* des moteurs de véhicules**, facilité par le fait qu'un constructeur n'aura que deux ou trois modèles de moteurs électriques (contre des dizaines de moteurs thermiques) et qu'un moteur électrique est particulièrement simple et extrêmement robuste comparé aux moteurs thermiques. Par ailleurs la durée de vie d'un moteur électrique se compte en dizaines de milliers d'heures quand celle du véhicule l'hébergeant est de moins de 3 000 heures en moyenne ;
- **Le réemploi des aimants**, mais cette solution peut être complexe à mettre en œuvre puisque l'aimant récupéré doit avoir les mêmes dimensions que celles requises par le nouvel usage ;

En dernier recours, le recyclage peut être envisagé (cf. chapitre III). À l'heure actuelle, des filières de recyclage se mettent en place et il est difficile d'imaginer quelles voies de valorisation seront privilégiées dans l'avenir (réemploi, recyclage). Cependant, compte tenu des limitations du réemploi des aimants et de celles du recyclage court (pour le moment les propriétés sont sensiblement moins bonnes), le réemploi des moteurs et le recyclage long seront probablement privilégiés pour l'automobile. Le recyclage court* pourrait être destiné à d'autres secteurs moins exigeants. Concernant les éoliennes, leur durée de fonctionnement (de l'ordre de 3 000 heures) et leur exigence en termes de performances ne laissent pour le moment envisager que le recyclage long*.

II.2 Le cadre juridique applicable aux ETR : de la sécurité de l'approvisionnement à l'économie circulaire

L'essentiel

Le droit applicable aux métaux critiques (Règlement européen sur les matières premières critiques, 2024) **se fonde prioritairement sur l'impératif de sécurité de l'approvisionnement**. Certains auteurs craignent dans ce contexte que la volonté de renforcer l'indépendance des industries européennes prenne la priorité sur les enjeux de sobriété, et cela en particulier dans l'hypothèse d'une relocalisation d'activités minières. Le Règlement insiste en effet sur l'augmentation de l'offre plutôt que sur la réduction de la demande, ce qui questionne la suffisance des mesures de durabilité pourtant bien présentes dans le texte. En outre, pour faciliter la « relocalisation » à court terme de l'extraction, il peut impliquer une altération des principes de la démocratie environnementale comme une réduction des délais de consultation du public pour les projets dits « stratégiques ».

Les **considérations de sobriété présentes dans la législation française et européenne sur l'économie circulaire**, qui proposent une hiérarchie des déchets mettant l'accent sur les leviers de sobriété, **s'articulent néanmoins, dans une certaine mesure, avec la réglementation relative aux ETR**. L'économie circulaire, largement promue par le Règlement sur les matières premières critiques, participe ainsi directement à la sécurisation de l'approvisionnement.

L'encadrement européen de la production et de l'approvisionnement en ETR sous le prisme de la sécurité

Le Règlement (UE) 2024/1252 établit un cadre visant à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques (dont les ETR). La sécurité est au cœur des dispositions de ce règlement, ce qui pourrait sembler à première vue quelque peu éloigné des considérations de sobriété, qui appelleraient plutôt à une action sur la demande qui serait nécessairement caractérisée par une réduction de l'extraction et de l'utilisation de métaux. Bien qu'il soit ancré dans un objectif d'économie circulaire, il se focalise ainsi sur l'offre plutôt que la réduction de la demande (Baldassarre, 2025). En effet, le règlement donne aux États les objectifs suivants d'ici à 2030 :

- la capacité d'**extraction** de l'UE doit couvrir 10 % de la consommation annuelle de matières premières critiques.
- la capacité de **transformation** de l'UE doit couvrir 40 % de la consommation annuelle ;
- la capacité de **recyclage** de l'UE doit permettre de traiter 25 % de la consommation annuelle et en conséquence d'augmenter le recyclage des déchets ;
- aucun **pays tiers** ne devrait représenter plus de 65 % des **importations** destinées à la consommation annuelle de l'UE.

Pour réaliser ces objectifs, le règlement définit notamment des « **projets stratégiques** » qui devraient bénéficier de conditions réglementaires favorables, de même que la production de produits utilisant des métaux critiques, d'une

manière favorisant la transparence. Ensuite, le règlement prévoit la mise en place de mesures nationales sur la **recupération des déchets d'extraction et l'amélioration de la recyclabilité des aimants permanents**. Il prévoit également la reconnaissance des systèmes de **certification de la durabilité** et la création de déclarations d'empreinte environnementale. Les promoteurs de projets sont tenus de rendre publiques toutes les informations relatives au respect des exigences du règlement. Un Comité européen des matières premières critiques est institué. Il doit donner des conseils à la Commission et assure les missions nécessaires pour le pilotage des obligations du règlement. Est aussi créé un « Club des matières premières critiques », outil de la diplomatie « minérale » européenne pour coordonner l'action des États consommateurs d'ETR, mais aussi pour négocier des accords d'approvisionnement auprès des États exportateurs (Hool et al., 2023).

Du fait du caractère récent du renouveau de la réglementation applicable aux métaux critiques en Europe, la littérature ne s'est pas encore beaucoup emparée de ce sujet, et cela encore moins sous un angle de sobriété. Une trentaine d'articles ont été mobilisés dans le cadre de cette partie, un certain nombre de travaux étant en cours de publication étant donné l'actualité de cette question au moment des recherches effectuées. Cette initiative a tout de même donné lieu à quelques analyses et quelques critiques. D'abord, ces dernières sont démocratiques : la limitation potentielle de la consultation du public — ou du débat politique — lors des projets stratégiques prioritaires pourrait aller à l'encontre de l'impératif d'acceptation sociale et de **démocratie environnementale** (voir également IV.3, infra). Ensuite, en encourageant la relocalisation des activités liées à la chaîne d'approvisionnement en métaux critiques sans anticiper les conséquences environnementales et sociales

de cette relocalisation sur le territoire européen (Bogojević, 2024 ; Koese et al., 2025) : bien que consacrant les principes de l'économie circulaire, le règlement met peu l'accent sur la réduction de l'utilisation des ressources. Enfin, certains auteurs relèvent que la réglementation relative aux métaux critiques n'organise pas encore la **gouvernance des chaînes de valeurs globales de manière suffisamment complète**, c'est-à-dire leur institutionnalisation politique (Radley, 2024). Si l'Union européenne ne met pas en place de politiques plus strictes visant à réduire l'utilisation de la consommation des ETR, alors elle continuera à dépendre de sources extérieures pour ses industries essentielles. Une partie des travaux pointe ainsi le besoin de plus de transparence et de contrôle.

Dans ce contexte, la mise en place d'un **passport numérique, « fiche d'identité numérique » d'un produit, est prônée par le Règlement européen de 2024** établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception pour des produits durables (**« Règlement écoconception »**, entré en vigueur le 18 juillet 2024) **et a pour objectif de favoriser la traçabilité, la transparence et la démocratisation des chaînes de valeur**. Il vise à rendre accessibles, sous forme numérique, les informations essentielles sur l'empreinte carbone, la composition chimique, la provenance des métaux, la réparabilité et le contenu recyclé d'un produit. Cette approche, normalisée par les normes ISO 14040 et 14044, s'est diffusée mais demeure actuellement sous-utilisée dans les politiques publiques et les réglementations existantes, ne serait-ce parce qu'elle n'a pas encore de statut juridique pleinement opératoire — elle demeure dans la plupart des cas volontaires. La **« déclaration de performance environnementale » (DPE)**, par exemple, est complémentaire en ce qu'elle présente les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'au recyclage éventuel. **La DPE n'est pas encore obligatoire mais presque systématiquement exigée par les acheteurs industriels**. Le passeport numérique permettra quant à lui d'informer les parties prenantes et les consommateurs quant à l'origine et aux conditions de fabrication des produits (Adisorn et al., 2021 ; Jansen et al., 2023). Certains produits, comme les batteries et les produits électroniques, devraient être soumis à ce passeport dès 2027, ainsi que les produits qui contiennent des matières premières critiques à partir de 2028.

Afin de pallier les faiblesses mentionnées, une partie de la littérature propose de réguler la gouvernance des ETR sous la forme traditionnelle de conventions internationales (par ex. Ali et al., 2022 ; Christmann, 2021). D'autres propositions reposent sur une amélioration des réglementations transnationales — mêlant règles nationales ou européennes et règles d'entreprises en cours d'élaboration : adhésion de la France à l'Initiative pour la transparence des

industries extractives (ITIE — voir chapitre IV), construction d'un grand marché européen et chinois par une harmonisation des règles européennes et chinoises portant sur les chaînes de valeur pour exclure les entreprises, telles que les américaines, n'appliquant pas ces règles environnementales et sociales de la transition (recyclage, etc.). Enfin, **la création d'une préférence européenne dans les marchés publics, dite « Buy European and Sustainable Act » (BESA), pourrait participer de la régulation des ETR comme c'est le cas aux États-Unis et en Chine**. Il s'agirait de réglementer la manière dont les autorités publiques des États membres de l'UE attribuent des contrats pour des biens, des services et des travaux en introduisant des critères supplémentaires en matière d'environnement, de carbone et de production locale. La littérature scientifique n'aborde généralement pas cette question, il faut plutôt se tourner vers la littérature grise pour accéder à des analyses et des propositions concrètes sur ce point¹⁰. Le Conseil national de l'Industrie (CNI) en France qui a repris cette proposition dans un avis du 13 juin 2025 intitulé « Faire de la préférence européenne un levier de réindustrialisation ». Néanmoins, une telle proposition se heurte, en l'état actuel du droit, aux règles internationales et européennes de non-discrimination.

L'articulation de la réglementation relative aux ETR avec les principes de l'économie circulaire

La réduction de l'usage des objets contenant des ETR s'inscrit dans une logique de circularité, qui prend en considération les différentes étapes du cycle de vie d'un produit. Afin de sortir d'une économie encore linéaire à 90 % (Bhatnagar et al., 2024) et de passer d'un droit des déchets à un droit de la circularité (Boul et Radiguet, 2021), les principes de l'économie circulaire proposent de mettre en œuvre la « méthode des 6R de la durabilité » dans un ordre hiérarchique (du plus au moins souhaitable). Réduire, Réutiliser* (ou Réemployer), Réparer, Reconstruire, Recycler et Récupérer¹¹. L'impulsion initiale de leur intégration dans le droit se situe au niveau de la mise en place d'une approche intégrée de gestion durable des déchets (Halkos et Aslanidis, 2024) en vue du recyclage de ces derniers et de leur prévention par l'écoconception.

Pour atteindre l'objectif de faire de la durabilité des produits la nouvelle norme à travers la circularité et l'efficacité matérielle, notamment pour les produits issus des ETR, **l'écoconception, encadrée par le Règlement (UE) 2024/1781 du 13 juin 2024 (ESPR) est devenue un des éléments essentiels du dispositif de responsabilité élargie du producteur (REP)*** au côté de la prévention des déchets, de leur gestion en fin de vie et de leur valorisation. L'écoconception « vise à minimiser les impacts environnementaux des produits et services dès leur conception et sur

¹⁰ Par exemple : Hughes-Marie Aulanier, Alain Grandjean, Antoine Crépel et Jori Damond, dans Buy European and Sustainable Act : accélérer la transition vers une économie européenne bas-carbone, Carbone 4, 2024. <https://www.carbone4.com/publication-buy-european-and-sustainable-act>

¹¹ À ces « 6 R » intégrés dans le droit de l'économie circulaire, 3 autres « R » sont ajoutés par la littérature (Hunger et al., 2024) : refuser, repenser, rénover, permettant de faire davantage correspondre la notion d'économie circulaire à celle de « sobriété ».

l'ensemble de leurs chaînes de valeur » (ADEME). Elle apparaît comme un vecteur essentiel de l'économie circulaire en ce qu'elle requiert des produits durables, entretenus, mis à niveau ou améliorés, réutilisés, réparés, reconditionnés et finalement recyclés (Bundgaard et al., 2024). Le droit relatif à l'écoconception, de même qu'aux différentes facettes de l'économie circulaire, s'applique aux produits et déchets contenant des ETR.

La notion de sobriété, par ailleurs, a été intégrée au Code français de l'environnement par la loi du 17 août 2015 *relative à la transition énergétique pour la croissance verte* à l'article L.110-1-1, dans le contexte de la transposition des principes de l'économie circulaire dans le droit :

« La transition vers une économie circulaire vise à atteindre une empreinte écologique neutre dans le cadre du respect des limites planétaires (...) **en appelant à une consommation sobre et responsable des ressources naturelles et des matières premières primaires** ainsi que, par ordre de priorité, à la prévention de la production de déchets, notamment par le réemploi des produits, et, suivant la hiérarchie des modes de traitement des déchets, à une réutilisation, à un recyclage ou, à défaut, à une valorisation des déchets. La promotion de l'écologie industrielle et territoriale et de la conception écologique des produits, l'utilisation de matériaux issus de ressources naturelles renouvelables gérées durablement et issus du recyclage, (...) l'allongement de la durée du cycle de vie des produits, la prévention des déchets (...) contribuent à cette nouvelle prospérité » (nous soulignons).

Cette disposition très générale, en particulier en ce qui concerne la sobriété, a vocation à servir de guide, tout en étant juridiquement contraignante et donc obligatoire et invocable devant les tribunaux. Dans le même sens, l'article 191, paragraphe 1 du Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne prévoit « l'utilisation prudente et rationnelle des ressources naturelles ». Dans le cadre général de ce « droit de la circularité »¹² en pleine cristallisation (Baudouin, 2024), **il n'existe pas de régime spécifique concernant les produits contenant des ETR**. En dehors du Règlement-cadre sur l'écoconception, à lire avec la directive-cadre sur les déchets, ce sont de nombreux textes sectoriels dispersés qui s'appliquent au cas par cas, produits par produits (batteries, etc.) sans aucune mention à l'heure actuelle de la présence d'ETR ou non dans la composition de ces produits.

Le développement d'une exigence de **réparabilité**, à travers la mise en place d'une garantie commerciale de durabilité, permet de manière générale de prolonger la durée de vie des produits et limiter le gaspillage. En parallèle, **l'analyse du cycle de vie (ACV)**, présente dans la directive déchets de 2008 (2008/98/CE), offre une approche holistique qui pourrait permettre de mieux quantifier les impacts environnementaux globaux (extraction, production, usage, fin de vie) des produits à base d'ETR. Pour répondre à ces enjeux, la Commission européenne recommande depuis 2021 de mettre en place une méthode harmonisée pour évaluer la performance environnementale

des produits tout au long de leur cycle de vie, par exemple via la DPE. Ainsi, les produits intégrant des ETR sont rarement couverts par des DPE (les données sont complexes à réunir car souvent confidentielles ou indisponibles).

ZOOM : Les principes de l'économie circulaire

L'optimisation de la consommation des ressources minérales est une question qui reparaît périodiquement dans les recherches en économie, dans les sciences de l'ingénieur et dans le débat public. Formalisé et popularisé dans les années 2010, le concept d'économie circulaire a permis de fédérer sous une expression unique un grand nombre d'actions et de conceptualisations visant l'optimisation de l'usage de l'énergie et des matières et la réduction de la quantité de déchets. En France, le schéma conceptuel de l'ADEME fait référence (avec ses trois domaines et ses sept piliers de l'économie circulaire). La littérature scientifique, quant à elle, recense ou documente plusieurs dizaines d'initiatives concrètes d'économie circulaire menées par différents acteurs : le consommateur individuel bien sûr, mais aussi des collectivités territoriales, des pouvoirs publics ou des industriels (Govindan et Hasanagic, 2018). Par exemple, Nakajima et Vanderburg (2005) listent certaines démarches d'économie circulaire que les industriels peuvent lancer et les hiérarchisent de la plus vertueuse à la moins vertueuse environnementalement (voir également infra, chapitre II.3) :

- 1 • l'économie de la fonctionnalité, c'est-à-dire la démarche qui consiste à vendre un service plutôt qu'un produit (*selling services instead of products*, "product-as-a-service")
- 2 • la consigne (*product take back*)
- 3 • l'écoconception ou écodesign (*basic design for environment*)
- 4 • la substitution de matériaux ou d'énergie (*material and energy substitution*)
- 5 • le changement dans les process de production (*process modification*)
- 6 • le recyclage des résidus de fabrication (*in-process recycling*) ou des déchets de consommation
- 7 • les symbioses industrielles (*industrial ecopark design*).

¹² Parfois analysé comme un droit « de la sobriété », les deux expressions étant souvent associées l'une à l'autre même si elles ne se recoupent pas totalement.

Comme mentionné ci-dessus, le *Critical Raw Materials Act* n'intègre pas encore systématiquement les DPE ou données d'ACV dans ses mécanismes de suivi et d'évaluation.

La montée en puissance de la demande mondiale en ETR interroge ainsi les fondements de l'économie circulaire, censée promouvoir une gestion sobre et durable des ressources. Pour certains auteurs, **la réglementation des ETR — ou des métaux critiques en général — réalise un nouveau lien entre sécurité et durabilité** (Marty et Ruel, 2025). L'extraction de métaux et ses inévitables conséquences environnementales et sociales sont désormais justifiées par les nécessités industrielles de la transition environnementale, et l'enjeu d'indépendance des industries nationales de défense ou des secteurs de l'innovation. Pour autant, ce discours renouvelle également une conception de la durabilité, justifiée par la sécurité nationale : la réduction de l'usage de matières (circularité) réduit la dépendance des économies nationales. L'économie circulaire devient alors un élément de la politique de souveraineté et de défense et le droit spécial relatif à l'approvisionnement en métaux critiques doit s'intégrer dans le cadre général du droit de l'économie circulaire qui s'étoffe progressivement (Baldassarre et Carrara, 2025). **Le renforcement de l'articulation entre ces deux cadres juridiques est désormais une priorité pour l'Union européenne**, comme en témoigne le futur projet de règlement d'exécution portant sur les matières premières critiques en vue de l'application du CRMA, qui listera les produits, composants et déchets présentant un potentiel élevé de valorisation des matières premières critiques¹³. Ici encore, l'actualité du sujet et le caractère récent de ces évolutions se traduisent par un faible nombre de publications directement liées à ces questions. Néanmoins, la littérature relative au droit applicable à l'économie circulaire dans son ensemble est fournie et la notion de sobriété est également de plus en plus abordée par les chercheurs (une centaine de publications retenues portaient sur ces aspects et sont analysées dans la partie II.3 du rapport).

ZOOM : Le cas des véhicules électriques : quand le « droit des métaux critiques » et de l'écoconception redéfinit la filière

Le cadre juridique européen issu des **règlements de 2024 sur les matériaux critiques (UE 2024/1252)** et sur **l'écoconception (UE 2024/1781)** impose ainsi de nouvelles contraintes aux producteurs de véhicules électriques. Concrètement, les constructeurs vont ainsi progressivement devoir :

- **mieux tracer et documenter** la composition de leurs véhicules grâce au passeport numérique, qui doit indiquer la présence de métaux critiques et leur empreinte environnementale.
- **concevoir des véhicules plus durables**, réparables et recyclables, en réponse aux exigences de l'écoconception : cela implique des choix techniques dès la phase de design (voir II.1).
- **s'adapter à des normes de recyclabilité**, en développant des filières capables de récupérer jusqu'à 25% des métaux critiques utilisés, conformément aux objectifs fixés par le règlement sur les matériaux critiques.
- **respecter des obligations de transparence**, notamment en publiant certaines données environnementales sur les produits et en se soumettant à des certifications, comme les certifications ISO 14040 et 14044 qui encadrent l'analyse du cycle de vie d'un produit, cela sur l'ensemble de la chaîne de valeur.
- **réduire leur dépendance aux chaînes d'approvisionnement extérieures**, ce qui peut les inciter à relocaliser certaines étapes de la production des voitures électriques ou à sécuriser des partenariats avec des fournisseurs certifiés.

¹³ Le texte est en cours de rédaction : « Commission Implementing Regulation (EU) .../... listing the products, components and waste streams considered as having a relevant critical raw materials recovery potential under Regulation (EU) 2024/1252 ».

II.3 Concevoir, consommer et posséder autrement

L'essentiel

Le changement des modes de conception, de fabrication et de consommation (action sur la demande) est central pour optimiser la consommation et sécuriser les approvisionnements.

La littérature sur l'économie circulaire ne mentionne pas spécifiquement les ETR, la plupart du temps. Néanmoins, ses principes généraux sont susceptibles d'être appliqués aux dispositifs qui en contiennent, qui font, eux, l'objet d'études. Cette littérature se concentre notamment sur l'écoconception, l'économie de la fonctionnalité et les préférences des consommateurs.

Concevoir et fabriquer autrement

La littérature sur l'écoconception est abondante mais elle ne s'intéresse que marginalement à la question de la criticité des matériaux. Plusieurs thématiques apparaissent néanmoins.

Dans le cadre de l'**écoconception**, promouvoir un développement durable des matériaux nécessite l'intégration de métriques de soutenabilité dès la conception des matériaux. Par exemple, bien que des réfrigérateurs constitués d'aimants à base d'ETR (NdFeB) permettent un impact environnemental moindre pendant la phase d'utilisation, la prise en compte des étapes d'extraction et de raffinage des ETR révèle que ces réfrigérateurs émettent 13 % de GES en plus que les réfrigérateurs conventionnels sur la totalité du cycle de vie (Monfared et al., 2014). Des ACV comparatives de fabrications d'aimants pointent ainsi une optimisation selon le choix :

- de constituants - par ex. entre 13 et 23 % de l'impact environnemental en moins en utilisant du Sr-ferrite pour la construction de moteurs plutôt que des aimants NdFeB (Nordelof et al., 2019),
- et de méthodes - par ex. 11 % d'impact environnemental en moins en utilisant des imprimantes 3D plutôt que des moules¹⁴ (Kulkarni et al., 2023).

L'instauration de normes de performances minimales permet la transformation des industries par un remplacement progressif des produits obsolètes (Siderius, 2013). Depuis 40 ans, l'Union européenne a ainsi introduit des **standards de performances minimales** à atteindre progressivement pour différentes familles de produits (les moteurs électriques ou l'éclairage, par exemple). L'éclairage et l'électroménager comptent pour environ 60 % de la consommation électrique finale des ménages en Europe : la littérature établit que ces politiques, qui s'affirment depuis 2010, ont permis des réductions substantielles (environ 15 %) de la consommation électrique pour un même service rendu (de Almeida et al., 2017; Gonzalez-Torres et al., 2023; Schleich et al., 2021).

Pourtant, le succès des innovations ne provient pas uniquement de leurs qualités techniques, mais dépend aussi de stratégies et de circonstances complexes, qui incluent une part importante de *product branding* (processus marketing basé sur la conception d'une identité unique et reconnaissable pour un produit afin de le différencier et de séduire les consommateurs). Dans leur analyse du succès de Tesla, Palmie et al. (2024) montrent que le succès de la marque provient des qualités intrinsèques du produit (qui comporte des ETR), mais aussi d'une démarche construite et réfléchie qui vise à détourner l'attention des critiques qui pourraient lui être faites au nom de l'environnement, par exemple en indiquant que le produit sera d'autant plus vertueux que l'électricité qu'il utilise sera d'origine solaire (*blame avoidance*).

Si le **cadre de l'économie circulaire** est largement convoqué pour penser l'écoconception des produits contenant des ETR, celui-ci est jugé insuffisant par plusieurs auteurs, notamment parce qu'il **ne prend pas en compte de façon satisfaisante les enjeux sociaux et le contexte local**. Des approches alternatives pourraient permettre d'évaluer qualitativement la démarche d'économie circulaire sur des enjeux environnementaux, sociaux et démocratiques (Ralph, 2021).

Posséder autrement

L'**économie de la fonctionnalité** est une approche qui met l'accent sur l'usage du produit plutôt que sur sa propriété. Il s'agit par exemple d'acheter un nombre de kilomètres à parcourir plutôt qu'un véhicule entier ou des pneus. Cette approche permet une optimisation des ressources ainsi qu'une meilleure éco-efficacité et réparabilité du produit dans la mesure où la charge de la maintenance repose sur le producteur et non sur le consommateur (Lanzilotti et al., 2022). Elle est ainsi un pilier de l'économie circulaire en tant que levier de sobriété (Sakao et al., 2023).

L'économie de la fonctionnalité est **beaucoup moins présente que les autres piliers de l'économie circulaire dans la littérature analysée sur les usages des dispositifs à ETR (notamment écoconception et recyclage)**. Les études considérées

¹⁴ La fabrication additive (Big Area Additive Manufacturing, BAAM) plutôt que le moulage par injection (Injection Molding, IM).

s'intéressent principalement aux déterminants de l'acceptabilité sociale pour les pratiques individuelles, ainsi qu'aux gains de productivité et rentabilité pour les pratiques industrielles. À l'inverse, les gains (en argent, temps...) associés à l'économie de la fonctionnalité pour les individus et les leviers d'acceptabilité et de désirabilité pour les industriels n'ont pas encore été très explorés par la recherche académique (Golinska-Dawson et al., 2025; Hidalgo-Crespo et al., 2024).

Si aucune des 16 publications scientifiques analysées sur l'économie de la fonctionnalité ne mentionne explicitement les ETR, toutes en revanche s'appuient sur des études de cas d'objets contenant des ETR ou des matériaux critiques et à ce titre facilement transposables. Certaines études analysent les raisons pour lesquelles le modèle de l'économie de la fonctionnalité a du mal à se développer. Parmi les facteurs, deux retiennent particulièrement l'attention. D'une part, **l'encadrement juridique** (voir *supra* : le droit se focalise plus sur l'écoconception, la réparabilité, le recyclage, etc., que sur les leviers de partage des usages qui nécessitent des changements comportementaux importants) et **l'accompagnement politique** de l'économie de la fonctionnalité (politiques incitatives de sobriété), qui sont sous-investis par les acteurs publics (Neramballi et al., 2024). D'autre part, **l'adhésion des consommateurs** est parfois difficile à conquérir. La plupart des études concernent le domaine de la mobilité, en particulier le partage de véhicule sous différentes formes plutôt que l'achat individuel. L'acceptabilité sociale apparaît comme un élément essentiel à prendre en compte. Selon une étude en Allemagne (Kannstätter et Meerschiff, 2015), le « signal-prix » apparaît comme peu significatif : seulement 15 % des 120 personnes interrogées ont estimé qu'un prix plus faible augmenterait leur utilisation du service de voitures électriques partagées. En revanche, d'autres études révèlent trois facteurs déterminants :

- l'âge des usagers (Julsrud et al., 2023; Thurner et al., 2022) : les plus de 45 ans sont plus fortement dépendants à la culture de la voiture individuelle,
- la conscience environnementale,
- et la perception des bénéfices sociaux et environnementaux : ces deux derniers facteurs impactent positivement l'adhésion au service par les jeunes adultes (Vatamanescu et al., 2023).

Dans l'industrie (usinage), l'économie de la fonctionnalité permet à la fois un gain de temps significatif pour le remplacement des pièces et un gain de rentabilité. Dans l'exemple de (Lanzilotti et al., 2022), l'analyse porte sur la fourniture de services d'usinage par un prestataire à l'intérieur d'un site de fabrication de pièces pour moteurs diesel au Brésil : la gestion directe d'un nouveau système de machine-outil par le prestataire permet de considérablement réduire le temps nécessaire au remplacement d'un outil défaillant (20 minutes vs 1 semaine). Le temps gagné explique la rapidité du retour sur investissement du nouveau système (9 mois). Par ailleurs, dans cet exemple, l'économie de la fonctionnalité facilite le recyclage ou la refabrication des outils de découpe usés qui contiennent des métaux critiques.

Consommer autrement

La démarche d'écoconception se heurte au comportement des consommateurs, mais aussi à la capacité des produits éco-conçus à perturber les marchés établis et remplacer d'autres produits moins écologiquement performants (Dijk et al., 2016). La transition vers les voitures électriques dépend de l'interaction entre innovation technologique, adoption des consommateurs et soutien réglementaire. Sans mentionner explicitement la présence d'ETR, une revue de la littérature (Secinaro et al., 2022) identifie **3 déterminants principaux pour les consommateurs : le prix à l'achat, la conscience environnementale, ainsi que la perception et la personnalité du consommateur** (appétence à la nouveauté par exemple). Dans une étude portant sur les consommateurs polonais (Sobiech-Grabka et al., 2022), le prix à l'achat est l'obstacle le plus important pour 77 % des répondants. Une étude norvégienne (Gehlmann et al., 2024) montre en revanche qu'un tiers des répondants serait disposé à payer davantage pour un véhicule électrique fabriqué dans des conditions présentées comme plus responsables. La littérature récente met également en lumière que les consommateurs restent incertains et méfiants face au manque de bornes de recharge et à la réalité du gain environnemental que peuvent représenter les véhicules électriques par rapport aux véhicules thermiques (Wicki et al., 2022).

Si ces questions sont pertinentes pour mieux comprendre les évolutions possibles de la demande en métaux et plus particulièrement en ETR, elles ne rendent pas compte des résultats de travaux de sciences humaines et sociales plus génériques sur la sobriété ou l'acceptabilité sociale de modes de consommation alternatifs. Par exemple, Paulson et Büchs (2022) estiment que 60 % de la population européenne se déclarent en faveur d'une diminution de la consommation individuelle (société post-croissance). Dans le même esprit, Wiedmann et al. (2020) mettent l'accent sur l'ampleur de l'impact environnemental négatif des foyers les plus aisés dans les pays riches, qui n'est pas ou peu compensé par l'innovation technologique. Les auteurs identifient la diminution de la consommation comme le levier principal. Ces travaux, pouvant avoir un impact direct sur la consommation d'objets contenant des ETR, ont dû être ajoutés à notre corpus de publications scientifiques initial.

Cette tension suggère un **effet silo dans les pratiques de recherche**, avec d'un côté des études, peu nombreuses et parfois peu robustes, portant spécifiquement et explicitement sur la consommation d'ETR, et de l'autre des études venant de nombreux champs disciplinaires, proposant des méthodologies variées et des résultats pertinents, mais qui n'annoncent pas explicitement l'impact de leurs conclusions sur la demande en ETR. Un des enjeux des futurs travaux de recherche pourrait être de combler cette lacune.

Conclusion

Les différentes disciplines abordent la question de la sobriété selon des perspectives variées, qui ne se recouvrent pas nécessairement. Les sciences des matériaux se concentrent sur la performance technique des

matériaux et des dispositifs, quand les sciences sociales explorent des formes de sobriété fondées sur une modification des usages, possiblement plus radicale.

En sciences des matériaux, l'étude de la sobriété se traduit principalement par des études de substituabilité ou de réduction des ETR dans les matériaux contenant les ETR les plus critiques — ce qui ne concerne pas les applications industrielles reposant principalement sur le lanthane et le cérium, telles que la catalyse et le polissage. Pour les aimants permanents, la teneur en dysprosium peut être réduite de moitié sans altérer leurs performances. Le néodyme peut être partiellement substitué par des terres rares moins critiques, comme le praséodyme ou le néodyme, mais au prix d'une baisse de performance magnétique. En revanche, à l'échelle des dispositifs, notamment des moteurs électriques, plusieurs leviers technologiques permettent de réduire la quantité d'aimants permanents à base d'ETR, par exemple via une optimisation du design du rotor ou une association avec des aimants ferrites. Au-delà des aimants et pour la majorité des usages, les ETR restent souvent indispensables aux performances des matériaux et les alternatives proposées nécessitent parfois le recours à d'autres éléments critiques ou toxiques. Par exemple, l'évolution des batteries NiMH vers des batteries Li-ion permet de ne plus utiliser d'ETR, mais déplace la problématique vers d'autres métaux critiques tels que le lithium et le cobalt. L'analyse des cas d'étude passés montre que les véritables gains en sobriété passent moins par une substitution de constituant ou de matériau que par des changements technologiques (innovation). Ainsi, le remplacement des lampes fluorescentes à base de phosphores par des LED, bien moins consommatrices d'ETR, constitue une forme de substitution réussie. Toutefois, dans la majorité des cas, la réduction de l'usage des ETR n'est pas le principal moteur de ces transitions : elle en est plutôt une conséquence. Ces changements ont avant tout été motivés par des gains de performances ou le respect de nouvelles normes. **À ce stade, rares sont les exemples où la sobriété en ETR constitue une véritable force motrice de l'innovation technologique.**

Le droit relatif à l'économie circulaire invite à une consommation plus sobre des ressources naturelles, y compris des matériaux critiques et se traduit par le développement de réglementations relatives à l'écoconception, la prévention et la valorisation des déchets ou encore l'efficacité énergétique. Néanmoins, en ce qui concerne les produits contenant des matériaux critiques, elle doit être articulée avec l'objectif de sécurité d'approvisionnement en ETR porté notamment par le Règlement européen sur les matériaux critiques (CRMA) : la sobriété devient alors un vecteur de souveraineté et une manière de répondre à la demande face à une offre fluctuante ou incertaine.

Enfin, en **sciences sociales**, la sobriété est abordée sous le prisme de la modification des usages, notamment par une modification des comportements, et donc une optimisation de la demande via des initiatives d'économie circulaire. En mettant l'accent sur l'usage plutôt que la propriété, l'économie de la fonctionnalité permet par exemple de maintenir les usages tout en réduisant la quantité de dispositifs et donc de matériaux utilisés. Cependant,

l'ensemble des publications réunies en sciences sociales est très limité sur ces sujets et se concentre presque exclusivement sur la voiture électrique.

Finalement, les leviers de sobriété correspondants aux piliers 'Refuser, Réduire ou Réutiliser' sont encore trop peu étudiés par la littérature qui se concentre plutôt sur les leviers techniques de l'économie circulaire, recyclage en tête (57 % de la littérature). Ce déséquilibre ne permet pas de pleinement comprendre les verrous culturels, institutionnels ou réglementaires qui empêchent la mise en œuvre complète d'une économie circulaire.

Mise en perspective

La littérature analysée manque de vision systémique, intégrée, sur la question de la sobriété, qui pourrait associer des réflexions à l'interface des sciences des matériaux et des sciences sociales. En particulier, il n'existe pas de littérature qui questionne le « juste » besoin technologique au regard des usages dans un souci de réduction de consommation d'ETR. Par exemple, la question suivante pourrait se poser : **quel(s) aimant(s) pour quel(s) usage(s) ?** De nombreux usages nécessitent de petits aimants (dans l'électronique par exemple). Leur substitution par des aimants sans ETR entraînerait une augmentation de la taille des dispositifs, ce qui ne correspond pas aux dynamiques de marché ou des pratiques de consommation actuelles (par ex. écouteurs), ces dernières n'étant pas indépendantes de la structuration des marchés par les acteurs économiques. En revanche, si l'on considère le cas des véhicules électriques, le besoin d'un aimant avec ETR (NdFeB) peut se questionner alors que des performances équivalentes peuvent être atteintes avec des aimants SrFeO ou AlNiCoFe plus volumineux. En considérant un aimant NdFeB de 1 kg, ce qui est commun pour les moteurs de véhicules électriques, il faudrait par exemple 3,7 kg d'aimant SrFeO pour atteindre les mêmes performances. À l'échelle d'un véhicule électrique, ce surpoids apparaît limité au regard du poids du véhicule et une telle substitution permettrait de réduire significativement le besoin en ETR pour la mobilité électrique. **D'après la littérature, aucun obstacle technique majeur ne s'oppose aujourd'hui à la suppression complète des aimants à terres rares dans les machines de traction automobile.**

De même, une réflexion sur une hiérarchisation des usages pourrait être envisagée en intégrant des critères physiques, économiques et sociaux et en s'appuyant sur la construction d'indicateurs dédiés. La perspective choisie dans cette ESCo, qui consiste à mener la réflexion sur les ETR à partir des possibilités de réduction en partant des usages, amène ainsi à une question plus générale, qui dépasse le cadre de cette expertise, sur la détermination d'usages prioritaires et, finalement, sur les choix de société associés. Ces considérations ne sont pas encore étudiées dans la littérature et dépassent le simple cadre de la recherche pour s'inscrire plutôt dans un débat démocratique.

RÉDUCTION DES ETR DANS LE SECTEUR DE LA MOBILITÉ : ÉCO-CONCEPTION ET SOBRIÉTÉ DES USAGES

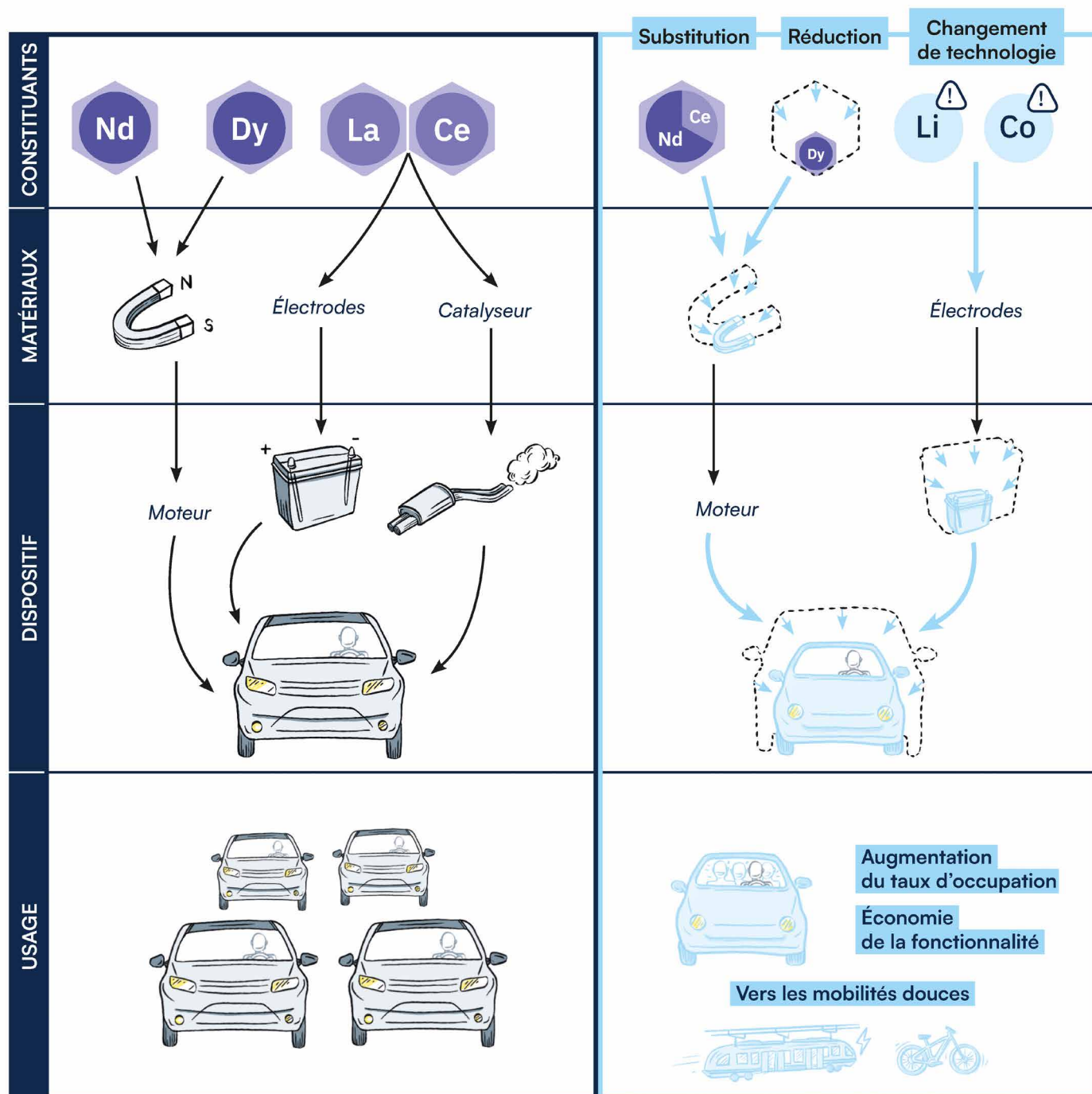


Figure 10 : Conclusion du chapitre II « Réduire » à travers un focus sur le secteur de la mobilité. Les leviers sont en bleu clair.

ZOOM : La réduction de l'utilisation d'ETR dans l'exemple du secteur de la mobilité (figure 10)

Les voitures électriques utilisent des ETR principalement pour les moteurs (aimants permanents NdFeB), et les batteries NiMH — mais celles-ci tendent à être remplacées par des batteries Li-ion. Il y a également des utilisations auxiliaires (écrans, haut-parleurs, etc.). **La réduction de la quantité d'ETR dans le secteur de la mobilité repose principalement sur :**

- 1 • L'écoconception** des véhicules, qui peut passer par :
 - a. **les changements de technologie** (par ex. des batteries NiMH vers des batteries Li-ion). Cependant, cela risque de simplement décaler les problématiques environnementales et de souveraineté vers d'autres matériaux (ici, le lithium et le cobalt),
 - b. **de la réduction** (par ex. injecter le dysprosium dans les joints de grain plutôt que dans la masse des aimants pour une efficacité identique),
 - c. **de la substitution** (par ex. remplacer une partie du néodyme par du cérium ou du praséodyme (ETR moins critiques), avec une possible perte de performances de l'aimant qui peut néanmoins suffire pour des véhicules moins lourds). Le remplacement total des aimants à ETR est également envisageable et déjà réalisé ou en cours de développement chez certains constructeurs,
 - d. **une optimisation de l'efficacité matière** (par ex. optimiser la géométrie des moteurs pour réduire la taille des aimants permanents tout en gardant les mêmes performances),
 - d. **la diminution de la taille des véhicules** (les petites voitures électriques de type citadine n'utilisent pas d'ETR dans leur moteur).

2 • Une diminution de la quantité de véhicules, envisagée via :

- a. **l'augmentation du taux d'occupation.** C'est-à-dire le covoiturage. Le taux d'occupation d'un véhicule en France est en moyenne de 1,4 occupant en mobilité locale et 2,25 pour la longue distance (plus de 80km) en 2019¹⁵,
- b. **le développement de l'économie de la fonctionnalité** : intensifier l'usage grâce à l'auto-partage. Aujourd'hui, une voiture est utilisée en moyenne 1 heure par jour,
- c. **le transfert modal** vers les modes doux (transports en commun, vélo, marche). Rappelons ainsi que 42% des Français dont le lieu de travail se situe à moins de 1 km de leur domicile s'y rendent en voiture en 2020¹⁶.

Hypothèse prospective : en France en 2024, 39,3 millions de voitures particulières sont en circulation. Il est bien sûr essentiel de prendre en compte différents facteurs, comme les spécificités territoriales. Cependant en faisant l'hypothèse que si, en moyenne, le taux d'occupation était multiplié par 2 (pour passer de 1,67 à 3,34 personnes par voiture) et l'intensité d'usage était multipliée par 3 (pour passer à 3 heures d'utilisation par jour par voiture), grâce à l'économie de la fonctionnalité, alors, le nombre de voitures en circulation en France pourrait être, à usage constant (sans rupture technologique ni transfert modal supplémentaire), de 6,5 millions de véhicules.

¹⁵ https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/DE_4p_covoiturage-v4-050722_SH_OK.pdf

¹⁶ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5013868>

III. Recycler

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

Synthèse de l'expertise scientifique collective

III. Recycler

Dans une logique d'économie circulaire (chapitre II), lorsque les produits contenant des ETR arrivent en fin de vie, ces derniers ont vocation à être recyclés. Le gisement que représente ce stock d'ETR constitue une **source secondaire** (à la différence des sources primaires qui sont extraites du sous-sol) et correspond à la notion de « **mine urbaine** » (figure 11). Le recyclage des ETR est aujourd'hui loin d'être une réalité économique et industrielle : **au niveau mondial, moins de 1% sont recyclés**. Ce chiffre stagne depuis le début des années 2010. **La production primaire prédomine par rapport au recyclage dans tous les pays du monde, qu'il s'agisse des pays ayant des gisements d'ETR comme la Chine** (Ge et al., 2022) **ou des pays n'en disposant pas**. L'ouverture en 2025 de plusieurs usines dédiées au

recyclage des ETR en Europe ne permet pas encore d'influencer la tendance, bien qu'elle témoigne du développement d'initiatives visant à remédier à ce faible taux.

Étudier les raisons du faible développement du recyclage des ETR est important, étant donné la part qu'il pourrait prendre au soutien à leur production primaire (Jowitt et al., 2018). À titre d'illustration, **la consommation de dysprosium primaire pourrait croître à l'échelle mondiale d'un facteur de 10 à 30 d'ici 2050 par rapport à 2011. Ce facteur serait divisé par 1,5 ou 2 avec la mise en œuvre du recyclage** (Hoenderdaal et al., 2013). Mais comment l'organiser, le susciter ? Quels sont les verrous qui entravent son plein développement ?

III.1 Institutionnalisation du recyclage

L'essentiel

L'enjeu principal est la transformation des stocks d'objets techniques en gisement (de mine urbaine), c'est-à-dire au développement de la collecte et du tri des objets.

En l'absence d'incitation économique de la part du marché (confronté à de fortes oscillations du prix néfastes aux investissements industriels), le développement du recyclage repose sur la possibilité de développer des obligations juridiques (mais avec quelles métriques ?).

Le recyclage n'est pas à même d'assurer une couverture entière des besoins en ETR dans le cadre d'une demande toujours croissante, même s'il permet de répondre à certaines demandes tout en minimisant le *balance problem*.

Le recyclage : une activité systémique

L'activité de recyclage s'inscrit dans une logique systémique (Hagelüken et al., 2016) : elle est sous le contrôle d'une multitude de facteurs qui interagissent et que l'on peut répartir entre **facteurs internes** et facteurs externes. Les facteurs internes désignent tout ce qui ressort du produit recyclé lui-même : la valeur des matériaux qu'il contient, la complexité ou l'hétérogénéité du produit (qui vont rendre son désassemblage plus ou moins compliqué), la présence ou l'absence de substances dangereuses, le type de *business model* dans lequel il est inséré (produits de grande consommation ou produits destinés à l'industrie) et le type de vie sociale dont il fait l'objet (par ex. est-il susceptible de faire l'objet de dons entre consommateurs?). Les **facteurs externes** relèvent de l'infrastructure matérielle, économique et juridique pour le recyclage : les dispositifs de collecte, les incitations matérielles ou économiques (consigne, par exemple), la législation sur

les objets en fin de vie et les déchets, et enfin, les pratiques sociales — par exemple, la mobilisation des consommateurs (Hagelüken et al., 2016).

L'institutionnalisation du recyclage désigne alors **l'ensemble des initiatives politiques et juridiques adoptées par les acteurs afin d'« instituer » le recyclage**. En sociologie, « instituer » se réfère au processus par lequel des pratiques sociales, des normes ou des valeurs deviennent des institutions, c'est-à-dire des structures durables et reconnues au sein d'une société (éventuellement, par le droit). L'institutionnalisation du recyclage est nécessaire pour qu'il prenne une certaine ampleur. Il faut en effet distinguer la faisabilité technique du recyclage de sa réalisation concrète : ce n'est pas parce qu'un procédé technique existe qu'il va nécessairement être utilisé et passer à une échelle industrielle. Il faut donc créer les conditions de possibilité (y compris économiques) du recyclage en pesant sur les facteurs externes et, possiblement, internes.

POTENTIELLES SOURCES D'ETR : QUANTITÉS D'ETR DANS LES OBJETS GÉNÉRÉS EN 2020 DANS LE MONDE

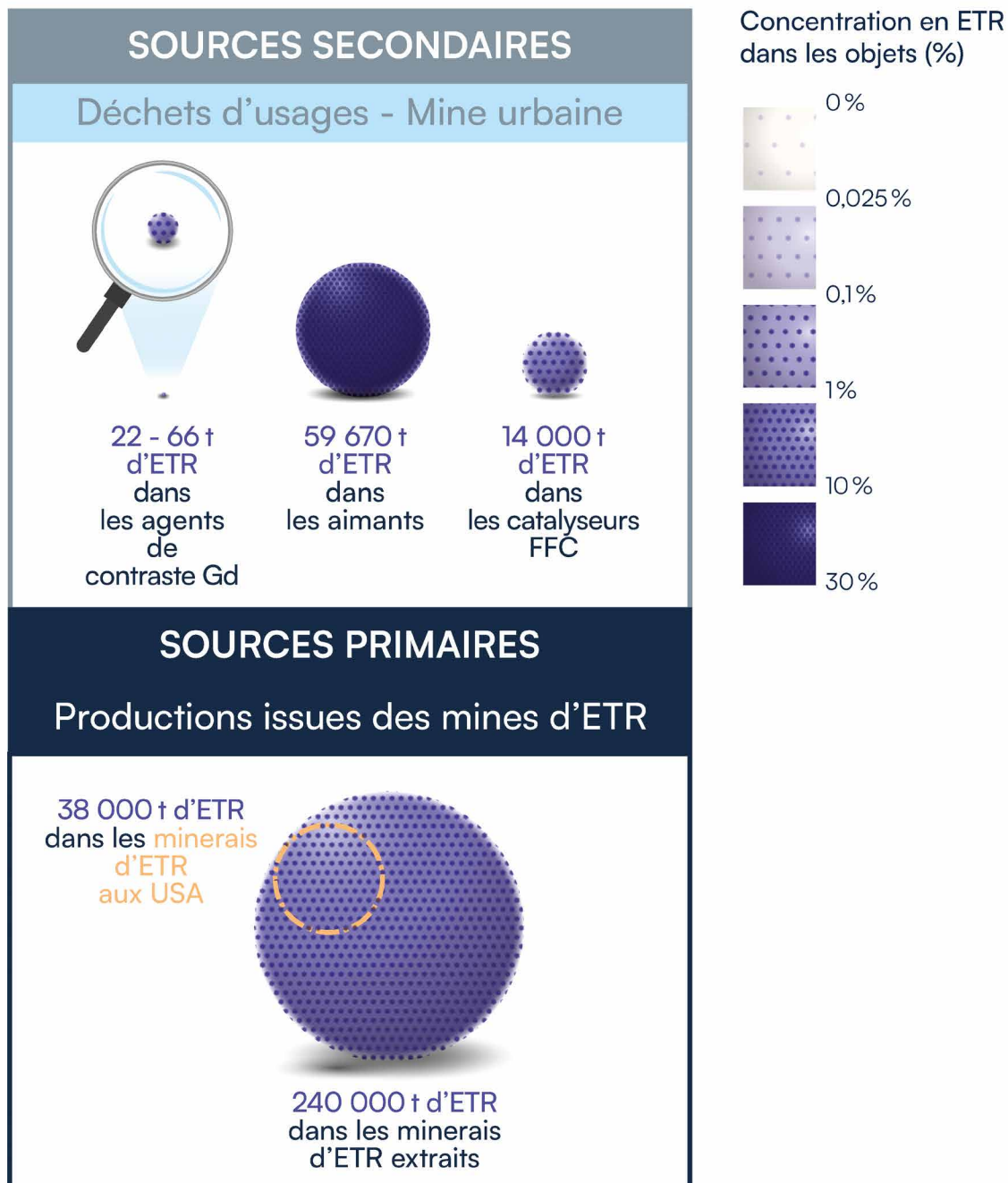


Figure 11 : Comparaison de la quantité d'ETR présente dans les objets générés en 2020 dans le monde (qui peuvent constituer des mines urbaines) avec la quantité d'ETR présente dans les roches extraites des mines d'ETR en 2020. Les données représentées dans cette infographie ont été estimées respectivement à partir de : Thomsen et al. 2017 ; Vaughan et al. 2023 ; Chen et al. 2024 ; Binnemans et al. 2013 ; USGS.

Ces conditions sont explorées dans cette partie. D'abord, la littérature de sciences sociales en économie, sociologie, géographie, management et gestion (500 articles environ), permet d'identifier les verrous au développement d'une dynamique d'ampleur de recyclage d'ETR à l'échelle européenne ou française. Ensuite, la littérature juridique (100 publications environ) décrit l'organisation juridique du recyclage des produits qui contiennent des ETR, en France et en Europe.

La nécessité d'une vision transversale des freins au recyclage des ETR

Le recyclage repose sur la création d'une logistique inversée (*reverse logistics*), c'est-à-dire une inversion des flux de matière et d'information par rapport à la production d'objets (Wilson et Goffnett, 2022). Recycler suppose d'organiser ces flux grâce à des infrastructures techniques, des règles juridiques, des politiques publiques, des dispositifs de concertation entre acteurs (Zhang et al., 2017). Les revues de littérature sur le recyclage des déchets électriques et électroniques laissent entrevoir la complexité de ces systèmes, à la fois dans leur conception, leur opérationnalisation et leur fonctionnement (Islam et Huda, 2018 ; van Nielen et al., 2022). **Si les ETR sont encore si peu recyclés, c'est parce que le fonctionnement de ce système aboutit à les écarter** (Horta Arduin et al., 2020). La littérature (une quarantaine de publications) qui analyse la possibilité de constituer et d'exploiter des stocks d'objets de consommation à recycler (la mine urbaine) (Jones et al., 2013 ; Xavier et al., 2023) **fait apparaître cinq difficultés : la dispersion / dilution, la variabilité de la composition des objets, les phénomènes d'hibernation, la variabilité régionale des gisements et enfin, l'accessibilité des infrastructures de recyclage.**

Une série de facteurs technologiques, de marché, organisationnels et juridiques expliquent ainsi l'absence de recyclage. Parmi les facteurs technologiques (facteurs internes), la littérature pointe d'une part comme problème central **l'usage très dispersé des ETR, la complexité du désassemblage des objets, et la faible rentabilité économique actuelle du processus** pour un certain nombre de déchets électroniques (à l'image des LED, Nikulski et al., 2021). D'autre part, la possibilité de recycler les ETR, notamment ceux contenus dans les aimants permanents ou les téléphones portables, est **conditionnée à la constitution de stocks suffisamment importants d'objets en provenance de la « mine urbaine »**. Mais celle-ci n'est pas non plus indépendante des évolutions technologiques : l'obsolescence des usages de certains ETR aboutit à les confiner dans la mine urbaine sans perspective crédible d'emploi futur, en l'absence de demande. Enfin, l'existence de pertes lors des opérations de recyclage, liées à l'efficacité de chacune des étapes de la chaîne de recyclage (collecte, désassemblage, traitement, etc.) ne doit pas être négligée. Le **cas des disques durs** constitue un bon exemple des difficultés du recyclage (Sprecher et al., 2014). Les disques durs représentent une source potentielle d'ETR grâce à leurs aimants permanents à base de néodyme-fer-bore (NdFeB). Les études de Jin et Sutherland (2018, 2019) et de Nguyen et al. (2017) soulignent que

leur recyclage, quoique techniquement faisable, ne permet de récupérer qu'environ 1% de la demande mondiale en ETR. Leur durée de vie moyenne, d'environ cinq ans, rend ces flux réguliers. Ils seront les premiers à amorcer l'industrie du recyclage, mais ils sont trop faibles pour avoir un impact significatif. Pour qu'une véritable économie circulaire émerge, **il faut donc inclure dans le périmètre du recyclage les gisements plus concentrés et durables que sont les aimants des éoliennes et des moteurs électriques des véhicules** (Jin et al. 2018, Nguyen et al. 2017, Bandara et al. 2015). Ces derniers, en fin de vie, représentent un potentiel stratégique pour boucler la boucle de la circularité des ETR.

Dans tous les cas, le recyclage est soumis à un impératif de rentabilité — et plus généralement, à des facteurs d'ordre économique. Ce point est parfois minoré dans la littérature, qui voit dans le recyclage un geste éthique, obligatoire, signalant une forme de vertu environnementale. En réalité, l'opportunité du recyclage est étroitement liée à la **vigueur de la demande**, au niveau des prix des ressources vierges et à la qualité des matériaux recyclés. La rentabilité du recyclage des métaux critiques dépend étroitement des prix du marché et des coûts technologiques. Bhuwarka et al. (2023) montrent que les prix à long terme des métaux sont déterminés par un équilibre complexe entre innovation, substitution et disponibilité des ressources. En transposant au cas des ETR, la plupart de ceux-ci sont faiblement substituables, ce qui rend leur recyclage potentiellement stratégique, mais économiquement fragile. Les analyses économiques des batteries et des disques durs (Jin et al., 2018 ; Kampker et al., 2023 ; Nguyen et al., 2017) convergent : **le recyclage n'est rentable qu'à partir de seuils de prix élevés ou avec des politiques de subvention ciblées**. Zhong et al. (2023) analysent eux le cas du secteur de l'éclairage : la substitution des LED aux lampes fluocompactes va entraîner d'ici 2060 une diminution drastique (de -87 à -100 %) de la demande en europium, en yttrium et en terbium en Chine, rendant l'opportunité du recyclage très faible.

Les analyses de **coûts des processus de recyclage** révèlent d'importantes variations en fonction du matériau récupéré. Par exemple, l'évaluation du coût du cycle de vie pour le recyclage des téléphones mobiles a estimé les coûts d'extraction des métaux de haute technologie (MHT), tels que le cobalt, le palladium et le néodyme, avec des différences notables entre les téléphones classiques et les smartphones (He et al., 2020). **Si le défi économique du recyclage des ETR réside dans la combinaison de faibles taux de collecte et des prix fluctuants des métaux, ce qui peut décourager les investissements** dans les technologies de prétraitement et de raffinage (Thiebaud et al., 2018), certaines recherches mettent en évidence les avantages économiques potentiels des ETR provenant de sources secondaires telles que la poudre fluorescente et les aimants permanents (Amato et al., 2019). Les résultats, résumés dans le tableau 2, confirment que la production secondaire d'ETR réduit considérablement les coûts globaux en fonction des prix du marché en 2017. Ce potentiel d'économie de coûts souligne l'importance de développer des stratégies de recyclage efficaces pour améliorer la durabilité des ressources et réduire la dépendance aux méthodes d'extraction primaire.

Source des ETR)	Métal cible	Coût des composés métalliques provenant de la production secondaire (€/kg)	Prix de l'oxyde métallique provenant de la production primaire (€/kg)
Processus de poudre fluorescente	Y	0,04	2,9
	Eu	1	77
	Ce	0,03	2,1
	Gd	0,5	37
	La	0,03	2,1
	Tb	7	513
Processus catalyseurs FCC	La	14	2,1
	Ce	14	2,1
Processus d'aimants permanents	Nd	8	57
	Pr	11	74

Tableau 2. Comparaison entre le coût des métaux provenant des processus de récupération décrits et le prix des mêmes éléments provenant de la production primaire en 2017 (Amato et al., 2019).

Mais les industriels sont souvent réticents à s'engager dans des démarches et des investissements de recyclage au vu de la **forte volatilité des cours** des ETR. (Bandara et al., 2015) ont modélisé les effets d'un taux de recyclage élevé sur la volatilité des prix : même à 40 % de recyclage, l'impact reste faible, car le marché mondial est dominé par la Chine et caractérisé par une forte inertie. **Les bénéfices du recyclage se situent donc davantage dans la sécurité d'approvisionnement et la réduction de la dépendance géopolitique que dans la stabilisation des prix.** Les injonctions au recyclage opèrent donc souvent à vide, dans la mesure où, sans aménagement des conditions de marché, les conditions de succès du recyclage ne peuvent pas être réunies, même si le prix de certains ETR est très élevé. La littérature insiste beaucoup sur la relation qui existe entre le développement du recyclage et le cours des ETR. si celui-ci est trop bas, le recyclage ne peut pas s'établir comme activité économique profitable (Beylot et al., 2020). De ce fait, le recyclage est également très dépendant de la demande et sa rentabilité liée à une pluralité de facteurs : « La rentabilité doit être considérée dans une perspective systémique plutôt que dans une perspective matérielle unique ; toutefois, les coûts de processus, les besoins énergétiques et les impacts environnementaux doivent également être pris en compte dans cette même perspective systémique. » (Nlebedim et King, 2018).

La perspective systémique s'étend également aux facteurs d'organisation qui contraignent le recyclage : les modalités de la collecte des objets (notamment des

DEEE), la nature du *business model* (B2B — d'entreprise à entreprise — ou B2C — d'entreprise au consommateur), le comportement des consommateurs, ou encore la distribution géographique des installations de recyclage (Prats Raspini et al., 2022). **Constituer un gisement d'objets** est d'autant plus aisé quand les filières ne concernent que du B2B, que ce soit le recyclage des déchets de fabrications ou les systèmes de reprise d'objets (via la consigne ou le maintien des droits de propriété). Pour les modèles B2C, la collecte initiale des déchets électroniques se fait en impliquant le niveau local, mais la littérature montre que les étapes ultérieures du recyclage appellent des installations de plus en plus vastes et centralisées, donc moins nombreuses et donc plus distantes. Par exemple, la zone de chalandise de l'atelier de recyclage des phosphores de Solvay à Saint-Fons était la planète entière. C'est d'ailleurs ce cas que nous analysons dans le rapport, afin de donner de la matière à ces considérations. **Le recyclage des phosphores de lampes à fluorescence**, qui a fait l'objet dans les années 2010 d'une filière industrielle portée par Solvay, fermée depuis par manque de rentabilité. Une dizaine d'articles se penche sur ce cas afin d'en tirer des enseignements. Il en ressort que l'obsolescence rapide de la filière lampes fluorescentes n'a pas été suffisamment anticipée par l'industriel, ce qui amène à une certaine prudence sur les dynamiques d'innovation et leurs conséquences sur les investissements en matière de recyclage (par ex. Binnemans et Jones, 2014 ; Machacek et al., 2015).

L'existence d'un cadre juridique général, applicable au recyclage des produits contenant des ETR en France et en Europe

Au même titre que pour l'ensemble des matières ou substances revêtant la qualification juridique de déchets, le recyclage comme mode de valorisation de ces derniers doit être privilégié. Cet enjeu a été clairement rappelé par la directive-cadre sur les déchets de 2008 (2008/98/CE) autour de la notion de « société européenne du recyclage ». Elle indique en effet qu'« afin de tendre vers une **société européenne du recyclage** avec un niveau élevé de rendement des ressources, il convient de fixer des objectifs pour la préparation en vue du réemploi et le recyclage des déchets » (§21). Le droit met au cœur de l'organisation du recyclage des déchets l'exigence d'une connexion forte avec l'écoconception (cf. chapitre II) ainsi que la question de la mise en visibilité de **nouveaux flux prioritaires de déchets — par exemple, les déchets d'équipement électrique et électronique (DEEE)**, (Directive 2012/19/UE) ainsi que les batteries de véhicules électriques (Règlement (UE) 2023/1542). La législation applicable prend, certes, en considération les produits comprenant les ETR au même titre que tous les produits et vise à éviter qu'ils ne deviennent des déchets. Néanmoins, **aucune législation n'oblige à l'heure actuelle à faire mention de la présence d'ETR ou à indiquer les actions spécifiques à réaliser à leur rencontre en matière de recyclage, que ce soit pour les usages dispersés ou concentrés et la littérature juridique se saisit encore très peu de cette question.** Les directives européennes de 2024 sur les matières premières critiques et sur l'écoconception (cf. II.2) vont cependant dans le sens d'une part obligatoire de recyclage concernant les produits contenant des métaux critiques et pourraient conduire à court terme à l'adoption d'une réglementation européenne spécifique au cas de la récupération des ETR (par exemple en ce qui concerne les éoliennes *offshore* qui arriveront en fin de vie dans les années 2030-2040 et ne sont pas encore réglementées en ce sens).

De manière générale, l'encadrement juridique du recyclage repose sur la « **responsabilité élargie du producteur** » (la REP), qui consiste en l'obligation pour tout producteur ou détenteur de déchets d'en assurer ou d'en faire assurer la gestion, en application du principe pollueur-payeur (article L541-10 du Code de l'environnement : « Le producteur est responsable de la gestion du produit qu'il met sur le marché jusqu'à la fin de sa vie »). Elle implique, pour les producteurs de certains produits énumérés, de prendre en charge le financement de la prévention et de la gestion des déchets issus de ces produits en fin de vie (Micheaux, 2023 ; Wilts et al., 2011). Le financement s'opère soit à travers des cotisations versées à un éco-organisme, soit par la mise en place d'un système individuel de gestion des déchets.

La filière de responsabilité élargie des producteurs européenne relative aux **déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)** est considérée comme précurseur, puisqu'elle est la plus ancienne. Elle découle de la directive 2002/96/CE du 27 janvier 2003, révisée par la directive 2012/19/UE. Cette directive fixe des objectifs de collecte séparée et de valorisation ou recyclage globaux, par grandes

catégories d'équipements (grands appareils, petits appareils, écrans, lampes, etc.). Les États membres doivent garantir que les DEEE collectés sont traités en séparant certains composants afin de faciliter la récupération de substances dangereuses ou rares. La directive DEEE reste cependant générale : elle impose un recyclage par catégories d'appareils, mais ne fixe pas de quotas ni d'obligations spécifiques, y compris donc pour les ETR. À l'échelle internationale, en outre, **le cas des DEEE souligne les contradictions des régimes juridiques actuels qui ne parviennent pas à mettre en place une collecte efficace de ces déchets.** La Convention de Bâle, qui encadre les mouvements transfrontaliers de déchets dangereux, contient en effet des failles : les équipements usagés destinés à la « réutilisation directe » échappent à la réglementation, favorisant le transfert illégal de déchets électroniques vers les pays en développement (Khan, 2016 ; Ngom, 2022). Ce phénomène mine l'efficacité des politiques de responsabilité élargie des producteurs et compromet le recyclage des métaux critiques.

Le **Règlement batterie** de 2023 (UE 2023/1542) fait figure de modèle en matière de récupération de métaux avec des objectifs chiffrés dans le temps. L'article 8 prévoit par exemple que, d'ici 2028, les batteries des véhicules électriques devront contenir une part minimale de cobalt (16 %), de lithium (6 %) ou de nickel (6 %) qui est issue de la valorisation des déchets de fabrication de batteries ou des déchets post-consommation. De même, une part minimale de plomb (85 %) doit être issue de la valorisation des déchets, pour chaque modèle de batterie, par an et par unité de fabrication. Ces taux sont amenés à augmenter d'ici 2036 hormis pour le plomb. Cependant, les ETR des batteries NiMH ne sont pas mentionnés dans ce règlement (qui pourrait étendre d'ici 2027 la liste des composants à recycler) et la plupart des autres produits destinés à devenir des déchets contenant des ETR ne font pas encore l'objet d'une législation spécifique.

Les approches actuelles, basées sur des quotas de recyclage exprimés en masse et non qualitatifs, ne favorisent donc pas un recyclage optimal des ETR (Wilts et al. 2011). Par exemple, la directive Véhicules Usagés 2000/53/CE du 18 septembre 2000 dispose que 85 % de la masse d'un véhicule usagé doit être réemployée et recyclée : **ce sont donc les éléments de densité la plus élevée, en particulier l'acier ou l'aluminium, qui vont concentrer les efforts de recyclage.** La littérature juridique aborde cependant peu ces questions et en particulier ce qui concerne le réemploi des produits. **Une évolution vers une REP globale prenant en compte l'ensemble du cycle de vie des produits, développant de nouvelles métriques et intégrant des exigences spécifiques aux métaux critiques et en particulier aux ETR, est présentée par certains auteurs comme une option intéressante pour renforcer la circularité de ces ressources stratégiques à l'échelle mondiale** (Campbell-Johnston et al., 2023). La REP appliquée plus particulièrement aux ETR impliquerait pour les producteurs une obligation de financer la collecte, le tri et le recyclage des produits contenant des ETR, la mise en place d'un éco-organisme agréé par le biais d'une filière « terres rares » au même titre que celles pour les DEEE ou les batteries, une obligation de traçabilité et de déclaration des quantités mises sur le marché ou encore

des obligations liées à l'écoconception. Pour les utilisateurs finaux, une REP appliquée aux ETR impliquerait notamment une obligation de remettre les produits en fin de vie à la filière agréée et un suivi.

À l'échelle nationale et régionale, plusieurs études (Gu et al., 2018; Huiyun et al., 2019; Mazzarano, 2022; Qiu et Suh, 2019; Wakolbinger et al., 2014; Wan et Yang, 2024) montrent ainsi que les **politiques efficaces pour exploiter la mine urbaine reposent sur un équilibre entre régulation juridique, incitations économiques et innovation, et surtout sur la collaboration entre les différents acteurs de la chaîne**. Les modèles centralisés pilotés par les fabricants, lorsqu'ils sont combinés à REP, offrent de meilleures performances de collecte et de traçabilité. La littérature fait également valoir que pour réussir dans son rôle de sécurisation des ressources, le recyclage doit être pensé sur une base régionale, ce qui restreint les exportations de DEEE (Wang et al., 2024). Manhart (2011), bien que se plaçant dans un cadre général et pas uniquement sur les ETR, insiste par exemple sur la nécessité d'une coopération internationale poussée, combinant prétraitement manuel dans les pays du sud global et raffinage industriel dans les pays du nord global, afin d'optimiser les coûts et de limiter les exportations illégales. Ces approches s'inscrivent dans une logique de circularité coordonnée, où la collaboration entre producteurs, recycleurs, distributeurs et consommateurs devient un levier essentiel de réussite. Par ailleurs, l'étude de Li et al. (2023) appliquée aux batteries des véhicules électriques qui ne contiennent pas d'ETR, introduit une idée transposable : l'usage de systèmes d'incitation basés sur la blockchain et des «tokens»¹⁷. Ce mécanisme hybride combine incitations de marché et régulation publique et pourrait être appliqué au recyclage des ETR pour améliorer la transparence, la participation des consommateurs et la valorisation des flux recyclés. Ces approches s'inscrivent dans une logique de circularité coordonnée, où la collaboration entre producteurs, recycleurs, distributeurs et consommateurs devient un levier essentiel de réussite.

En conclusion, le droit relatif à l'économie circulaire pourrait permettre d'organiser le recyclage des ETR en s'appuyant entre autres sur la REP pour structurer une filière, ou encore sur l'écoconception pour faire en sorte que les industriels pensent en amont la production d'objets plus facilement recyclables (cf. chapitre II). L'analyse d'une large littérature en sciences sociales montre par ailleurs les facteurs bloquants actuels pour organiser le recyclage à grande échelle. Tout d'abord, elle pointe **la difficulté à constituer des stocks d'objets suffisants pour recycler de façon économiquement viable** (tout en soulignant la possibilité de parvenir à une telle viabilité pour certains déchets électroniques). Le droit international concernant l'interdiction d'exports de déchets électroniques dangereux du Nord vers le Sud (Convention de Bâle de 1989) n'est pas suffisamment effectif, ce qui en plus de conséquences environnementales et sociales délétères pour les pays du sud global, rend plus difficile et moins rentable la collecte d'objets électroniques pour recycler les ETR

dans les pays du nord global. La réglementation européenne fait du déchet électronique à la fois une source de danger et une source de valeur, ce qui crée des injonctions contradictoires (Kama, 2015). Pour le moment, les coûts informationnels, d'organisation matérielle et humaine pour structurer une filière de recyclage sont peu incitatifs pour les acteurs économiques à s'investir dans la structuration d'une filière. Le passage de l'idée de REP à sa traduction concrète suppose le développement d'un système de collecte et de traitement d'une très grande complexité (un ex. avec l'état de Washington : (Gui et al., 2013)). **La littérature pointe le rôle important de la puissance publique pour structurer la filière par la mobilisation d'instruments juridiques, financiers et d'incitation à l'égard des consommateurs** (remise en circulation de leurs appareils électroniques hors d'usage).

Enfin, parce que la littérature concernant le recyclage des ETR analyse principalement le problème sous l'angle des déchets électroniques, un certain nombre de problématiques demeurent encore à explorer. En effet, les ETR des dispositifs électroniques étant très dispersés, leur recyclage peut impliquer des modalités de collecte et de stockage qui entrent en conflit avec la façon dont les déchets électroniques sont aujourd'hui collectés. **Des centres de traitement situés relativement proches des lieux de collecte (comme c'est le cas actuellement) risquent de ne pas avoir suffisamment de volume à traiter pour recycler les ETR de façon rentable**. Le rôle et la structuration des éco-organismes en situation de collecter les déchets pour le recyclage des ETR, sans que ceux-ci ne se retrouvent à avoir un pouvoir de marché excessif (c'est-à-dire en achetant à très bas coûts les objets grâce à leur rôle central dans l'organisation de la filière), ne sont pas étudiés pour le moment dans la littérature. Il y aurait de même un intérêt important, scientifique et en termes de politique publique, à **tirer des enseignements des tentatives avortées de création de certains centres de recyclage d'ETR**, à l'image de la faillite de l'entreprise américaine MolyCorp aux États-Unis en 2015. De telles études n'existent pas actuellement dans la littérature. À l'inverse, une entreprise française, Caremag, a annoncé en mars 2025 son souhait de commencer son activité de recyclage des ETR (aimants permanents) fin 2026. Compte tenu des enjeux économiques, politiques et scientifiques majeurs que revêt une telle entreprise, des études d'économie et de sociologie de l'innovation pourraient être menées pour suivre le projet et tirer des enseignements pour la structuration d'une filière plus vaste.

En montrant les difficultés pour les entreprises d'organiser le recyclage des déchets électroniques, la littérature indique la nécessité d'une structuration volontariste de la filière, par les industriels, mais plus certainement par l'État. Cela suppose, en retour, la possibilité de produire des données fiables sur les stocks d'objets à recycler, de financer la filière pour initier une dynamique d'ampleur ou encore d'orienter la conduite des consommateurs pour inciter au recyclage via de l'information, de la subvention ou l'organisation de la collecte d'objets.

¹⁷ La blockchain est un système de registre numérique distribué et les tokens constituent les actifs qui sont échangés par le biais de ce registre. Les tokens peuvent être liés à des objets physiques (les batteries ici) et être liés à des dispositifs de collecte et de consignation.

L'essentiel

Le recyclage apparaît comme une alternative de production plus responsable des ETR. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV), en lien avec l'Analyse des Flux de Matières (AFM), montre que les procédés de recyclage ont une empreinte carbone inférieure à celle de l'extraction primaire.

Le recyclage des ETR s'organise en trois étapes basées sur le démontage et le pré-traitement pour isoler les fractions utiles, la mise en œuvre de procédés thermiques, chimiques ou biologiques pour concentrer les métaux, et la conversion/mise en forme finale.

Les verrous majeurs du démontage concernent l'hétérogénéité des assemblages et la complexité des fixations, limitant l'automatisation des opérations. La rentabilité dépend aussi de la valorisation conjointe de tout le « cocktail métallique ». Les filières existantes du pré-traitement montrent une faisabilité technique avérée avec cependant des optimisations à concrétiser.

S'agissant du cœur de procédé, les procédés pyrométallurgiques offrent simplicité et durabilité relative, mais sont énergivores et peu adaptés aux flux dilués, tandis que l'hydrométallurgie et ses déclinaisons (extraction liquide-liquide, adsorption sélective, électrochimie) constituent le socle de la séparation. Les approches non conventionnelles (solvométallurgie, ionométallurgie, biométallurgie) ainsi que les boucles courtes (telle que la voie "aimant à aimant") ouvrent des voies plus durables bien qu'elles nécessitent encore des validations à l'échelle industrielle.

III.2 Organisation concrète et étapes du recyclage

Les méthodes d'analyse comme l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et l'Analyse des Flux de Matières (AFM) permettent de quantifier les bénéfices environnementaux du recyclage et d'identifier les gisements secondaires exploitables. Les technologies émergentes montrent un **fort potentiel de réduction d'impact environnemental** (Magrini et Jagodzinska, 2022). Les outils de planification multicritères tels que proposés par Yeh et Xu (2013) ou Jin et al. (2019) permettent d'optimiser simultanément les performances économiques et environnementales des réseaux logistiques. L'essor de ces solutions dépendra toutefois d'un cadre réglementaire adéquat, d'investissements en R&D et de stratégies industrielles coordonnées à l'échelle européenne. Les données économiques confirment l'intérêt du recyclage, avec des **coûts de production secondaire nettement inférieurs à ceux de l'extraction**

primaire pour des métaux clés comme le néodyme ou le terbium. Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) présentent un potentiel de récupération à moyen terme, avec des projections de hausse importante des volumes disponibles dans les flux de déchets (Habib et al., 2014 ; Wang et al., 2022).

Les sections suivantes déclinent les grandes étapes du recyclage en montrant les techniques les plus innovantes et prometteuses en la matière : (I) la **tête de procédé** comprenant le démontage/désassemblage des déchets et les processus mécaniques/physiques pour isoler les composants contenant les ETR et (II) le **cœur du procédé** relatif à l'extraction des métaux par des processus de métallurgie extractive thermiques, chimiques ou (bio)chimiques. La **fin du procédé** (III), étape facultative qui est une étape de conversion des oxydes d'ETR et de purification ultime des métaux obtenus, est traitée dans la partie IV.2 dédiée aux procédés d'extraction¹⁸.

¹⁸ La fin du procédé est traitée dans le chapitre IV qui étudie les sources primaires et les résidus miniers et industriels, car cette dernière étape s'y applique systématiquement. Tandis que pour le recyclage, si on considère les voies courtes mais aussi les voies longues, il n'y a pas forcément besoin d'aboutir à la purification des ETR sous forme métallique (cas des luminophores, des poudres de polissage etc.).

ZOOM : Métriques clés de l'évaluation de la recyclabilité

La notion de « recyclabilité » a été définie par Henstock en 1988 : il s'agit de « la facilité technique et la faisabilité économique de la récupération des matériaux contenus dans des produits qui, autrement, seraient considérés comme des déchets ». Les travaux de Graedel et al. (2011) ont défini les principaux paramètres et métriques de l'évaluation de l'efficacité du recyclage des métaux. Ils distinguent entre le recyclage en fin de vie de l'objet (*End-Of-Life Recycling*) et le recyclage pendant le processus de production (production scraps). Dans le premier compartiment, la métrique la plus importante est le EOL-RR (*End-of-Life Recycling Rate*) : c'est le produit de

l'efficacité de la collecte avec l'efficacité du processus technique de recyclage (c'est-à-dire le rendement du processus, également appelé taux de récupération). Le EOL-RR fait toujours référence au recyclage fonctionnel, c'est-à-dire au recyclage qui préserve les qualités fonctionnelles du métal. Le recyclage non fonctionnel désigne la situation où le métal est recyclé mais en mélange avec un autre, ce qui lui fait perdre ses propriétés fonctionnelles.

Pour un même matériau (ci-dessous les aimants permanents) concentré en ETR, l'impact de l'usage concentré ou dispersé sur la recyclabilité est considérable si l'on compare la quantité d'aimants NdFeB présents dans une éolienne avec celle présente dans les véhicules ou les objets de consommation courante.

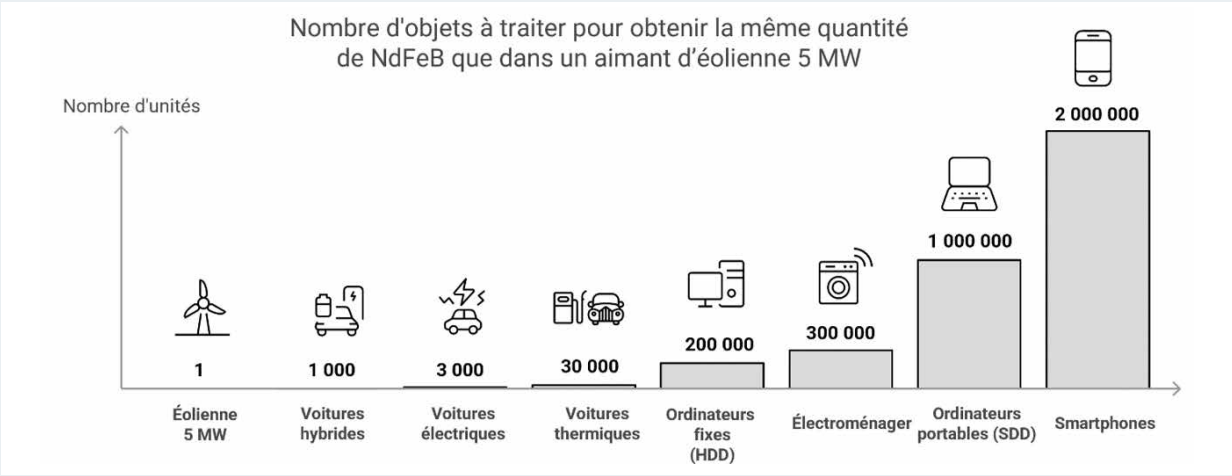


Figure 12 : Comparaison quantitative des objets à recycler pour obtenir une même quantité d'ETR.

Étapes du recyclage

Tête du procédé	Préparation des déchets	Démantèlement
		Broyage/Compactage
	Préparation des matériaux	Caractérisation du gisement
		Tri des matériaux
Cœur du procédé	Extraction des métaux	Dissolution des métaux en Phase liquide ou solide
		Séparation chimique
Fin procédé	Purification	

Technologies

Démantèlement manuel		
Démantèlement mécanique		
Broyage/Compactage		
Échantillonnage		
Technologies analytiques		
Séparation magnétique		
Séparation par courant de Foucault		
Autres (gravité, électrostatique...)		
Hydrométallurgie/Biohydrométallurgie/Solvométallurgie		Pyrométallurgie
Lixiviation	acide ou basique	Fusion, réaction en phase gazeuse
	Biolixiviation	
Extraction liquide/liquide	Solvatation	
	Échange d'ions	
	Liquides ioniques /DES	
Fluides supercritiques		
Précipitation		Affinage
Adsorption		
Électrolyse/Électrodéposition		
Autres		

Figure 13 : Les différentes étapes des procédés de recyclage et leurs technologies associées.

L'analyse complète de la littérature sur ces procédés est à retrouver dans les parties III.2 et IV.2 du rapport de l'ESCo.

Tête de procédés : démontage et prétraitement

Les études du domaine du démontage publiées entre 2020 et 2024 (explorées dans 30 publications) s'accordent à souligner la même tension : de fortes concentrations de métaux stratégiques cohabitent avec des taux de collecte ou de recyclage encore faibles, faute de chaînes logistiques et de procédés adaptés. Concernant le prétraitement, la littérature confirme qu'il existe aujourd'hui un panel limité de procédés pour le recyclage des ETR. Plus d'une centaine d'articles originaux, complétés par une quinzaine de revues parues entre 2018 et 2024, convergent pour montrer qu'un **taux de récupération supérieur à 80 % des ETR est techniquement atteignable grâce aux étapes de prétraitement**. Ces résultats reposent néanmoins souvent sur des séries d'essais de laboratoire encore modulaires et peu comparables.

Pour les aimants NdFeB, les cycles de vie des appareils annoncent un pic de déchets d'aimants dans l'automobile et l'énergie à partir de 2030. Les procédés actuels de recyclage des aimants se concentrent encore sur les **disques durs**, notamment à travers l'exemple industriel d'Hitachi. Celui-ci illustre qu'un démontage semi-automatisé des petits aimants des disques durs d'ordinateurs est possible à grande échelle (Baba et al., 2013). Parmi les procédés de prétraitement, la décrépitation à l'hydrogène (HD) s'impose, selon une douzaine d'études publiées depuis 2020, comme la « voie aimant-à-aimant ».¹⁹ la plus courte (Burkhardt et al., 2023; Habibzadeh et al., 2023) par laquelle environ 90 % des propriétés magnétiques initiales sont conservées.

Dans une **lampe fluorescente**, le matériau luminescent (phosphores) représente à peine 1 % de sa masse, mais concentre six ETR (lanthane, cérium, europium, gadolinium, terbium et yttrium). En France, Solvay a traité jusqu'à 2 000 t/an de poudres entre 2012 et 2018. À l'étranger, les taux de recyclage sont hétérogènes (4 à 28 % selon les pays). Des solutions émergentes démontrent leurs capacités à surmonter certains obstacles comme la dispersion du mercure. Une vingtaine d'études (2001-2024) s'accordent sur des taux de récupération supérieure à 90 % atteints grâce à certains prétraitements. Trois revues (Chenna Rao Borra et al., 2018; Lu et Liang, 2024; Wu et al., 2021) présentent un procédé (la régénération de la poudre CeO₂) permettant deux cycles supplémentaires de polissage sans perte de performances.

Les volumes des **batteries NiMH** (avec ETR) déclineront avec l'essor des batteries Li-ion (sans ETR). Une vingtaine d'études recommandent le démontage manuel des modules de véhicules hybrides. Les procédés mécaniques affichent déjà des taux de récupérations de 90 % du nickel, mais butent encore sur la purification économique des

ETR légers. Deux revues de littérature récentes (Cassayre et al., 2022; Innocenzi et al., 2017), couvrant environ 200 références, confirment que **la voie hydrométallurgique** (dissoudre la batterie, préalablement mise en poudre, avant de réaliser des séparations) **domine les possibilités de prétraitement** ; celle-ci permet de récupérer plus de 90 % des ETR.

Les autres flux représentent un plus faible intérêt pour la recherche. Le marché résiduel des tubes cathodiques décline rapidement avec six publications récentes jugeant non rentable une filière dédiée. Les procédés de traitement des poudres de polissage permettent déjà de multiplier par 5 la teneur en ETR, mais la présence de fluor (3-5 %) et de métaux lourds complique la valorisation. Concernant les catalyseurs FCC (craquage du pétrole), le manque de valeur ajoutée du lanthane limite la récupération (Chen et Yang, 2024). Le cérium des catalyseurs des pots d'échappement automobiles demeure concentré dans les résidus pyrométallurgiques de l'extraction des métaux précieux, faute de rentabilité. Enfin, le recyclage des ETR des verres optiques (contenant jusqu'à 40 % de La₂O₃), très peu décrit dans la littérature, est freiné par l'absence de collecte. Pourtant, selon deux études pilotes, il est possible de récupérer 1 600 t/an d'oxydes d'ETR à pureté élevée,

ZOOM : L'exemple du recyclage des aimants des téléphones portables

Les téléphones portables sont un usage relativement dispersé (faible quantité d'aimants dans un très grand nombre de dispositifs) et donc difficilement recyclable. 16 milliards d'appareils étaient en service en 2022, avec une durée de vie moyenne sous les trois ans (Vats et Singh, 2015), mais seule 1 unité sur 10 est recyclée selon une étude de la Commission européenne. Une tonne de téléphones en fin de vie recèle 35 % de métaux dont 3,3 kg d'ETR (principalement néodyme, praséodyme, dysprosium et erbium). Même si quelques études ont démontré la faisabilité d'un désassemblage semi-automatique basé sur le développement du *machine learning*, les dix études concernant le démontage et publiées depuis 2018 confirment que le tri manuel demeure la méthode la plus performante pour séparer les constituants. Toutefois, son coût limite encore la massification industrielle. Jusqu'à présent, il n'existe donc pas de filière de récupération des aimants NdFeB dans l'électronique grand public. Cependant, le circuit de récupération des matériaux magnétiques doux (aciers électriques) est très développé, aussi bien dans le secteur de l'énergie que dans celui de l'automobile, et il pourra facilement s'adapter pour récupérer aussi les aimants.

¹⁹ Technique visant à récupérer un aimant avec une ou peu d'étapes de traitement d'un dispositif à un autre.

et une poignée de travaux (environ 5) démontrent la faisabilité d'un prétraitement NaOH concentré (55 %), avec des rendements de 99-100 %.

Pour conclure, les déchets riches en ETR constituent simultanément une ressource stratégique et un verrou opérationnel pour la circularité. Deux éléments convergents ressortent. **D'une part, la valeur intrinsèque des flux offre un levier économique tangible. D'autre part, les taux de collecte et la maturité industrielle des procédés restent encore insuffisants pour capturer cette valeur.**

Les verrous se situent surtout en amont : l'hétérogénéité et la complexité des assemblages (fixation chimique, mécanique ou magnétique des composants) imposent encore un démontage manuel. Celui-ci est efficace, mais coûteux, tandis que l'automatisation demeure limitée à quelques niches. De même, la rentabilité dépend moins de la seule teneur en ETR que de la capacité à identifier et valoriser l'ensemble du « cocktail » métallique contenu dans les équipements collectés. Par exemple, les études sur les batteries NiMH montrent que la rentabilité dépend autant de la teneur en nickel, cuivre ou métaux nobles que des ETR eux-mêmes. Enfin, les risques environnementaux associés obligent à intégrer des étapes de dépollution précoces. Ces enseignements mettent en valeur des orientations telles que la généralisation de la conception modulaire,²⁰ pour faciliter le tri et la mutualisation des sites de traitement afin de franchir les seuils de rentabilité. Les rares réussites industrielles montrent qu'une approche intégrée logistique-procédé-marché est techniquement faisable lorsque les volumes et les co-produits la justifient. Finalement, l'ensemble des données apporte des arguments en faveur d'un déploiement progressif fondé sur le choix raisonné du procédé le mieux adapté à chaque typologie de déchet et sur la montée en échelle contrôlée des essais de laboratoire vers des démonstrateurs semi-industriels.

Cœur de procédé

Suivant les étapes de démontage et prétraitement, il existe trois types de procédés pour extraire les métaux constituant les déchets : la pyrométallurgie, opérant à chaleur élevée pour fondre et séparer les métaux ; l'hydrométallurgie, employant des solutions chimiques pour dissoudre et sélectionner les métaux ; mais aussi la biohydrométallurgie, utilisant des micro-organismes comme agents physico-chimiques.

Pyrométallurgie

Les procédés pyrométallurgiques, en milieu métal liquide, par chloruration/distillation, électrolyse en milieu sels fondus ou par méthode « glass slag », affichent des rendements de 80 à 99,7 % et présentent des contraintes spécifiques à chacun. Ils sont particulièrement appliqués au recyclage des aimants permanents. Ces procédés sont simples, génèrent peu ou pas d'effluents acides et sont relativement propres. Ils peuvent produire directement des alliages

formés d'ETR ou bien des composés destinés à une purification pour une production industrielle (Assefi et al., 2020 ; Deng et al., 2025). Ces procédés nécessitent habituellement des matériaux initiaux riches en ETR ; ils ne conviennent pas aux ressources faiblement concentrées. Ils impliquent également une calcination énergivore, augmentant l'empreinte carbone et pouvant produire des composés organiques nocifs. La durabilité des procédés pyrométallurgiques dépend donc fortement du contrôle rigoureux des émissions gazeuses et particulaires, ainsi que de l'efficacité énergétique des opérations thermiques. Leur optimisation passe donc par l'amélioration du rendement énergétique, la valorisation de la chaleur fatale, et la mise en œuvre de systèmes de captation, filtration et traitement des effluents, garantissant une réduction significative de l'empreinte environnementale. L'analyse d'une trentaine d'articles de premier plan souligne l'intérêt croissant pour l'optimisation des procédés pyrométallurgiques. Les différentes voies pyrométallurgiques, et leurs principaux avantages et limites, sont listés dans le tableau 3. **Leur intégration dans des chaînes de recyclage hybrides (combinant pyrométallurgie, hydrométallurgie et étapes électrochimiques) semble indispensable** pour répondre aux exigences techniques, environnementales et économiques des futures filières industrielles.

Hydrométallurgie

Selon l'analyse d'environ 300 publications, l'hydrométallurgie constitue aujourd'hui **l'approche la plus largement explorée pour le recyclage des ETR**. Cette filière repose sur une succession d'opérations (dissolution, puis séparation et purification) et une diversité d'approches combinant des stratégies classiques et innovantes, adaptées aux spécificités des matériaux traités. Cette pluralité n'est ni fortuite ni simplement technologique : elle traduit l'extrême variabilité des sources secondaires d'ETR et leur composition et la nécessité de combiner performance, sélectivité, robustesse et viabilité environnementale.

La première étape clé, la **dissolution ou « lixiviation* »**, est réalisée avec des acides minéraux forts pour solubiliser les ETR. Les rendements élevés déjà atteints il y a plus de 30 ans (> 95 % selon Lyman et Palmer, 1992) continuent d'être optimisés (par ex. Ni'am et al., 2020). La littérature souligne l'intérêt d'adapter systématiquement les paramètres de la lixiviation au matériau cible et aux ETR présents, plutôt que d'adopter une approche générique. Par ailleurs, elle apporte des arguments en faveur d'une intensification raisonnée des prétraitements pour améliorer la sélectivité des procédés. D'autre part, la valorisation des ETR suscite un intérêt croissant pour des procédés plus durables. Des méthodes se présentent comme des alternatives prometteuses aux lixiviations classiques à base d'acides minéraux agressifs. Elles utilisent des acides organiques, faisant l'objet de nombreuses études (une vingtaine ayant été considérée ici). Certaines affichent 90 % de récupération (Belfqueh et al., 2023), voir proche de 100 % (Behera et al., 2019 ; Tanvar et al., 2020) et d'autres confirment la possibilité de séparer

²⁰ Une conception modulaire désigne une approche d'ingénierie consistant à structurer un système en sous-ensembles autonomes et interconnectés, afin de faciliter la maintenance, l'évolution et la réutilisation des composants tout en garantissant la cohérence de l'ensemble.

sélectivement le fer dans les aimants (Niskanen et al., 2022). Des liquides ioniques et des solvants eutectiques²¹ font également leur apparition avec une littérature mettant en valeur l'intérêt de leur faible volatilité, de leur recyclabilité et de leur possibilité d'orienter leur sélectivité selon la composition ou la structure ionique (nature du cation et de l'anion) ou moléculaire (nature du donneur et de l'accepteur d'hydrogène) (Binnemans et Jones, 2017; El Maangar et al., 2024; Pateli et al., 2020; Riano et al., 2017).

À partir du liquide obtenu par lixiviation, l'**extraction liquide-liquide (ELL)** est ensuite la méthode la plus utilisée pour séparer les ETR des autres éléments. Cette technique repose sur le transfert des ETR de la phase aqueuse vers une autre phase liquide appelée solvant et constituée d'un extractant et d'un diluant, qui a une affinité chimique avec les ETR. Cette méthode est capable d'être sélective parmi des ETR (par ex. différenciant le dysprosium du néodyme, ou le dysprosium du praséodyme) en ajustant certains paramètres (Liu et Chen, 2021; Traore et al., 2023). Cependant, l'ELL nécessite souvent de multiples étapes pour atteindre une pureté supérieure à 99 % et les solvants utilisés présentent des risques environnementaux (inflammabilité, toxicité). La recherche actuelle vise donc à développer des formulations d'extractants moins polluants, plus efficaces et recyclables. En particulier, l'utilisation de membranes liquides filtrantes offre une alternative prometteuse à l'ELL avec une séparation rapide, économe en énergie et intégrant les différentes étapes dans un seul dispositif. En complément, du CO₂ « supercritique »²² comme solvant non-toxique, recyclable et efficace est proposé. Par exemple, un tel milieu d'extraction a permis de récupérer 99,4 % de néodyme dans la poudre d'aimant NdFeB en seulement 30 minutes (Reisdörfer et al., 2020), contre 900 minutes par lixiviation classique. Des défis subsistent néanmoins quant à la sélectivité vis-à-vis du fer. L'**adsorption solide-liquide** constitue une alternative à l'ELL, surtout pour des solutions diluées ou des déchets complexes (mine urbaine, cendres, effluents). Des synthèses comme celle de (Artiushenko et al., 2023) classent les nombreux matériaux adsorbants selon leurs structures, leurs agents et leurs performances (rendement, sélectivité, recyclabilité). Les meilleurs matériaux permettent des taux d'adsorption supérieurs à 90 % même à pH acide (<2), un critère essentiel pour s'adapter aux lixiviats industriels. Certains peuvent également opérer une sélectivité parmi les ETR.

Les procédés électrochimiques sont d'autres voies qui se démarquent par leur capacité à combiner dissolution, séparation et purification dans des conditions contrôlées. Les travaux de Venkatesan et al. (2018a, 2018b) montrent que l'application d'une électrolyse oxydante permet de précipiter sélectivement les ETR et les séparer du fer. D'autres procédés ont aussi montré des rendements élevés (> 99 %) avec une pureté finale d'ETR supérieure à 99 %. Qu'il s'agisse

d'électro-lixiviation, d'électro-dialyse (avec des membranes sélectives), d'électro-déposition ou d'électro-sorption, ces approches électrochimiques, encore peu matures pour les ETR, offrent une grande souplesse et permettent de s'affranchir en partie de la complexité des voies pyrométallurgiques ou hydrométallurgiques conventionnelles.

La littérature scientifique récente sur l'hydrométallurgie converge finalement vers une approche combinant l'optimisation de la lixiviation, l'affinement des séparations et l'intégration croissante de procédés électrochimiques. Cette littérature démontre l'intérêt croissant pour des procédés **moins polluants**,²³ **à haute sélectivité, adaptables à des déchets complexes** (comme les aimants NdFeB, les lampes fluorescentes ou les batteries). Si la maturité technologique reste variable selon les voies, **la complémentarité de ces méthodes offre des perspectives solides pour développer des filières industrielles durables de récupération des ETR**. Ainsi, la recherche actuelle explore activement ces voies dites « vertes. (c'est-à-dire durables, éco-compatibles). Une centaine d'études récentes entre 2017 et 2024 confirment l'intérêt stratégique de ces technologies pour le recyclage sélectif, rapide et durable des ETR.

Biohydrométallurgie

Au-delà de ces procédés physico-chimiques, la biohydrométallurgie offre des solutions prometteuses basées sur l'activité de micro-organismes — notamment des bactéries, micro-champignons et archées.

La **biolixiviation** repose sur des micro-organismes capables de solubiliser les métaux par leur métabolisme. Ce dernier produit des acides organiques (ex. acide gluconique, citrique) et inorganiques (ex. : acides sulfurique, nitrique) ce qui permet de solubiliser les ETR par abaissement du pH (acidolyse) ou produit des molécules organiques permettant de former des composés [métaux-molécules organiques] solubles (complexolyse). Par exemple, la bactérie *G. oxydans*, a démontré une efficacité remarquable pour extraire les ETR comme le lanthane, le cérium ou le néodyme des batteries NiMH usagées (Rasoulnia et al., 2023, 2022, 2021b, 2021a). La biolixiviation peut également être mise en œuvre via la réutilisation de milieux usés contenant des bactéries lixiviantes. Ce procédé présente des avantages considérables en termes de coûts et d'impact environnemental. Toutefois, certaines limites subsistent, comme la lenteur du processus, la sensibilité des micro-organismes à la toxicité des substrats ou encore la difficulté à atteindre des rendements industriels constants. Des recherches sont en cours pour optimiser les conditions opératoires et pour sélectionner ou modifier génétiquement des souches microbiennes plus robustes et sélectives. Dans ce cadre, le confinement et la conformité réglementaire pourraient également devenir des enjeux importants.

²¹ Mélange qui a une température de fusion plus basse que celles de ces composants. La plupart de ces solvants sont ainsi liquides à température ambiante, ce qui facilite leur utilisation.

²² Substance portée à une température et une pression très élevées et qui présente des propriétés intermédiaires entre celles des liquides et des gaz.

²³ Moins d'acides, moins de solvants, des solvants non polluants biosourcés.

La **biosorption** utilise des biomasses²⁴ (vivantes ou mortes) comme les bactéries, algues ou champignons pour capter les ETR via des interactions physiques et chimiques (électrostatiques, échanges d'ions, complexation, précipitation). Les résultats affichés de 12 études sur des biosorbants innovants sont prometteurs. Certains, via des protéines et des peptides²⁵, sont capables de récupération sélective des ETR même à partir de solutions de lixiviation complexe chimiquement (Ye et al., 2024). Des biomatériaux fonctionnalisés sont conçus pour être stables, réutilisables et performants dans des procédés continus. Malgré ces avancées, des défis techniques restent à résoudre pour une application industrielle durable.

La **biominéralisation** est un processus microbien permettant de précipiter les ETR sous forme de composés insolubles sous forme de carbonates ou phosphates. Divers micro-organismes sont capables d'accumuler et de transformer les ETR avec des rendements très élevés (par ex. (Kang et al., 2023)). À ce jour, peu d'études ont exploré ce procédé écologique, sélectif et durable.

Ces biotechnologies ont le potentiel de résoudre les problèmes liés à l'extraction et au recyclage des ETR grâce à leur capacité de concentration et de séparation. Elles ont montré de bons résultats à l'échelle de laboratoire, mais une seule étude à ce jour a abordé la question de la montée à échelle industrielle (Good et al., 2023). En plus de l'évolutivité, des analyses technico-économiques et de cycle de vie seront nécessaires pour démontrer que ces biotechnologies peuvent concurrencer les méthodes d'extraction existantes, tant sur le plan économique qu'environnemental.

Conclusion

L'Union européenne, dans sa quête de neutralité climatique d'ici 2050, mise sur le développement d'une économie circulaire et la réduction des émissions de gaz à effet de serre, notamment en s'appuyant sur des technologies vertes utilisant des ETR. Des études sur le recyclage des ETR traitent du potentiel de récupération à moyen terme avec des projections de hausse importante des volumes disponibles dans les flux de déchets (Habib et al., 2014 ; Wang et al., 2022). L'Analyse de Cycle de Vie (ACV), en lien avec l'Analyse des Flux de Matières (AFM), montre que les procédés de recyclage ont généralement une empreinte carbone inférieure à celle de l'extraction primaire. Les technologies de recyclage, telles que l'hydrométallurgie, la biolixiviation ou les procédés directs "aimant à aimant", permettent de réduire significativement l'impact environnemental par rapport à l'extraction primaire (Magrini & Jagodzinska, 2022).

Mise en perspective du recyclage : ETR et impacts environnementaux

Par rapport à la production primaire, le recyclage des ETR présente des avantages dont le principal est de contourner les difficultés liées à la séparation des éléments radioactifs auxquels ils sont associés dans les gisements naturels, en réduisant leur impact sur l'environnement (Gkika et al., 2024). Cependant, les émissions de substances nocives lors du recyclage d'ETR peuvent être analogues à celles générées lors de leur extraction primaire et traitement et peuvent entraîner également des problèmes d'environnement et de santé. Il existe encore très peu de publications s'intéressant à l'impact du recyclage des ETR sur la santé environnementale et humaine particulièrement dans les zones de démantèlement des déchets électroniques alors que l'utilisation de méthodes de recyclage semblables à celles du traitement du minerai peut avoir des répercussions plus importantes sur les humains et l'environnement. Les publications qui traitent de l'impact environnemental du recyclage des DEEE s'intéressent à de nombreux polluants organiques et minéraux mais se préoccupent peu souvent des ETR spécifiquement. L'expansion de l'industrie des ETR suscite des inquiétudes quant aux questions de santé industrielle, car l'exposition prolongée aux ETR (cérium > néodyme > lanthane > samarium > yttrium > terbium > europium > lutétium) a été associée à des pathologies telles que la pneumoconiose et la fibrose pulmonaire, même si la progression de celle-ci pourrait être due à la radioactivité de certains ETR. Les études in vitro sur des macrophages, ont également montré une toxicité pulmonaire dont une fibrose potentielle induite par le cérium et le néodyme. La fibrose cutanée (fibrose systémique néphrogène) a été signalée comme effet du gadolinium utilisé dans les premières formes d'agent de contraste pour les images à résonance magnétique.

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour évaluer les risques pour les travailleurs, notamment pour déterminer les quantités d'ETR à partir desquelles des problèmes de santé peuvent apparaître. En effet, seules les valeurs d'expositions professionnelles à l'yttrium et au cérium sont actuellement réglementées à respectivement 1 et 5 mg/m³, mais une réglementation plus compatible est nécessaire car les formes de manipulation des ETR peuvent varier selon la matière première utilisée et le produit fini, et les substances produites peuvent également être différentes pour chaque procédé.

Par ailleurs, il faut noter que les stratégies de sobriété (substitution ou réduction des usages, par exemple) sont antithétiques avec le souci de constituer un stock d'objets contenant des ETR : « Les efforts de substitution peuvent contribuer à réduire comme le recyclage l'importance critique des ETR lourds, mais la substitution et le recyclage sont également des stratégies concurrentes, car la réduction de la pénurie d'approvisionnement obtenue par la réduction ou la substitution peut rendre le recyclage moins viable sur le plan économique, et vice versa. » (Schulze et Buchert, 2016, p. 23).

²⁴ Matière organique d'origine végétale, animale, bactérienne ou fongique (champignons).

²⁵ Fragments de protéines. Molécule composée de 2 à 50 acides aminés.

Technologies du recyclage des aimants permanents des voitures électriques hybrides

Démontage / Désassemblage

Équipement	Technique	Avantages	Principaux obstacles
Rotor de moteurs synchrones de véhicules électriques. ETR principaux contenus dans les aimants extraits : Nd, Pr, Dy Masse ETR : 1 kg VE et VHE	1) Manuelle 2) Semi-automatisée	1) Séparation des différents éléments 2) Gain énergétique, temps, séparation efficace des différents composants et pureté des aimants récupérés	1, 2) Hétérogénéités des flux, risque d'endommagement des aimants

Prétraitement

Matériau	Technique	Efficacité	Principaux obstacles
Aimants NdFeB ETR principaux : Nd, Pr, Dy	1) Démagnétisation, Hydrogénation / dispersion (HD) 2) Démagnétisation, Hydrogénation/dispersion/désorption/recombinaison (HDDR) 3) Calcination	1, 2) Recyclage par voie courte dans une stratégie d'aimant à aimant 2) Obtention de poudres plus raffinées que HD 3) Adapté aux étapes d'hydrométallurgie suivantes car oxydes d'ETR plus facilement lixiviables que les autres oxydes métalliques dont Fe_2O_3	1, 2) Inertage du milieu

Cœur de procédé

Pyrométallurgie	Technique	Efficacité	Principaux obstacles
Chloruration	1) Par $\text{Cl}_2/\text{AlCl}_3$ puis transport en phase vapeur 2) Par carbochloration après calcination oxydante des aimants 3) Par MgCl_2 4) Par NH_4Cl	1) Obtention sélective de ETRAInCl_{3+3n} gazeux 2) Distillation progressive des chlorures autres que ETRCl_3 condensés dans le résidu solide 3) Fe-B solide éliminé du mélange $\text{ETRCl}_3/\text{MgCl}_2/\text{Mg}$. NdCl_3 et DyCl_3 récupérés après distillation de Mg et MgCl_2 résiduels 4) Obtention d' ETRCl_3 à 400°C directement solubles en phase aqueuse	1) AlCl_3 , Cl_2 gazeux, cinétique de migration lente 2) Cl_2 gazeux, température > 1 000 °C 3) Rendement moyen car perte par formation de NdOCl et DyOCl en présence d' O_2 dans le milieu 4) Génération d' HCl gazeux

Métal fondu	Essentiellement Mg mais aussi Cu ou Ag	Formation d'un alliage Mg-ETR distillé	Hautes températures
Sels fondus	Solubilisation dans des eutectiques de type $MgCl_2$ -KCl, LiCl-KCl ou AlF_3 -NaF, puis récupération d'al- liages Mg-ETR, Al-ETR ou électrolyse	Applicable aux NdFeB et SmCo	Contrôle approprié de la composition du bain, de la température et de l'atmosphère
Glass slag	Fusion de l'aimant en présence d'un fondant sous flux d'oxygène pour obtenir des laitiers lixiviables	Combinaison pyro-hydro	Hautes températures Scories non lixiviables

Hydrométallurgie classique	Technique	Efficacité	Principaux obstacles
Lixiviation	Acides inorganiques HCl, H_2SO_4 , HNO_3 . Influence de la concentration, de la température, de l'agitation, du temps, du rapport solide-liquide, de l'activation (ultrasons, micro-ondes)	Variable en fonction des conditions appliquées	Acides corrosifs, peu de sélectivité, forte empreinte environnementale
Extraction liquide / liquide	Extraction par contact de formulations d'extractants / diluants avec un lixiviat	Grande variété d'extractants, cinétique rapide, sélectivité élevée, faible consommation d'énergie	Toxicité des formulations, volatilité, inflammabilité, volume de solvants, formation de troisième phase, sta- bilité des émulsions, ré-extraction dépendante de la nature et de la puissance du ligand d'extraction, perte par entraînement
Systèmes membranaires	Membrane liquide, membrane liquide supportée, membranes solides	Faible production de déchets, sélectivité élevée, faible consommation d'énergie, extraction/réextraction	Toxicité des formulations, inflammabilité, stabilité des membranes
Adsorption	Matériaux inorganiques, organiques, hybrides organiques / inorganiques	Pas de diluants organiques, recyclabilité	Taux d'adsorption, sélectivité, stabilité des matériaux, cinétiques d'adsorption et de désorption
Procédés électrochimiques	Électrolixiviation, électrosorption, électrodéposition	Combinaison dissolution / séparation, sélectivité, peu de déchets	Dispositifs complexes, potentiels élevés

Raffinage			
Réduction	Technique	Efficacité	Principaux obstacles
De chlorures anhydres	<ul style="list-style-type: none"> - Préparation des trichlorures d'ETR - Réduction des trichlorures d'ETR par Ca ou Li puis distillation ou fusion sous vide 	Réduction par Ca efficace pour les ETR légères dont le Pr Réduction par Li efficace pour tout ETR	Hygroscopie des chlorures
De fluorures anhydres	<ul style="list-style-type: none"> - Préparation des fluorures par hydrofluoration des oxydes d'ETR au HF ou calcination en présence de NH_4HF_2 - Réduction des ETRF_3 par Ca ou par Li-LiF en présence de mg, suivi de fusion sous vide ou distillation 	Réduction efficace pour l'ensemble des ETR	Coût des réactifs de fluoration
D'oxydes d'ETR	Réduction des oxydes d'ETR par addition de lanthane (lanthano-thermie), cérium, ou Zn métal en milieu NaCl-CaCl_2	Réduction efficace pour les ETR lourds	
Électrolyse en sels fondus	Technique	Efficacité	Principaux obstacles
De chlorures d'ETR	Électrolyse	Moins coûteux que les méthodes par métallothermie	Hautes températures, corrosion
D'oxy-fluorures	Électrolyse	Moins coûteux que les méthodes par métallothermie	Hautes températures, corrosion, à faible solubilité des oxydes dans les fluorures fondus, limitations de densité de courant
Hydrométallurgie innovante	Technique	Efficacité	Principaux obstacles
Lixiviation	1) Acides organiques 2) DES, ILs	1) Sélectivité (dépend du pré-traitement de l'aimant) 2) Économie en eau sélectivité 1, 2) Faible empreinte environnementale	1) Cinétique, rendement 2) Viscosité, coût
Extraction par des ILs et/ou des DES	1) Extractant cationique, neutre ou anionique dans DES ou ILs 2) DES pur ou TSILs	1, 2) Faible volatilité, capacité élevée, sélectivité, possibilité d'électrodéposition	1, 2) Viscosité, coût, stabilité, recyclabilité
Fluides supercritiques	Extractant dissout dans le CO_2 supercritique (74 bars, 31°C)	Faible toxicité, non-inflammabilité, séparation facile	Pression, sélectivité, solubilité des extractants

Tableau 3 : Comme tableau récapitulatif des procédés de recyclage, un focus a été réalisé sur les aimants permanents de la voiture électrique (valide aussi pour les aimants permanents des éoliennes, hormis l'étape de démontage).

ORGANIGRAMME DE DÉCISION DU **RECYCLAGE** DES ETR

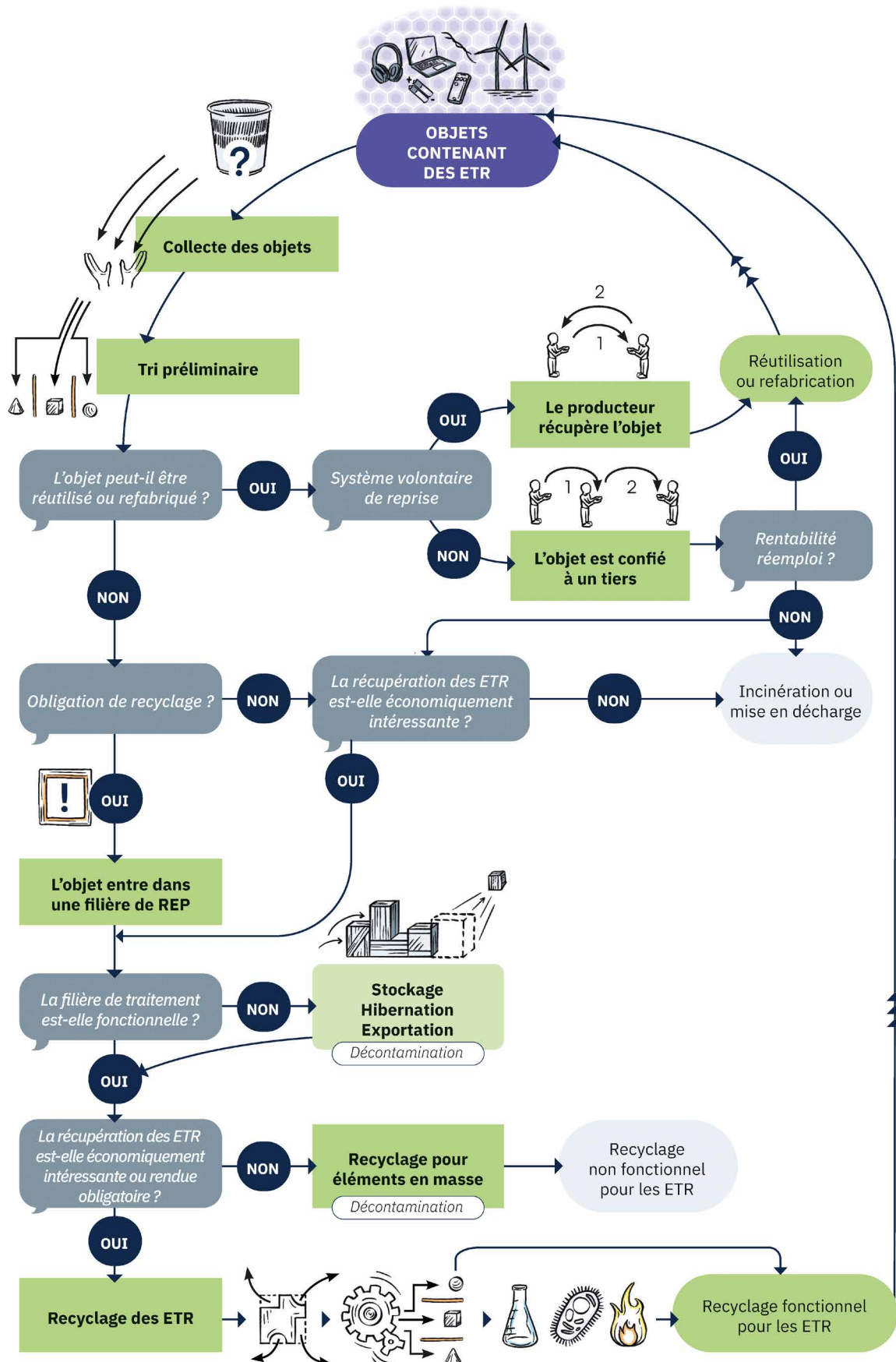


Figure 14 : Conclusion du chapitre III - Recyclage à travers l'organigramme de ses étapes.

IV. Extraire autrement

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

Synthèse de l'expertise scientifique collective

IV. Extraire autrement

La sobriété appuyée sur les principes de l'économie circulaire ne peut satisfaire significativement la demande que si celle-ci est modérée (Grosse, 2023, 2014). Dans le cas des ETR, la croissance de la demande annuelle est forte et la réduction ou le recyclage abordés dans les chapitres II et III ne suffiront pas à répondre aux besoins croissants.

Il est donc nécessaire de penser à d'autres formes d'approvisionnement. Au-delà des efforts en matière de sobriété dans l'utilisation des ETR et de recyclage, **les possibilités concrètes de «relocalisation», mais aussi les conditions d'extraction, de production et d'importation de ces ETR sont interrogées.**

IV.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe : cartographie des ressources

L'essentiel

En Europe, les principaux gisements à forte teneur, présentant donc un potentiel important, se situent au Nord (Groenland, Suède, Norvège, Finlande). Les occurrences à faibles concentrations (<1%) sont assez nombreuses et ont été bien identifiées en Europe et notamment en France. En France et dans le Sud de l'Europe, on trouve plutôt des gîtes de type peu profond, en surface de la croûte terrestre.

Bien qu'il n'existe a priori pas de potentiel géologique significatif en France à court terme, certaines sources alternatives d'ETR présentent un intérêt important. Néanmoins, leur exploitation demeure entourée de fortes incertitudes.

D'abord, la France étant le second territoire maritime au monde grâce aux espaces maritimes qui se trouvent au large de ses territoires ultramarins (11 millions de km²), les ressources minérales *offshore* qu'elle abrite pourraient constituer une source d'approvisionnement en ETR. Les estimations sont cependant très variables et leur exploitation présente de nombreuses difficultés et incertitudes aux niveaux technique, économique et environnemental recensées dans la littérature, ce qui pousse certains États à demander un moratoire sur les activités d'exploitation minière *offshore* et fait actuellement l'objet d'importantes controverses

Par ailleurs, des sources secondaires d'ETR sont identifiées dans la littérature (déchets miniers : résidus de bauxite, cendres de charbon, phosphogypse). Leur potentiel est très important, mais les données disponibles sur leurs stocks et leurs propriétés restent limitées. Les conditions d'exploitation, notamment sociales et environnementales, pourraient s'apparenter à celles d'une mine primaire, mais elles ne sont pas discutées dans la littérature.

Les gisements primaires formés en conditions géologiques profondes

Les gisements primaires de classe mondiale sont bien identifiés et localisés dans des roches magmatiques très anciennes de l'Europe du Nord (Groenland, Suède, Norvège, Finlande). Ces gisements sont localisés dans des roches magmatiques qui résultent de la fusion partielle des enveloppes terrestres profondes (le manteau ou la croûte

terrestre). Les principaux minéraux porteurs d'ETR sont également riches en phosphore, en carbone ou en silice²⁶. **Le Groenland possède huit gisements d'ETR de grande à très grande taille non exploités** avoisinant les 34,79 Mt de ressources estimées (Jonsson et al., 2023). Pour comparaison, la production d'ETR en 2024 atteignait 0,39 Mt selon l'USGS. La Norvège dispose de trois gisements non exploités de moyenne à grande taille (0,70 Mt) dont deux sont situés dans les roches magmatiques du rift d'Oslo

²⁶ Trois substances chimiques utilisées pour leurs propriétés spécifiques. Le phosphore, élément structurant du vivant, est crucial pour l'agriculture. Les carbones sont largement utilisés dans l'industrie, notamment dans la fonte du fer. La silice possède des propriétés de transparences optiques.

dans le sud du pays. **La Suède possède 2 grands gisements associés à des mines actives (0,46 Mt) et deux gisements de taille moyenne non exploités (0,49 Mt).** Les deux plus importants sont situés dans des mines actives de fer et phosphore à Kiruna et à Malmberget dans le nord du pays (Decrée et al., 2023).

De plus, les occurrences à faibles concentrations (<1%) sont assez nombreuses et ont été bien identifiées en Europe et notamment en France. Il s'agit notamment de magmas granitiques que l'on retrouve dans toute la chaîne varisque, dans le Massif central et le Massif armoricain en France.

Ces types de roches magmatiques n'ont pas ou très peu été caractérisées économiquement. Les granites à métaux rares, comme le granite de Beauvoir (Echassières), font actuellement l'objet de recherches détaillées pour leur teneur en lithium, mais pourraient être revisités pour leur contenu en ETR (Dehaene et al., 2019). Finalement, dans ce type de gisement primaire, comme pour les autres types, il y a un **manque de connaissances sur les ETR en tant que co-produits**. Les ETR ont des affinités chimiques avec les gisements de métaux de base d'étain (Sn), titane (Ti) et fer (Fe) (Nassar et al., 2015). Néanmoins, très peu de cas d'études locaux sont disponibles et évalués. Ces types de roches magmatiques, plus ou moins altérées, associées à la chaîne varisque à faibles concentrations n'ont pas ou très peu été caractérisées économiquement.

Les gisements formés en conditions géologiques peu profondes

Les gisements de type peu profonds, en surface de la croûte terrestre, sont les plus importants en France et dans le **Sud de l'Europe**. Il y en a deux types majeurs :

- les paléoplacers, formés par accumulation de sédiments²⁷, présents notamment le Massif armoricain. Leurs concentrations sont assez élevées (0,4-0,8 % d'oxyde d'ETR) (Charles et al., 2022), mais les occurrences sont disséminées et forment seulement de petits gisements (3 000 t).
- les bauxites, formées par altérations de roches, présentes dans le Sud de l'Europe. Elles sont moins concentrées (< 0,2 %), mais les volumes sont très significatifs (>> Mt). Les ETR pourraient aussi représenter des co-produits d'autres gisements comme les roches « phosphorites » de République Tchèque (Al-Bassam et al., 2021) ou les roches « pyrites » de la ceinture ibérique (Costis et al., 2021; Ruiz et al., 2002), mais avec des concentrations plus faibles (< 500 mg/kg soit 0,05%).

Les gisements de type peu profond sont donc assez abondants en France et Europe, mais sous forme de **petites occurrences fortement concentrées** (paléoplacers), ou de **grosses occurrences faiblement concentrées**

(bauxites, phosphorite, ceinture ibérique pyriteuse). Un avantage majeur des bauxites est qu'elles sont déjà exploitées pour l'aluminium et qu'elles pourraient présenter de fortes concentrations en autres métaux critiques (titane, gallium, nickel, cobalt). Toutefois, ces gisements demandent de mieux comprendre l'environnement des métaux pour vérifier si des protocoles d'exploitation par lixiviation *in situ* comme celles utilisées pour les gisements d'adsorption ionique (Moldoveanu et Papangelakis, 2016), minimisant les étapes de séparations, seraient transposables.

Les « pistes du futur »

Sources extra-terrestres

Les **météorites et les astéroïdes** sont des sources considérées par quelques articles scientifiques. Ces derniers convergent sur le fait qu'elles seraient moins abondantes que celles que l'on trouve dans les gisements exploités actuellement sur Terre (Luszczek et Przylibski, 2019; McLeod et Krekeler, 2017; McLeod et Shaulis, 2018) et que leur exploitation n'est, à l'heure actuelle, pas une option convaincante. Néanmoins, certains basaltes lunaires sont enrichis en ETR lourds. Malgré les horizons qui paraissent lointains pour cette exploitation, certains auteurs ont déjà réfléchi aux techniques minières spatiales. C'est par exemple le cas de Jiang et al. (2020), qui ont désigné des électrodes capables d'enlever les poussières lunaires.

Malgré ces horizons lointains, un **cadre juridique international** se construit progressivement dans l'idée de mettre en évidence le caractère commun de ces ressources. Dès 1967, le Traité de l'ONU sur les principes régissant les activités des États en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la lune et les autres corps célestes, prévoit que « L'exploration et l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique (...) doivent se faire pour le bien et dans l'intérêt de tous les pays (...); elles sont l'apanage de l'humanité tout entière ». Si le principe de non-appropriation est consacré à l'article 2, le Traité proclame dans le même temps que la lune et les autres corps célestes peuvent être explorés et utilisés librement par tous les États, sans discrimination, que ces États soient parties ou non au traité. Ce traité est assez largement ratifié, ce qui atteste de sa portée juridique. Néanmoins, l'heure est plutôt à l'encadrement individuel des activités minières extra-terrestres, comme le montrent les législations adoptées par les États-Unis, le Luxembourg, le Japon ou encore les Émirats Arabes Unis sur le statut des astéroïdes, en prévision d'une exploration future (des projets comme la Mission Psyche de la NASA pour la prospection d'un astéroïde ayant été lancés) — et en contradiction avec l'esprit du cadre multilatéral, bien que celui-ci manque de précision.

Bien que les **ETR de l'espace extra-atmosphériques ne soient généralement pas une source potentielle convaincante** à court terme pour la littérature, leur exploitation est étudiée du point de vue géologique, technique et juridique.

²⁷ Les placers sont des gisements formés par accumulation de sables aux densités élevées sous l'effet de la gravité. Ces gisements sont le résultat de la séparation et du tri par les actions d'érosion, de transport et de dépôt lors du ralentissement du flux d'eau. Ces gisements sont appelés paléoplacers quand ils sont formés dans des époques géologiques passées.

Comme le résumant Merle et al. (2023), la perception de ce type d'extraction apparaît comme le point culminant de l'hyper-capitalisme qui essaie de s'affranchir de la finitude de la planète Terre. Qu'ils soient positifs ou négatifs, les impacts potentiels de l'exploitation des ressources spatiales pourraient profondément changer la société, le progrès technologique que cela représenterait étant porteur d'espoir de solutions à la surexploitation des ressources et de richesses futures.

Fonds marins : potentiel, impacts et encadrement juridique

Les **fonds marins** constituent une source potentielle pour l'approvisionnement en métaux, y compris en ETR (Menendez et al., 2018), que ce soit dans les sédiments ou dans des galets qui se forment par agglomération de minéraux. Ces galets, nommés « nodules polymétalliques », représentent entre 2,1 et 12,1 Mt d'ETR dans le monde. Les régions les plus prometteuses pour cette ressource sont l'Atlantique Nord-Ouest (1,1 à 3,8 M-avec une concentration moyenne 0,39 %), l'Atlantique Est (0,47 à 1,6 Mt - 0,34 %), le Sud-Ouest du Pacifique (0,32 à 3,1 Mt - 0,27 %) et le domaine britannique de la zone de Clarion Clipperton, située dans l'océan Pacifique, au large du Mexique (0,1 à 3,4 Mt - 0,1 %). Les nodules qui se forment par précipitation chimique des éléments de l'eau de mer (nodules « hydrogénétiques ») peuvent être enrichis en ETR grâce à la lenteur du processus.

Les sédiments et boues marines profondes peuvent également être enrichis en ETR avec une concentration moyenne de $0,12\% \pm 0,02$. Kato et al. (2011) estiment une quantité de 9110 ± 1460 t d'oxydes d'ETR par km² pour une épaisseur de 10 m. Si on draguait tous les sédiments de l'océan Pacifique situés à plus de 4 km de profondeur sur une épaisseur d'un mètre (sur 1,1 million km²), la ressource serait de 450 Mt d'oxydes d'ETR (Hong et al., 2024). Cependant les énormes volumes mis en jeu et leur faible accessibilité rendent l'exploitation de cette ressource encore très incertaine.

La France étant **le second territoire maritime au monde** grâce aux espaces maritimes qui se trouvent au large de ses territoires ultramarins (presque 11 millions de km²), les ressources minérales *offshore* qu'elle abrite pourraient en théorie constituer une source crédible pour l'approvisionnement en ETR. De manière générale, les fonds marins peuvent être considérés comme des gisements de basse concentration (< 0.2 %) et à possible large volume (> 100 Mt).

L'exploitation des ressources minières des fonds marins pour prélever des ETR présente cependant de **nombreuses difficultés, notamment quant à l'impact environnemental des techniques qui pourraient être utilisées, et apparaît à l'heure actuelle très controversée dans la littérature. Certains auteurs cherchent en effet à comparer les avantages et bénéfices de ces activités avec ceux d'une extraction terrestre** (Miller et al., 2021; Paulikas et al., 2022). Les méthodes conventionnelles causeraient des impacts importants en générant des nuages de turbidité et des courants chargés de sédiments, la

force de gravité agissant de manière différentielle sur le mélange eau-sédiments plus dense que le fluide ambiant (voir notamment Elerian et al., 2022). L'ampleur des dommages, de même que la biodiversité qu'abritent les fonds marins, sont encore très peu connus. Nous savons cependant qu'ils abritent de nombreuses espèces endémiques. Il n'est à l'heure actuelle pas possible de savoir si les fonds marins pourraient retourner à l'équilibre après une exploitation. Les études analysées dans le cadre de cette expertise s'accordent sur le fait que les impacts écologiques comprennent principalement la modification de :

- 1 • l'habitat sédimentaire et ses communautés,
- 2 • le rejet de sédiments et de panaches,
- 3 • le rejet de composés toxiques,
- 4 • la production de lumière,
- 5 • de bruit,
- 6 • la pollution thermique,
- 7 • les émissions atmosphériques,
- 8 • les rejets dans l'eau,
- 9 • le retrait d'eau ambiante,
- 10 • la destruction des ressources génétiques marines.

Quant au **régime juridique** relatif à l'exploration et l'exploitation des ressources minières *offshore*, il varie selon que l'on se trouve dans les espaces sous juridiction nationale ou dans les espaces internationaux. La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer de 1982 prévoit que l'État possède des droits souverains et exclusifs concernant l'exploration et l'exploitation des ressources minérales sur son plateau continental, soit sur le sol et le sous-sol adjacents à ses côtes jusqu'à une distance de 200 milles marins vers le large. Dans cet espace (mer territoriale puis zone économique exclusive et plateau continental), c'est donc à chaque pays de déterminer l'opportunité et les modalités d'exploration et d'exploitation de ces ressources. **La France s'est positionnée pour une interdiction de leur exploitation dans les fonds marins internationaux**, mais pas dans ses eaux sous juridiction nationale, dans lesquelles son droit minier s'applique. En revanche, la Polynésie française et la Nouvelle-Calédonie, de même que Wallis-et-Futuna, ont mis en place une interdiction temporaire de toute activité d'exploration et d'exploitation des ressources minérales. L'Union européenne, dans le règlement 2024/1252 (*Critical Raw Materials Act*) se prononce également en faveur d'une abstention de toute activité relative à l'exploration et l'exploitation des métaux *offshore*, tant que l'absence d'effets nocifs de ces activités n'a pas été démontrée. Bien que la Norvège ait annoncé se lancer dans l'exploitation minière de son plateau continental — avant de renoncer temporairement — et à quelques exceptions près (Pettersen et Tawake, 2019; Tassin Campanella, 2024), la littérature analysée aborde relativement peu la question de l'exploitation des ETR situés dans les

zones situées sous le juridiction nationale des États (plateau continental), s'intéressant dans une plus grande mesure à la question de l'exploitation des ressources minérales dans les fonds marins internationaux (la « Zone »). Dans cette « Zone », les ressources minérales sont considérées comme le « **patrimoine commun de l'humanité** » et obéissent à un régime spécifique qui implique notamment la redistribution aux pays en développement d'un pourcentage des bénéfices qui seront tirés de l'exploitation commerciale de ces ressources, de même que la gestion centralisée de ces dernières par une organisation internationale représentant les intérêts de l'humanité : l'Autorité internationale des fonds marins (CNUDM, Partie XI ; (Dingwall, 2020)). Actuellement, 31 contrats d'exploration des ressources minérales ont été octroyés par l'Autorité dont deux à l'IFREMER, dans la zone de Clarion Clipperton, identifiée pour son fort potentiel en nodules polymétalliques — et donc prometteuse en ce qui concerne les ETR. L'exploitation, quant à elle, n'a pas encore démarré. L'Autorité finalise le règlement qui sera applicable à ces activités (Dingwall 2020), à moins qu'un moratoire sur l'exploitation minière de la Zone ne soit décidé, comme le demandent une quarantaine d'États, des ONG réunies au sein de la Deep Sea Conservation Coalition et certaines entreprises dont Eramet, Ford, General Motors ou Microsoft. Le décret adopté par les États-Unis le 24 avril 2025 visant à encourager l'exploitation des ressources minérales *offshore*, à la fois au sein et au-delà des limites de la juridiction nationale, s'inscrit ainsi à contre-courant du cadre juridique multilatéral en construction depuis les années 1980. Une entreprise canadienne, The Metals Company, pourrait à court terme être pionnière, celle-ci ayant annoncé être prête à se lancer dans l'exploitation et déposé en avril 2025 la **première demande d'exploitation minière des fonds marins internationaux**, sur le fondement du décret américain, après avoir dénoncé la lenteur du processus multilatéral au sein de l'Autorité internationale des fonds marins, tout en prévoyant par le biais de sa filiale NORI et de l'État patronnant Nauru de soumettre une demande parallèle auprès de cette dernière, en continuité de son permis d'exploration — ce qui pose de nombreuses questions juridiques.

Les travaux scientifiques analysés s'accordent sur le fait que d'**importantes incertitudes demeurent** concernant l'exploitation des ressources minières (y compris, donc, des ETR) dans les fonds marins, **non seulement quant à leur cartographie, leur concentration et leur volume, mais aussi quant aux effets de l'exploitation minière sur le milieu marin et sa rentabilité économique**. De plus, selon Merle et al. (2023), les défis technologiques sont extrêmement importants et le développement de l'exploitation d'ETR *offshore* ne permettrait pas forcément de contourner les enjeux géopolitiques actuels.

Les sources secondaires

La littérature identifie et caractérise des sources secondaires faiblement enrichies en ETR provenant de déchets industriels et de déchets d'exploitation d'autres mines que celles destinées à la production d'ETR (figure 15). Cela concerne les **cendres de charbon** issues de sa combustion industrielle, ainsi que des **résidus de bauxite** et du **phosphogypse**

produits lors de l'extraction minière de l'aluminium et des phosphates respectivement. En Europe et en France, elles **pourraient représenter le plus gros potentiel de quantité d'ETR**. L'intérêt de ces trois résidus pour l'extraction des ETR se traduit dans la littérature analysée par plus de 100 articles publiés à ce sujet depuis 2015. Cependant, très peu d'études (moins de 5) ont tenté d'estimer les stocks de ces sources secondaires en Europe. Elles sont souvent régionalisées (Sajn et al., 2024) et le stock global en France et en Europe est incertain et généralement estimé de manière indirecte (calculé à partir de la consommation de minerais primaires par exemple). À titre d'exemple, Deady et al. (2016) estiment que 100 à 270kt d'ETR pourraient être extraits à partir des résidus de bauxite produits en Europe entre 1972 et 2013 en considérant un taux de récupération de 50 %.

La concentration et la forme chimique (« spéciation ») des ETR dans les résidus industriels varient en fonction de l'origine géologique du minerai primaire. La grande majorité des études de spéciation sont réalisées sur des résidus produits hors Europe et ne sont donc pas directement transposables à ceux d'origine européenne (quelques exceptions pour les résidus de bauxite notamment ; Couturier et al., 2024 ; Vind et al., 2018). Enfin, des spécificités de chaque résidu sont importantes à considérer pour estimer leur potentiel : (1) le stock (en particulier en Europe et en France) et la valorisation actuelle de ce dernier dans d'autres applications (principalement matériaux de construction) qui pourrait concurrencer l'utilisation de ces sources secondaires pour la production d'ETR, (2) la concentration en scandium, un ETR au coût élevé qui peut permettre de rentabiliser le procédé d'extraction (cas des résidus de bauxite en particulier), (3) les concentrations relatives en ETR les plus critiques (tels que le néodyme, l'europium, le terbium, le dysprosium, l'yttrium et l'erbium) et enfin (4) la radioactivité qui peut limiter certaines voies de valorisation suite à l'extraction des ETR (approches zéro déchet notamment).

Outre ces résidus industriels, des études s'intéressent au potentiel de résidus miniers en Europe issus de l'extraction d'autres métaux (argent, plomb, zinc, cuivre, or). Elles sont encore très parcellaires et les rendements d'extraction dépendent beaucoup de la nature des résidus (Balassone et al., 2021 ; Peelman et al., 2016 ; Rosario-Beltre et al., 2023). Aussi, certains résidus produisent des effluents d'acide sulfurique qui pourraient être de potentielles sources d'ETR (drainages miniers acides).

Le cadre juridique relatif à la valorisation et au recyclage des déchets miniers dans le but d'extraire des ETR existe et repose principalement sur la directive du 15 mars 2006 sur les déchets de l'industrie extractive. Dans ce contexte, les États membres de l'Union européenne doivent notamment s'assurer que « les exploitants du secteur élaborent des plans de gestion de déchets appropriés pour prévenir ou réduire au minimum, traiter, valoriser et éliminer les déchets d'extraction ». La directive s'inscrit prioritairement dans une logique de **prévention** et de gestion des risques du fait du caractère dangereux de certains de ces déchets. Néanmoins, alors qu'ils représentent le tiers des déchets produits dans l'Union européenne, la directive n'a pas fixé d'objectifs en ce qui concerne les

POTENTIELLES SOURCES D'ETR : QUANTITÉS D'ETR DANS LES OBJETS GÉNÉRÉS EN 2020 DANS LE MONDE

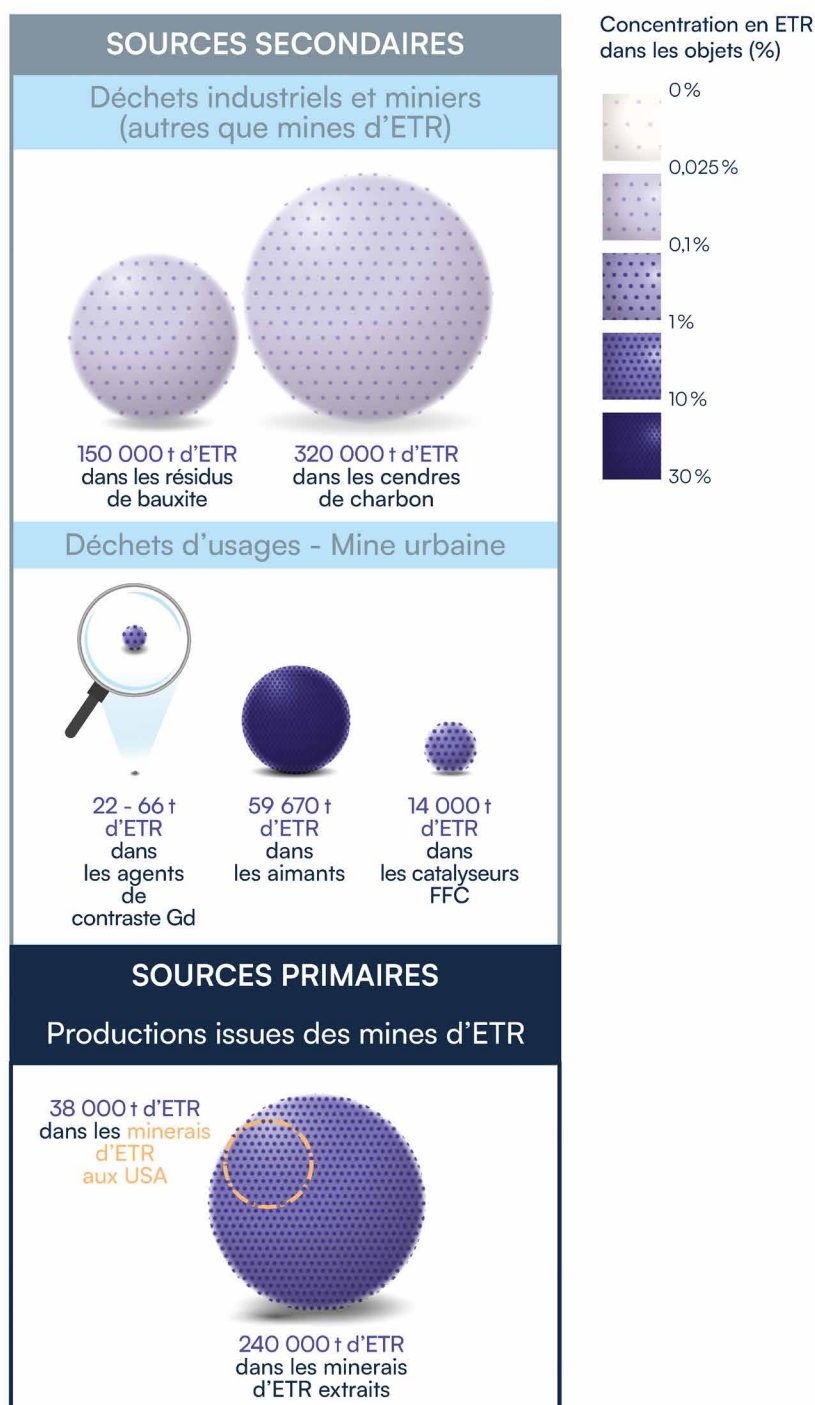


Figure 15 : Comparaison de la quantité d'ETR présente dans des déchets miniers et industriels (résidus de bauxites et cendres de charbon) générés en 2020 dans le monde, avec celle présente dans les objets générés en 2020 pouvant être destinés à constituer des mines urbaines et celle dans les roches extraites des mines d'ETR en 2020. Les cendres de charbon et les résidus de bauxite produits annuellement à l'échelle mondiale représentent de très gros volumes (800 000 000 t et 150 000 000 t) faiblement concentrés en ETR (0,04 % et 0,1 %). Les données représentées dans cette infographie ont été estimées respectivement à partir de: Rapport de *International Aluminium « Sustainable Bauxite Residue Management Guidance »* 2022; Binnemans 2015; Fu et al. 2022; Fan et al. 2022; Thomsen et al. 2017; Vaughan et al. 2023; Chen et al. 2024; USGS.

volumes de déchets de l'industrie extractive. De plus, elle ne s'inscrit pas dans la réglementation relative à l'économie circulaire, alors que cela pourrait permettre de meilleurs prévention, gestion et recyclage des déchets miniers. La littérature étudiée mériterait ainsi d'être actualisée, notamment en envisageant de fixer des objectifs fondés sur une analyse du cycle de vie.

Une intégration de l'extraction des ETR dans les stratégies de gestion de ces résidus pourrait contribuer à réduire l'impact environnemental du stockage tout en

généralisant une valeur ajoutée dans une approche d'économie circulaire. Il ressort de l'analyse que très peu d'études ont tenté d'estimer les stocks de ressources secondaires en Europe. Des efforts importants restent nécessaires en matière de recherche et développement afin d'identifier des solutions efficaces et efficientes en intégrant les dimensions sociales, économiques et juridiques explicitées en IV.3. De plus, il est essentiel que ces solutions, pour être viables et compatibles avec un développement durable crédible, reposent sur une connaissance contextuelle de chaque site minier ou projet minier considéré (Tayebi-Khorami et al., 2019).

IV.2 L'existence de procédés innovants, environnementalement respectueux

L'essentiel

L'extraction des ETR repose sur une adéquation étroite entre la minéralogie du gisement et une chaîne de procédés combinant enrichissement, traitements physico-chimiques et chimico-métallurgiques. La sélection de ces procédés appelle une optimisation intégrée « ressource-procédé-environnement », fondée sur l'hydrométallurgie circulaire et le recyclage interne des réactifs (Binnemans et Jones, 2023), afin de concilier sécurisation des approvisionnements et exigences de durabilité.

L'impact environnemental de l'extraction primaire varie selon le type de minerai : la bastnaésite et la monazite sont particulièrement consommatrices en énergie et en réactifs, tandis que l'eudialyte (silicate d'ETR) qui constitue les réserves de Norra Kärr en Suède, présente un profil nettement plus favorable.

Au-delà de l'extraction à partir de minerais primaires, la littérature analysée en sciences expérimentales permet d'identifier des solutions innovantes, comme la valorisation de sources secondaires tels que les déchets miniers (charbon, bauxite, phosphogypse), ou le recours à des procédés plus respectueux de l'environnement comme la biolixiviation, le phytominage et les approches zéro-déchet. Ces sources secondaires, en grandes quantités sur le territoire français et/ou européen, pourraient limiter le recours à l'extraction primaire en favorisant des pratiques circulaires.

Cependant, ces technologies restent encore peu matures et peu testées industriellement, rendant leur déploiement incertain sans l'engagement clair du secteur minier.

Nouvelles pistes de techniques d'exploration

Les technologies d'exploration pour **découvrir et caractériser de nouveaux gisements** en ETR reposent sur un éventail de méthodes géologiques²⁸, géophysiques²⁹, géochimiques³⁰ et minéralogiques³¹. Elles évoluent constamment, améliorant la résolution analytique en détection des

concentrations, en échelles spatiales et volumétriques, ainsi qu'en rapidité des mesures (Balaram, 2022). Les échelles d'analyse varient fortement selon les méthodes. Elles peuvent couvrir de vastes régions grâce à la télé-détection ou aux mesures aéroportées, mais aussi cibler la localisation des métaux à l'échelle microscopique d'un minéral. Les **méthodes géophysiques** sont essentielles

²⁸ Structures tectoniques, présence de roches associées aux gisements ciblés.

²⁹ Anomalies magnétiques, gravimétriques, électromagnétiques, etc.

³⁰ Concentrations anormales d'éléments indicateurs de la présence d'ETR.

³¹ Identification des minéraux porteurs des métaux ciblés.

pour détecter les gisements en première approche et révéler la géométrie des discontinuités en profondeur qui délimitent les gisements. Elles nécessitent ensuite d'être complétées par l'éventail des **analyses géochimiques et minéralogiques** pour caractériser les concentrations et confirmer le potentiel de récupération des métaux. Parmi les développements les plus remarquables des dernières années, apparaît la tendance à la miniaturisation des outils analytiques qui peuvent ainsi être apportés sur le terrain et qui avoisinent les résolutions des méthodes traditionnelles en laboratoire (V. Balaram, 2019). Un des objectifs principaux de ces méthodes est de découvrir de nouveaux gisements (Malainine et al., 2022), notamment de carbonatites qui sont les formations géologiques aux plus forts potentiels en ETR (Simandl et Paradis, 2018), mais aussi de préciser la minéralogie pour améliorer l'efficacité d'extraction.

Les différentes méthodes fournissent des informations complémentaires qui représentent d'immenses jeux de données (Nykanen et al., 2008). Leur intégration est indispensable, car aucune méthode isolée ne permet de déterminer à la fois les concentrations et volumes des gisements et la nature minéralogique spéciation des ETR d'un gisement. **En combinant ces données géologiques, géophysiques, géochimiques et minéralogiques dans des systèmes d'information géographiques, l'intelligence artificielle peut reconnaître des signatures spatiales et minérales complexes associées aux gisements d'ETR** — par exemple distinguer une carbonatite enrichie en bastnäsité d'une autre stérile — et ainsi améliorer la prédiction et la hiérarchisation des cibles d'exploration. Avec son essor fulgurant, il devient difficile d'anticiper l'ampleur de son impact sur de nouvelles découvertes de gisements et sur les procédés de séparation attenants, et donc la révolution qu'elle pourrait générer sur l'exploration et l'exploitation des minerais et des ETR dans les années à venir (Katiyar et al., 2024).

Extraction des ETR à partir de sources primaires

La littérature scientifique converge pour indiquer que **l'extraction des ETR repose sur un ajustement fin entre la minéralogie du gisement et une séquence de procédés qui combine enrichissement physique et physico-chimique ainsi que traitements chimico-métallurgiques dans une perspective de circularité essentielle** (plus de 120 articles, dont 35 études focalisées entre 2020 et 2023). À la différence des opérations en tête de procédé pour le recyclage des ETR des déchets urbains (voir III.2), la tête de procédé d'extraction minière fait intervenir des étapes d'enrichissement par broyage, gravimétrie, deschlammage,

étape magnétique et/ou flottation particulière avant traitement thermique et/ou lixiviation puis séparation/purification, opérations qui présentent de grandes similarités avec le recyclage. Les articles de référence sur des minéraux issus de carbonatites (la bastnäsité (carbonate d'ETR) et la monazite (phosphate d'ETR)) (Cen et al., 2021; Demol et al., 2019) soulignent qu'un compromis doit être trouvé entre rendements métallurgiques, consommation de réactifs et gestion des effluents fluorés ou radioactifs (substances toxiques et polluantes).

Si les approches classiques restent robustes, une douzaine de travaux (2020-2023) montrent que les étapes de prétraitements associant micro-ondes, l'emploi d'agents chimiques « verts »³² ou la récupération de sous-produits valorisables (CaF_2 , Na_3PO_4) peut réduire de 20 à 40 % la charge réactive et les émissions associées et s'inscrire dans une perspective de circularité³³. La sélection des procédés est pilotée par la nature du gisement, ce qui appelle à une optimisation intégrée « ressource-procédé-environnement », fondée sur l'hydrométallurgie circulaire (Binne-mans et Jones, 2023) et le recyclage interne des réactifs, afin de concilier sécurisation stratégique de l'approvisionnement en ETR et exigences sociétales de durabilité. Une douzaine de travaux centrés sur les argiles ioniques capables de retenir un dépôt d'ETR indiquent que les solutions à base d'ammoniac, bien que performantes, nécessitent aujourd'hui des alternatives à plus faible impact environnemental (Luo et al., 2022).

Les méthodes d'analyse du cycle de vie permettent de documenter et de quantifier les impacts environnementaux créés par la production des ETR à différentes échelles, du local au global. Cependant, les études actuelles présentent des divergences en raison de bases de données disparates et de méthodes et de données souvent incomplètes, notamment pour les chaînes d'approvisionnement chinoises (Wulf et al., 2017). Les recherches montrent que des gisements européens, tels que Norra Kärr en Suède, offrent une alternative plus propre avec jusqu'à 40 % d'impacts en moins que la mine chinoise de Bayan Obo (Schreiber et al., 2016). La performance environnementale dépend fortement du type de minerai extrait : la bastnäsité et la monazite nécessitent par exemple beaucoup de réactifs chimiques et d'énergie, tandis que l'eudialyte (silicate d'ETR), présente à Norra Kärr, offre de meilleurs résultats (Bailey et al., 2020; Zapp et al., 2018). De nouvelles pratiques, comme l'utilisation de l'hydroélectricité dans les procédés, permettent de réduire significativement les émissions de CO_2 . Enfin, les études récentes soulignent les limites des approches purement environnementales, en insistant sur la **nécessité d'intégrer les dimensions socio-économiques et géopolitiques dans les évaluations de durabilité**. Des modèles récents intégrant les contraintes

³² Un « agent chimique vert » est une substance (réactif, solvant, catalyseur ou additif) utilisée dans un procédé chimique dont la production, l'utilisation et la dégradation minimisent l'impact négatif sur la santé humaine et l'environnement, tout en maintenant une efficacité chimique et économique équivalente ou supérieure aux alternatives conventionnelles. En d'autres termes, il vise à réduire la toxicité, la dangerosité, la production de déchets et la consommation de ressources non renouvelables.

³³ Une partie des déchets produits est éliminée en valorisant leurs propriétés : CaF_2 (fluorine) comme source de fluor ou matériau pour l'optique (IR, UV) et Na_3PO_4 comme source de phosphore pour les fertilisants.

géopolitiques d'approvisionnement révèlent que les gains environnementaux peuvent parfois déplacer la charge vers de nouvelles vulnérabilités économiques³⁴, soulignant ainsi la nécessité d'intégrer les dimensions socio-économiques et géopolitiques dans les évaluations de durabilité (Gemechu et al., 2017). Des outils comme l'indicateur GeoPolRisk³⁵ ouvrent des pistes intéressantes pour combler ce manque, en reliant les impacts environnementaux aux vulnérabilités économiques des marchés. Néanmoins, des efforts supplémentaires sont requis pour harmoniser les méthodologies d'ACV, enrichir les inventaires de données (notamment pour les gisements émergents) et développer des scénarios prospectifs intégrant les évolutions des politiques énergétiques et commerciales. À terme, une approche combinée, croisant les enjeux environnementaux, sociaux et économiques dans le cadre de la méthodologie de l'analyse de la durabilité du cycle de vie, semble indispensable pour accompagner le développement d'une chaîne d'approvisionnement en ETR plus durable et résiliente.

Biolixiviation

À l'instar de la biolixiviation mise en œuvre pour la mine urbaine (section III.2), cette approche représente également **une voie émergente et prometteuse pour une extraction durable des ETR à partir de diverses sources, qu'il s'agisse de minerais primaires ou de déchets miniers et industriels**. Elles utilisent des micro-organismes qui facilitent la solubilisation des ETR en attaquant la matrice minérale (Brisson et al., 2016; Castro et al., 2023; Fathollahzadeh et al., 2018). Elle offre une alternative plus respectueuse de l'environnement que les procédés chimiques conventionnels en réduisant la quantité d'agents de lixiviation, en nécessitant moins d'énergie, et en générant moins de déchets polluants (Chen et al., 2024; McGaughey et al., 2025). Un minéral comme la monazite présente des défis liés à la co-présence de thorium, un élément radioactif, mais elle reste l'un des minéraux les plus étudiés pour sa forte concentration en cérium, lanthane et néodyme (He et al., 2024). Des avancées notables ont été réalisées dans l'optimisation des paramètres biologiques et opérationnels, tels que le pH, la température, ou encore la co-culture de micro-organismes, pour augmenter les rendements d'extraction (Fathollahzadeh et al., 2018; McGaughey et al., 2025). Par ailleurs, combiner ces approches avec l'utilisation d'autres techniques comme l'hydrométallurgie, permet d'accroître l'efficacité du procédé (par ex. Vera et al., 2022). Comme pour tous procédés d'extraction, l'efficacité de la biolixiviation dépend de la nature minéralogique du gisement. Si certaines matières premières, comme les argiles ioniques, montrent des taux de récupération pouvant atteindre 95 à 100 % (Meng et al., 2023, 2022),

d'autres comme la bastnäsite affichent encore des rendements faibles, nécessitant des recherches supplémentaires (Zhang et al., 2018). Ainsi, bien que la biolixiviation soit encore en phase de développement, elle représente une **voie technologique stratégique pour l'exploitation plus propre et efficiente des ressources en ETR**.

Phytominage

Le phytominage, ou agrominage, constitue également une stratégie écologique prometteuse (Dinh et al., 2022; Rabbani et al., 2024). Cette méthode repose sur l'utilisation de plantes « hyperaccumulatrices³⁶ » capables d'absorber de fortes concentrations d'ETR sans toxicité apparente (Chour et al., 2020; Grosjean et al., 2024). Après récolte, la biomasse végétale est traitée pour extraire les métaux (Chour et al., 2018; Jally et al., 2021; Xie et al., 2023). Ce procédé, **plus respectueux de l'environnement** que les techniques minières classiques, permet aussi de **valoriser des sources secondaires** comme les cendres volantes ou les résidus miniers (Peiravi et al., 2021), tout en contribuant à la réhabilitation des sols dégradés (van der Ent et al., 2015). Les mécanismes complexes utilisés par ces plantes sont encore mal compris et nécessitent des recherches approfondies sur le rôle du microbiote de leurs racines ainsi que sur la sélection génétique de plantes performantes (Jalali et Lebeau, 2021; McGaughey et al., 2025; Grosjean et al., 2024). Bien que majoritairement orientées vers les ETR légers, ces recherches doivent aussi s'ouvrir aux ETR lourds, plus rares et stratégiques (Grosjean et al., 2020). Encore à un stade préindustriel, cette approche pourrait devenir économiquement viable dans un contexte de tensions géopolitiques et de prix élevés, notamment si elle est intégrée à des bioraffineries territorialisées et validée par des essais à grande échelle et des analyses de cycle de vie (Rabbani et al., 2024).

Séparation et purification des ETR

Les travaux récents sur la séparation et la purification des ETR révèlent une profonde structuration du champ technique, enrichie par des décennies d'optimisation industrielle de procédés éprouvés et par l'émergence de solutions plus durables. La modularité des circuits d'extraction, la diversification des extractants et les combinaisons synergiques de familles chimiques permettent d'affiner les séparations sans compromettre ni le rendement ni la pureté, même face à des gisements de composition variable. Cette flexibilité opérationnelle apparaît aujourd'hui comme un levier stratégique, non seulement pour **réduire le nombre d'étapes de traitement**, mais aussi pour **ajuster les procédés aux contraintes spécifiques** de chaque filière.

³⁴ La vulnérabilité économique exprime la probabilité que l'économie d'un pays puisse être entravée par des phénomènes imprévus et extérieurs au système économique.

³⁵ GeoPolRisk est une méthode pour quantifier les risques géopolitiques pour l'approvisionnement d'une matière première en fonction de la concentration de la production mondiale de la matière première et des parts d'importation du partenaire commercial pondérées par leur instabilité politique.

³⁶ Par exemple, *Dicranopteris linearis* ou *Phytolacca americana*.

Par ailleurs, les solvants émergents introduisent de nouvelles logiques de conception fondées sur la **sélectivité des ETR et la sobriété en réactifs** (par ex. Alemrajabi et al., 2022; Arrachart et al., 2021; Zeng et al., 2023). Les études récentes soulignent leur potentiel de réduction significative des émissions fluorées ou radioactives, tout en conservant des performances de récupération acceptables. Ces approches, encore limitées à l'échelle du laboratoire, offrent néanmoins des perspectives crédibles à moyen terme, en particulier pour le traitement de sources secondaires. Leur intégration dans des chaînes de valorisation existantes suppose un effort soutenu d'optimisation technico-économique et une meilleure compréhension des mécanismes moléculaires et supramoléculaires impliqués.

La littérature actuelle converge également sur l'importance d'intégrer des innovations **localement adaptées**. Les travaux menés en Europe, par exemple, mettent en évidence l'intérêt de filières intégrées combinant flottation, lixiviation et procédés hybrides, afin de valoriser des gisements régionaux jusqu'alors peu exploités. La complexité technique croissante, loin d'être un obstacle, devient un terrain d'opportunités : elle encourage la diversification des solutions, la personnalisation des procédés, et l'émergence de stratégies plus résilientes. Ce champ en mutation appelle une coordination renforcée entre la recherche académique, l'industrie et la politique publique, afin de structurer une filière ETR à la fois performante, propre et stratégiquement autonome.

Réduction, purification ultime et production de métaux

Les procédés décrits plus haut permettent d'obtenir des oxydes d'ETR. Pour les convertir enfin en métaux d'ETR, il manque de les « réduire » (éliminer l'oxygène). Ce processus est complexe en raison de leur stabilité chimique et de leurs propriétés physiques (point de fusion élevé, faible pression de vapeur). Les voies courantes consistent à utiliser du calcium ou le lithium comme agents réducteurs, ou des substances liquides conductrices. L'utilisation du fluor, bien qu'énergétiquement favorable et adaptée à l'obtention de produits très purs, reste onéreuse. Pour certains ETR volatils (lanthane), des réductions directes par voie thermique sont envisageables. Enfin, les procédés hybrides tels que la réduction-extraction en bain salin ou la récupération sous forme d'alliages ouvrent des perspectives d'optimisation technico-économique pour une production à grande échelle.

Les ETR réduits sont généralement purs à 98-99 %, mais les recherches de pointe et certaines applications technologiques nécessitent des ETR « ultrapurs » (99,99 %). Une séquence de traitements supplémentaire, notamment la "pyrovide" qui consiste à chauffer le métal à des températures proches de son point de fusion sous vide, permet d'atteindre ces taux de pureté.

L'arbitrage entre pureté, rendement, coût énergétique et faisabilité industrielle conditionne le choix des voies de réduction. Si certaines méthodes apparaissent plus adaptées à des productions de niche, d'autres semblent porter les meilleures promesses pour une valorisation à grande échelle. Cette évolution nécessite néanmoins un

suivi rigoureux des avancées scientifiques et des paramètres industriels, afin d'orienter les futures innovations vers des solutions réellement transposables à l'échelle industrielle.

Extraction des ETR à partir de sources secondaires

Comme mentionné précédemment, les résidus de bauxite, le phosphogypse et les cendres de charbon sont trois sources secondaires d'ETR décrites par de nombreuses études comme étant à fort potentiel (voir IV.1 ou plus largement dans le rapport de l'ESCo). Même si les **concentrations en ETR sont relativement faibles** (0,04-0,25 %) par rapport à un gisement primaire ou certains produits en fin de vie (aimants permanents par exemple). **Les quantités de ces résidus générées annuellement à l'échelle mondiale sont très importantes**, représentant donc un stock non négligeable d'ETR qu'il est cependant difficile à chiffrer à partir de la littérature. De plus, **ces résidus sont déjà extraits et broyés, limitant ainsi les étapes les plus énergivores de préparation du minerai**. Enfin la dispersion de ces stocks sur l'ensemble de la planète en fait des sources secondaires particulièrement stratégiques pour les pays ne possédant pas de minerais primaires d'ETR.

De nombreuses approches dites « classiques » d'extraction des ETR ont été développées dans la littérature pour ces 3 résidus qui combinent en grande majorité des **approches d'hydrométallurgie et de pyrométallurgie**. Néanmoins, ces procédés développés historiquement sur les minerais primaires ne sont pas toujours adaptés à ce type de gisements plus dilués et génèrent de nombreuses externalités négatives (consommation importante d'acides minéraux et solvants organiques toxiques, génération de quantités importantes de déchets, consommation importante d'énergie pour les étapes de pyrométallurgie, etc.).

Cependant, ces 15 dernières années, quelques études innovantes ont été développées afin de réduire l'impact environnemental global de l'extraction. La plupart des études **visent à augmenter les rendements et la sélectivité pour limiter ainsi le nombre d'étapes et de réactifs utilisés**. Une seconde stratégie consiste à **développer des approches zéro-déchet** dans le but d'éviter les nombreux coûts (économiques, sociaux, environnementaux) associés au stockage des résidus.

Les conclusions principales de ces études montrent que :

- Les approches de prétraitements sont peu efficaces, probablement à cause de la granulométrie fine des résidus et leur hétérogénéité (variant en fonction de l'origine géologique).
- L'utilisation d'extractants non conventionnels, tels que des acides organiques en substitution d'acides minéraux, permet d'obtenir des rendements similaires (Borra et al., 2015). Les conditions d'extraction sont alors moins extrêmes (acide et pH) et une meilleure sélectivité peut être atteinte. La pyrométallurgie

permet d'améliorer le rendement d'extraction des phases les plus récalcitrantes avant d'employer les procédés hydrométallurgiques. Ce couplage permet également une meilleure sélectivité (testé principalement avec des cendres de charbon et des résidus de bauxite). L'étape de pyrométallurgie permet également de libérer du Sc dont le prix est au même niveau que les ETR les plus chères (Lu, Tb) (700-900 \$/kg en mars 2025), mais avec des concentrations 2 à 3 ordres de grandeur supérieures à ces derniers dans les résidus de bauxite (150 g/t, Zhang et al., 2016). Son extraction pourrait contribuer à une meilleure rentabilité du procédé d'extraction.

- Les rendements et les sélectivités sont parfois complexes à comparer d'une étude à l'autre, car ils dépendent beaucoup de l'origine du résidu et donc de la forme chimique des ETR.
- La biolixiviation est également efficace pour une récupération durable et sélective des ETR dans ces déchets industriels.
- La faisabilité d'une valorisation multi-élémentaire (ETR, fer, titane, vanadium, etc.) des résidus est techniquement démontrée (Zinoveev et al., 2021). En revanche, ces procédés sont complexes et intègrent de nombreuses étapes de pré-traitement, hydro- et pyrométallurgique et ne sont pas pensés pour être à faible impact environnemental.
- Même sans extraction multi-élémentaire, la valorisation du résidu en tant que tel après extraction constitue également une alternative prometteuse.

À titre d'exemple, le phosphogypse peut être valorisé comme additif dans le ciment après extraction des ETR, réduisant ainsi le coût d'exploitation. Toutefois, les études sur ce sujet demeurent très limitées.

En définitive, l'ensemble de la littérature analysée met en évidence des avancées significatives en termes **(1) d'amélioration des rendements et de la sélectivité d'extraction des ETR (2) de développement de procédés pour valorisation complète des résidus avec des approches zéro déchet novatrices.**

Cependant plusieurs aspects manquent encore pour le développement technologique de ces procédés :

- **Leur développement reste à l'échelle du laboratoire** (parfois même conceptuel) et dans la grande majorité des cas, les études se focalisent sur une seule étape du procédé. Des approches de génie de procédés sont quasiment inexistantes dans la littérature. Il n'existe pas encore de technologies intégrées rentables pour le recyclage complet à l'échelle industrielle pour ces 3 résidus.
- **Les considérations environnementales et économiques de tels procédés sont encore limitées** (Zinoveev et al. 2021) et ne sont pas ou peu étudiées au regard des pratiques actuelles. Des études comparatives techno-économiques et d'impact environnemental entre ces approches et le scénario actuel qui consiste à stocker ces résidus manquent pour identifier les voies les plus efficaces. Même si quelques tentatives très incomplètes ont été réalisées (par ex. Borra & al. 2016) ces études sont complexes à mener pour des technologies peu matures (TRL bas).

IV.3 L'intégration des considérations humaines et environnementales dans l'extraction

L'essentiel

La littérature étudiée en sciences humaines et sociales insiste sur la dimension sociale, politique et territoriale de l'extraction, soulignant l'importance de la participation citoyenne, de la co-construction des projets, et de la prise en compte des retombées et externalités. La littérature analysée confirme que les objectifs de transition énergétique ne peuvent s'ancrer localement que s'ils sont partagés.

Le droit minier connaît des évolutions importantes (devoir de vigilance par exemple) qui durcissent les exigences de responsabilité sociale et environnementale (RSE) des entreprises minières. Un tel durcissement a vocation à permettre une extraction plus responsable des minerais tout au long de la chaîne de valeur. Cette évolution ne concerne pas uniquement la relocalisation des mines en Europe, mais bien, également, les conditions dont sont produites ou extraites les ETR dans d'autres pays pour ensuite être importées en Europe.

Néanmoins, l'analyse de la littérature sur l'acceptabilité sociale des mines rappelle que les contestations émergent fréquemment de l'absence d'un débat préalable, sincère et ouvert, sur l'opportunité même de développer de nouvelles mines : des mines pour quoi faire, et au bénéfice de qui ? Les travaux sur les controverses minières montrent qu'elles ne sont pas résolues par de simples démarches pédagogiques ou compensatoires destinées aux populations locales affectées. Ils soulignent en effet la nécessité de relier les choix en matière d'extraction aux usages et aux besoins réels des métaux extraits. C'est pourquoi la sécurisation de l'approvisionnement en ETR est difficilement envisageable indépendamment d'un débat démocratique sur les usages à encourager, réduire ou abandonner.

La littérature en sciences humaines et sociales relative à l'intégration des considérations humaines et environnementales dans l'extraction minière ne concerne pas directement et spécifiquement le cas des ETR. En effet, **bien que les ETR présentent des spécificités, les règles relatives à leur extraction sont les mêmes qu'en ce qui concerne les autres métaux.** D'ailleurs, elles sont souvent extraites en tant que « co-produits », c'est-à-dire qu'elles sont associées à d'autres métaux lors de leur extraction. Comme cela a été opéré dans le chapitre II, une réflexion quant à la pertinence et la possible **transposition** de la littérature générale au cas concret des ETR a dû être faite : l'état de l'art réalisé dans ce chapitre IV de la synthèse et dans celui du rapport porte nécessairement sur le régime et le contexte applicables à la mine et à la chaîne de valeur associée en général, **la littérature se focalisant exclusivement sur le cas des ETR étant très rare.**

L'émergence des exigences de « responsabilité sociale » et de « durabilité » : des mots d'ordre limités pour extraire autrement

Depuis les années 1990, le secteur minier a connu une transformation dans ses modes de régulation, avec l'essor de la **Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE)**

(Jenkins, 2004). Cette dynamique est fondée sur des normes volontaires, des dispositifs d'autorégulation et des **standards internationaux incitatifs, non contraignants et provenant principalement du secteur extractif lui-même.** Ces normes et standards permettent aux entreprises de démontrer (notamment auprès de leurs investisseurs) un engagement en matière sociale et environnementale et une prise en compte de la dimension sociale tout en gardant le contrôle des modalités de la mise en œuvre de cet engagement.

En dehors de ces cadres de durabilité, des initiatives sont proposées pour **tenter de rendre visibles les enjeux liés aux relations sociales dans les projets miniers.** Par exemple, Bergeron et al. (2016) ont développé un cadre analytique visant à objectiver les conditions de l'acceptabilité sociale des projets miniers, afin de rendre tangible le « risque social » que les conflits font courir aux projets. Leur « indice du risque social » articule quatre dimensions : (I) la communauté d'accueil, (II) l'entreprise promotrice, (III) la nature du projet et du milieu naturel, et (iv) la dynamique communicationnelle entre les parties prenantes. Chaque dimension se compose de variables (proximité des populations, antécédents sociaux, crédibilité, transparence, sensibilité écologique, etc.) dotées de poids spécifiques selon leur importance relative dans le

contexte québécois. Un des cas analysés est celui de la mine Canadian Malartic (Osisko-Malartic). Ce projet à ciel ouvert, localisé à proximité immédiate de la ville de Malartic, a nécessité la relocalisation de plusieurs habitations, la reconfiguration de portions du territoire urbain, et a généré des nuisances (bruit, poussières, vibrations, trafic accru). L'application de l'indice à ce cas a permis de montrer que plusieurs indicateurs de risque social étaient élevés : la forte proximité résidentielle de la mine, l'historique d'inquiétude au sein de la communauté concernant les impacts environnementaux et sanitaires de la mine, la communication perçue comme insuffisamment transparente dans les premières phases, de même que les modifications spatiales importantes réalisées (relocations, destructions de bâtiments). Ces facteurs conjugués ont engendré des effets psychologiques, des tensions communautaires, une polarisation (entre partisans et opposants), et un sentiment de perte ou de perturbation du cadre de vie, qui ne se reflètent pas dans l'indicateur de risque social. Des efforts de transparence, de consultation et de compensation ont contribué à stabiliser le climat social, bien que le projet étant déjà lancé, il n'ait pas été modifié en fonction des retours des habitants. Il ressort notamment de l'étude que les projets perçus comme imposés ou opaques suscitent une forte opposition, tandis que ceux fondés sur la concertation et la communication ouverte bénéficient d'une meilleure acceptabilité. Cette initiative a été **fortement critiquée par la littérature**. Elle s'inscrit dans la perspective de l'investissement minier, qui **perçoit la société comme un risque pour le projet**. Du point de vue des porteurs de projets et des investisseurs, ce risque peut être mesuré par une série d'indicateurs et peut être anticipé. L'exemple de Bergeron et al. (2016) fournit une illustration d'une façon de mesurer le risque social qui intègre de nombreux paramètres et est censé intervenir en amont des projets. Destiné aux entreprises minières, il fonctionne uniquement dans le périmètre d'un projet dont l'opportunité n'est pas débattue.

Cette initiative peut être située dans un **mouvement plus général, qui a fait de la RSE un élément incontournable des projets miniers**. Elle repose sur plusieurs outils et principes non-contraignants (par ex. la norme ISO 26000, les principes posés par l'ONU et l'OCDE sur le devoir de vigilance) et comprend des approches comme la transparence, la traçabilité, la cartographie des impacts, des plans de remédiation et des mécanismes de résolution des litiges. Ces principes sont souvent mis en œuvre via des guides sectoriels visant à définir des « bonnes pratiques ».

Au-delà de la RSE, **d'autres initiatives structurantes ont vu le jour pour créer des indicateurs et des standards internationaux comme le projet Mining, Minerals and Sustainable Development (1999) aujourd'hui très utilisé**. Des cadres tels que les « Seven Questions to Sustainability » ou ceux développés par la Mining Association of Canada proposent des grilles d'évaluation fondées sur l'engagement communautaire, la gouvernance, l'économie locale ou encore la protection de l'environnement (Fonseca et al., 2013). Ces indicateurs s'orientent vers le concept désormais central de la **licence sociale d'opérer** (SLO), dans lequel l'acceptation par les communautés locales est devenue aussi déterminante que la licence légale délivrée par l'État (Komnitsas, 2020 ; Prno et Scott Slocombe, 2012 ; Roche et al., 2023).

Toutefois, de nombreux travaux mettent en évidence les limites des normes, des standards et des « bonnes pratiques » utilisés dans le secteur extractif, à partir d'études réalisées sur des cas qui dépassent celui des ETR (Dou et al., 2023 ; Fonseca et al., 2013 ; Kamenopoulos et al., 2015). La littérature montre que les cadres existants souffrent souvent d'un manque d'intégration systémique, de la difficulté à prendre en compte les effets à long terme (les pollutions inhérentes à l'extraction par exemple) et d'un focus trop restreint sur la performance organisationnelle, qui en pratique ne prend généralement pas en compte les spécificités territoriales. Les critiques relèvent aussi les **effets d'exclusion produits par les mécanismes participatifs, qui tendent à simplifier la complexité des situations locales et à imposer des interlocuteurs légitimes aux yeux des entreprises, parfois au détriment des structures sociales existantes** (Murrey et Jackson, 2020). Certains articles analysés soulignent que les initiatives menées au nom de la RSE peuvent générer une dépendance économique des populations locales ou masquer les causes profondes des oppositions sociales (Bezzola et al., 2022 ; Jenkins et Obara, 2006). Par ailleurs, certains auteurs (dont Kamenopoulos et al., 2015) interrogent l'adaptation des indicateurs et standards aux spécificités des ETR (présence d'éléments radioactifs, particularités entre les différents ETR, caractéristiques de marché, monopole chinois, etc.). De même, ces « best practices » sont souvent d'application universelle, alors même que les questions environnementales et sociales peuvent être différentes selon les territoires ou les produits miniers sur ces territoires, ce qui pose la question de leur adaptation aux spécificités locales. En conséquence, **les approches menées au nom de la responsabilité ou de la durabilité demeurent contestées** (Laurent, 2023 ; Merlin et al., 2021 ; Wszkalnys, 2014).

Si les industries extractives se sont saisies des notions de responsabilité et de durabilité pour introduire des mécanismes visant à prendre en compte volontairement les impacts environnementaux et sociaux des projets miniers, par le biais d'un « droit souple » (« *soft law* », c'est-à-dire non contraignant) largement promu par les institutions internationales telles que la Banque Mondiale, **cette évolution reste ainsi fondamentalement ambivalente**. En effet, les acteurs de l'extraction ont bien intégré des exigences de responsabilité et de durabilité, parfois jusqu'à promouvoir des concepts comme ceux de « mine durable » ou « mine responsable », mais l'absence de véritable suivi et de sanctions en cas d'absence de mise en œuvre en pratique des recommandations qui en découlent n'en permet pas une application réellement effective et n'incite pas à une action poussée.

Les travaux analysés critiquent la naturalisation des termes « responsabilité » et « durabilité », et mettent en évidence le problème que pose le fait de les considérer comme neutres ou consensuels. Ils invitent à les interroger, à les replacer dans leur contexte politique et social, et à explorer les voies d'une extraction qui assumerait pleinement ses enjeux et ses implications, en se confrontant explicitement à la conflictualité des projets miniers.

ZOOM : Les impacts néfastes d'un cadre réglementaire faible : exemple de certaines mines d'extraction des ETR

Les impacts environnementaux de l'exploitation minière peuvent être exacerbés dans les zones où elle est mal réglementée (Harpprecht et al., 2024; Langkau et Erdmann, 2021). L'extraction des ETR conduit à une pollution par des substances radioactives et de différents métaux. Certains sites d'extraction utilisent des procédés à base de produits chimiques polluants, comme la lixiviation acide, qui entraîne une forte contamination des sols et des cours d'eau. Par ailleurs, l'exploitation minière illégale correspond à environ 22 à 25 % du volume de l'extraction chinoise d'ETR, contribuant à des risques sociaux tels que la corruption, la concurrence déloyale, la protection des travailleurs ou le travail des enfants (Werker et al., 2019). Par exemple, la mine chinoise de Bayan Obo a enregistré un risque de corruption publique deux fois plus élevé que de celui de Mount Weld (Australie-Malaisie) et cinq fois plus que Mountain Pass (US-Japon). La loi chinoise sur les terres rares, promulguée le 22 juin 2024 (Ordonnance du Conseil des Affaires d'État n°785) vise notamment, dans ce contexte, à renforcer la lutte contre ce phénomène, en stipulant que les ressources en terres rares appartiennent à l'État, en imposant des sanctions pour les activités illégales tout au long de la chaîne de valeur et en prévoyant un système de traçabilité des produits (les entreprises doivent enregistrer les flux des produits dans un système de suivi).

Le « durcissement » et l'adaptation du cadre juridique en réponse aux insuffisances de la RSE

Des évolutions récentes du droit international conduisent à appliquer celui-ci directement aux entreprises sans passer par les États (d'Ambrosio, 2021; Lhuillier, 2022). La directive européenne sur le **devoir de vigilance** (UE 2024/1760), bien qu'elle connaisse actuellement un assouplissement à l'échelle européenne, incarne ce tournant en imposant aux entreprises de **respecter des normes internationales tout au long de leur chaîne de valeur, y compris dans des pays tiers**. La directive impose en effet aux entreprises de respecter une liste de conventions internationales ou d'obligations issues de ces conventions, y compris dans les États qui ne les ont pas ratifiées. Elle renvoie ainsi à l'Accord de Paris (1992), au Pacte international sur les droits civils et politiques et au Pacte international relatif aux droits économiques, sociaux et culturels (1966) ou encore à la Convention sur la diversité biologique (1992). Les incidences négatives sur l'environnement doivent faire l'objet de mesures de prévention ou de réparation tout au long de la chaîne de valeur. Cela marque une rupture avec le droit international classique, exclusivement interétatique. L'entreprise devient à la fois sujet et agent du droit international, dans une logique

d'application extraterritoriale des droits fondamentaux, ce qui implique qu'elle peut être sanctionnée en cas de manquement à ces obligations.

Les États intègrent par ailleurs dans leur droit national les principes de démocratie environnementale issus du droit international (par ex. la Déclaration de Rio de 1992 ou la Convention d'Aarhus de 1998), comme l'accès à l'information, la participation du public et l'accès à la justice. En France, ces principes ont valeur constitutionnelle via l'article 7 de la Charte de l'environnement. Depuis 1976, plusieurs lois ont institué des dispositifs de participation, comme des dispositifs de consultation et de participation du public.

La réactualisation de l'ambition de responsabilité (sociale) et de durabilité par la transition énergétique, source de nouvelles asymétries

La transition énergétique ravive l'intérêt pour l'extraction minière, dont celle des ETR (Roche et al. 2023). Elle est au cœur du discours de la relance minière en Europe, mais cette association produit des conséquences ambivalentes du fait des tensions environnementales et sociales que génère l'extraction (Martinez-Allier, 2002). Les politiques comme le Green Deal européen, bien qu'encadrées par des normes de durabilité, montrent des contradictions entre objectifs écologiques et réalités extractives (cf. chapitre II). Le cas du lithium au Portugal tel qu'analysé par plusieurs articles de l'ensemble étudié montre que la relance de l'extraction au nom de la souveraineté énergétique se heurte à des contestations locales et à l'absence de garanties environnementales et sociales jugées suffisantes par les communautés affectées (Dunlap et Riquito, 2023; Zhou et Brown, 2024). Il n'y a pas de raison objective de penser que l'extraction d'ETR (y compris par le biais de ressources secondaires) poserait des tensions sociales et environnementales différentes.

À l'échelle globale, la transition énergétique exacerbe des asymétries anciennes, où des populations — souvent autochtones — subissent les conséquences de l'extractivisme sans en bénéficier. Ce phénomène est qualifié de **« colonialisme vert »** : une dynamique où les intérêts des pays ou groupes dominants priment par rapport à ceux des territoires où sont localisées les exploitations minières (Burton et al., 2024 ; Dunlap & Riquito 2023). Canelas et Carvalho (2023) montrent que les populations locales, et en particulier les communautés autochtones, sont confrontées à la reproduction des inégalités historiques du modèle extractif colonial. Dans le même sens, Ash (2024) et Dou et al. (2023) dénoncent le fait que la charge sociale de la transition énergétique soit portée de manière disproportionnée par les populations autochtones. Au Groenland, en Suède ou au Chili, les conflits miniers révèlent comment des projets miniers sont susceptibles de **marginaliser les savoirs et droits locaux**, quand bien même ils s'inscrivent dans des objectifs liés à la transition et cherchent à appliquer des normes de responsabilité et de durabilité. Les populations locales dénoncent alors la manière dont les entreprises minières présentent les ETR comme des marchandises

mondiales, effaçant l'histoire coloniale et les réalités locales en leur affectant dès leur extraction une valeur uniquement capitalistique.

En réaction, de nombreux mouvements sociaux émergent (manifestations, blocages de mines), portés par des communautés locales qui condamnent l'instrumentalisation de la transition écologique pour justifier la poursuite de modèles extractifs destructeurs, et cela tout au long de la chaîne de valeur (Peet et Watts, 2010 ; Pim, 2021). Ces luttes, ancrées dans une histoire de résistances rurales et populaires, appellent à une vision post-extractiviste centrée sur la justice environnementale, la défense des communs et l'autonomie territoriale. Canelas et Carvalho (2023) montrent par ailleurs que les préoccupations de la justice environnementale dans l'industrie des métaux critiques ne se limitent pas aux impacts

locaux, mais elles s'étendent **au-delà des frontières et des chaînes de valeur**. Ainsi, ces luttes remettent en question l'idée que la « croissance verte » passe nécessairement par l'intensification de l'exploitation des ressources naturelles, y compris donc d'ETR.

En conclusion, si la transition énergétique apparaît aujourd'hui comme un moteur central du regain d'intérêt pour l'extraction minière, elle s'accompagne de profondes ambivalences. En mobilisant des objectifs liés à la souveraineté et des notions comme la « croissance verte », la transition justifie de nouvelles dynamiques extractives sans pour autant résoudre les tensions sociales, politiques et écologiques qu'elles génèrent. Ce contexte de transition, loin d'apaiser les conflits, tend à les exacerber en reproduisant des asymétries anciennes et en suscitant des résistances locales face à l'instrumentalisation d'un impératif écologique. **Pourtant, l'objectif de transition pourrait ouvrir la voie à une manière radicalement différente d'envisager l'extraction quel qu'en soit le lieu, à condition de re-politiser les choix qu'elle implique : que faut-il extraire, pour quels usages, au bénéfice de qui, et à quel coût social et environnemental ?** La littérature étudiée invite à se saisir de ces interrogations pour dépasser les cadres existants de la responsabilité ou de la durabilité et ainsi imaginer des formes de gouvernance capables de rendre véritablement collectives et démocratiques les décisions relatives à l'extraction des ressources.

ZOOM : L'exemple du rejet de l'extraction de lithium au Portugal

Dunlap et Riquito (2023) examinent la manière dont les autorités et les entreprises pro-mines tentent de gagner l'acceptation des communautés locales, en employant des techniques de guerre sociale et de colonisation infrastructurelle. Le projet de la mine de lithium de Barroso, au Portugal, en voie de devenir l'une des plus grandes mines de lithium à ciel ouvert d'Europe occidentale, s'inscrit dans la stratégie de transition énergétique de l'Union européenne. Cette initiative, qui vise à réduire la dépendance européenne vis-à-vis des importations de lithium, se heurte aux préoccupations environnementales et sociales des communautés locales, particulièrement dans la région rurale de Barroso, reconnue pour son héritage agricole mondial et sa biodiversité. Les autorités portugaises, soutenues par l'UE, promeuvent l'extraction de lithium comme une solution verte, mais la communauté locale perçoit ce projet comme une menace pour son mode de vie traditionnel et son environnement. Les acteurs institutionnels et corporatifs utilisent la notion de mine verte pour légitimer des projets miniers, tout en marginalisant les besoins et la voix des populations locales. Pour faciliter l'acceptation du projet, l'entreprise Savannah Resources a manipulé les perceptions locales par des intermédiaires en employant des résidents locaux comme agents de liaison. La région, désignée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture comme un système agricole d'importance mondiale, abrite une biodiversité riche, y compris des espèces en danger (Canelas et Carvalho, 2023). Les auteurs notent que la fragmentation des habitats, causée par la construction des infrastructures minières, pourrait entraîner l'extinction de certaines espèces locales sensibles aux changements dans la qualité des eaux. De plus, la région de Barroso dépend de l'agriculture et de l'élevage pour sa subsistance. Les habitants craignent que l'exploitation minière détruise non seulement leurs terres, mais aussi leur mode de vie.

Comment mieux faire pour extraire autrement ?

Pour extraire autrement, la littérature pointe la nécessité d'envisager des moyens d'assurer la justice sociale, environnementale et épistémique. Cette dernière suppose tout d'abord de prendre en compte les savoirs traditionnels, profondément ancrés dans la connaissance des écosystèmes, mais pourtant rarement pris en compte dans la gouvernance minière (Zhou & Brown 2024 ; Canelas & Carvalho 2023 ; Ash 2024). Au-delà des compensations financières, des programmes de restauration basés sur les connaissances locales pourraient être proposés. La reconnaissance de ces savoirs, mais aussi la transparence de l'information sont décrites comme essentielles pour permettre une participation active des communautés concernées et éviter la reproduction des inégalités. Cela peut se traduire par l'utilisation d'outils technologiques fournissant des données publiques pour suivre l'évaluation environnementale des projets extractifs (comme les satellites Copernicus surveillant l'exploitation aurifère en République du Congo ; (Buschke et al., 2023) ou la mise en place de cadre réglementaire obligeant les entreprises à divulguer leurs impacts environnementaux et sociaux (par exemple en systématisant l'utilisation de la norme ITIE 2023).

Plus généralement, considérer qu'extraire autrement doit permettre de **poser les questions économiques, sociales et matérielles qui importent aux populations concernées** (qu'elles soient riveraines des sites miniers ou utilisatrices des ressources extraites) conduirait les projets miniers à s'inscrire dans une politique de transition partagée — au sens où les projets seraient associés à des décisions partagées sur les objectifs et les moyens

de la transition, mais aussi sur les implications positives et négatives des projets extractifs. La littérature analysée propose des pistes dans cette direction (par ex. Zhou & Brown 2024 ; Burtseva et Bysyina, 2019 ; Laurent 2023). Elles consistent à **repenser l'évaluation environnementale, à agir sur la production et l'accès des données et à prendre en compte l'ensemble de la chaîne de valeur**, ce qui rejoint d'ailleurs en partie les récentes évolutions juridiques caractérisant le secteur. Au-delà de ces suggestions, la littérature analysée converge vers la nécessité de repenser les modalités des choix relatifs aux projets miniers pour concevoir une extraction intégrée dans une politique

ZOOM : L'exemple du Groënland

Boetzkes et Diamanti (2023) montrent comment l'entreprise australienne Greenland Minerals Ltd (GML) tente de s'approprier les ressources groenlandaises à travers l'exploitation de la montagne Kuannersuit, en dépit des protestations de la population locale. Celle-ci dénonce la volonté de plaquer une vision occidentale du monde sur des territoires dans lesquels les ressources sont perçues différemment. Les auteurs se réfèrent aux subtilités de l'oppression, où des procédés bureaucratiques et scientifiques en apparence inoffensifs masquent des violences envers l'environnement et les habitants. Cette violence est exercée par le biais de consultations, d'études d'impact environnemental et de descriptions techniques, qui neutralisent les préoccupations locales tout en validant les projets d'exploitation. La notion de géofétichisme permet d'illustrer ces mécanismes. Il est défini comme la manière dont les entreprises minières présentent les ETR comme des biens marchands, effaçant l'histoire coloniale et les réalités locales. Dans le contexte de Kuannersuit, cette vision fétichiste transforme la montagne en un simple réservoir de minerais précieux, où la valeur marchande potentielle des minéraux est mise en avant, au détriment des risques écologiques et de la signification culturelle pour les habitants. La roche « lujavrite » est décrite par GML comme une « *host-rock* » dans leur évaluation d'impact environnemental, ce qui naturalise l'extraction en la représentant comme un processus purement géologique. En réponse, le groupe Urani Naamik lutte contre le projet d'extraction en raison des risques environnementaux et pour protéger les droits des Groenlandais sur leurs ressources. En 2021, sous l'influence des protestations, le parlement groenlandais a imposé un moratoire de cinq ans sur l'exploitation de l'uranium. Urani Naamik mène des contre-analyses pour démontrer les failles de l'étude d'impact de GML et expose les biais de leurs calculs, notamment sur les émissions de poussière radioactive réalisée par des consultants britanniques qui n'ont jamais visité Narsaq.

de **transition partagée**. Cette extraction « autre » supposerait de disposer d'une capacité collective permettant d'identifier des besoins et de s'accorder sur les meilleures façons de les remplir, et donc de mettre en discussion l'extraction au-delà du périmètre des projets miniers.

Pour conclure, l'analyse des évolutions contemporaines du secteur extractif met en lumière une tension structurante : celle qui oppose l'injonction à la durabilité et à la responsabilité sociale d'un côté, et la persistance des logiques de dépossession et d'asymétrie de l'autre. Le recours à des instruments juridiques plus contraignants, comme le devoir de vigilance des entreprises, témoigne d'une reconnaissance croissante des impacts systémiques des chaînes d'approvisionnement. Néanmoins, ces avancées normatives restent encore largement caractérisées par des logiques de gouvernance provenant d'en haut, qui peinent à intégrer pleinement les savoirs, les priorités et les droits des populations concernées à l'échelle locale. La transition énergétique, parfois désignée comme moteur de la « croissance verte » et menée au nom de la souveraineté, tend pourtant souvent à reconduire des formes anciennes d'extractivisme, dissimulées sous des formes discursives renouvelées. Loin de faire consensus, elle ravive des conflits, tant sur les usages des ressources que sur les modalités de la prise de décision. Par ailleurs, la littérature aborde très peu la dimension humaine et environnementale des autres étapes de la chaîne de valeur, à savoir la transformation ou le raffinage, restant généralement focalisée sur la question de l'extraction, où qu'elle se situe (et donc y compris dans le cas où elle a lieu à l'étranger mais qu'elle concerne des matières premières qui auront vocation à être importées par la France ou l'UE).

Penser une extraction véritablement responsable et durable exige de dépasser le cadre normatif actuel pour interroger les finalités mêmes de l'extraction : **pourquoi extraire, pour qui, et à quel prix ?** Cela suppose de reconnaître la pluralité des savoirs et des modes de vie affectés, et de mettre en débat, collectivement, les trajectoires de transition à construire. Une telle perspective appelle non seulement une réforme juridique, mais aussi une refonte des modes de gouvernance des minerais stratégiques et plus particulièrement des ETR, capable de restituer aux communautés concernées un pouvoir effectif de décision.

Autrement dit, **l'analyse de la littérature permet d'observer qu'« extraire autrement » ne se réduit pas à l'amélioration des pratiques existantes : il s'agit d'une transformation profonde des rapports au territoire, aux ressources, à la science et à la décision**. Cette transformation n'est décrite possible qu'en ancrant les projets extractifs dans une politique de la transition démocratique, à partir des exigences de justice sociale, environnementale et épistémique et dans un cadre juridique co-construit et ambitieux, capable de répondre à ces exigences. Une telle politique, pour être cohérente et effective, ne peut concerner que la chaîne de valeur dans son ensemble, et non pas uniquement la production européenne, et a vocation à être

généralisée à travers le monde, ce qui demeure complexe mais qui émerge progressivement, par exemple à travers le développement d'exigences de transparence et de suivi des matériaux avec le Passeport numérique des produits (voir supra, Chapitre II).

Conclusion et mise en perspective

Extraire autrement dans un objectif de renforcer la souveraineté nationale et européenne oblige *in fine* à une identification des potentiels métalliques de gisements primaires (sous-sol géologique) et secondaires (déchets industriels et déchet d'autres mines que celles d'ETR) sur le sol français et européen et à leur mise en perspective sociétale. Dans ce contexte, il est néanmoins déterminant de penser les ressources en associant les gisements géologiques et leurs potentiels économiques en lien avec les données territoriales (sociales, géographiques, démographiques, politiques). En effet, l'exploitation d'une ressource nécessite qu'il y ait un portage politique et une appropriation sociale, au-delà de la présence de gisement économiquement rentable.

Produire autrement des ETR implique en effet bien plus qu'une transition technologique. La littérature étudiée en sciences humaines et sociales insiste sur la dimension sociale, politique et territoriale de l'extraction, soulignant l'importance de la participation citoyenne, de la co-construction des projets, et de la prise en compte des retombées et externalités. La littérature analysée confirme que les objectifs de transition énergétique ne peuvent s'ancrer localement que s'ils sont partagés, mais ne fournit pas de solutions pratiques pour assurer ce lien.

La littérature analysée en sciences expérimentales permet d'identifier des solutions techniques innovantes, comme la valorisation des déchets miniers (charbon, bauxite, phosphogypse) en sources secondaires, ou le recours à des

procédés comme la biolixiviation, plus respectueux de l'environnement. Ces déchets, en grandes quantités sur le territoire français et/ou européen, pourraient limiter le recours à l'extraction primaire en favorisant des pratiques circulaires. Cependant, ces technologies restent encore peu matures et peu testées industriellement, rendant leur déploiement incertain sans l'engagement clair du secteur minier. Par ailleurs, les fortes potentialités liées au développement d'outils basés sur l'intelligence artificielle (découvrir de nouveaux gisements et les cartographier) ne sont pas encore abordées.

Le croisement des approches disciplinaires montre que ces alternatives ne peuvent être viables sans intégration dans des projets de territoire clairs, construits avec les acteurs locaux, soutenus par des politiques publiques de long terme et un cadre institutionnel permettant de mettre en discussion les objectifs des politiques de transition. En France, les terrains de gisements secondaires, comme les résidus de bauxite de Gardanne ou les anciens sites charbonniers, offrent des opportunités concrètes pour tester une régulation plus inclusive, reposant sur la gouvernance partagée et la reconnaissance des passifs environnementaux. Cela suppose de sortir d'une vision strictement technique de l'extraction pour l'envisager comme un projet collectif et évolutif, capable d'améliorer certaines situations héritées du passé. La question de l'exploitation de ces ressources secondaires constitue également un champ prometteur pour la recherche, que ce soit en sciences expérimentales ou en sciences humaines et sociales.

Enfin, une réflexion critique sur la valeur économique des ETR est nécessaire. La construction de cette valeur, discutée à l'échelle des territoires, favoriserait un débat démocratique sur les usages, la redistribution et les bénéfices dans une logique de durabilité partagée. Cette question, à la croisée de l'économie politique, de la géographie économique et de l'anthropologie, reste encore peu explorée.

EXTRAIRE AUTREMENT

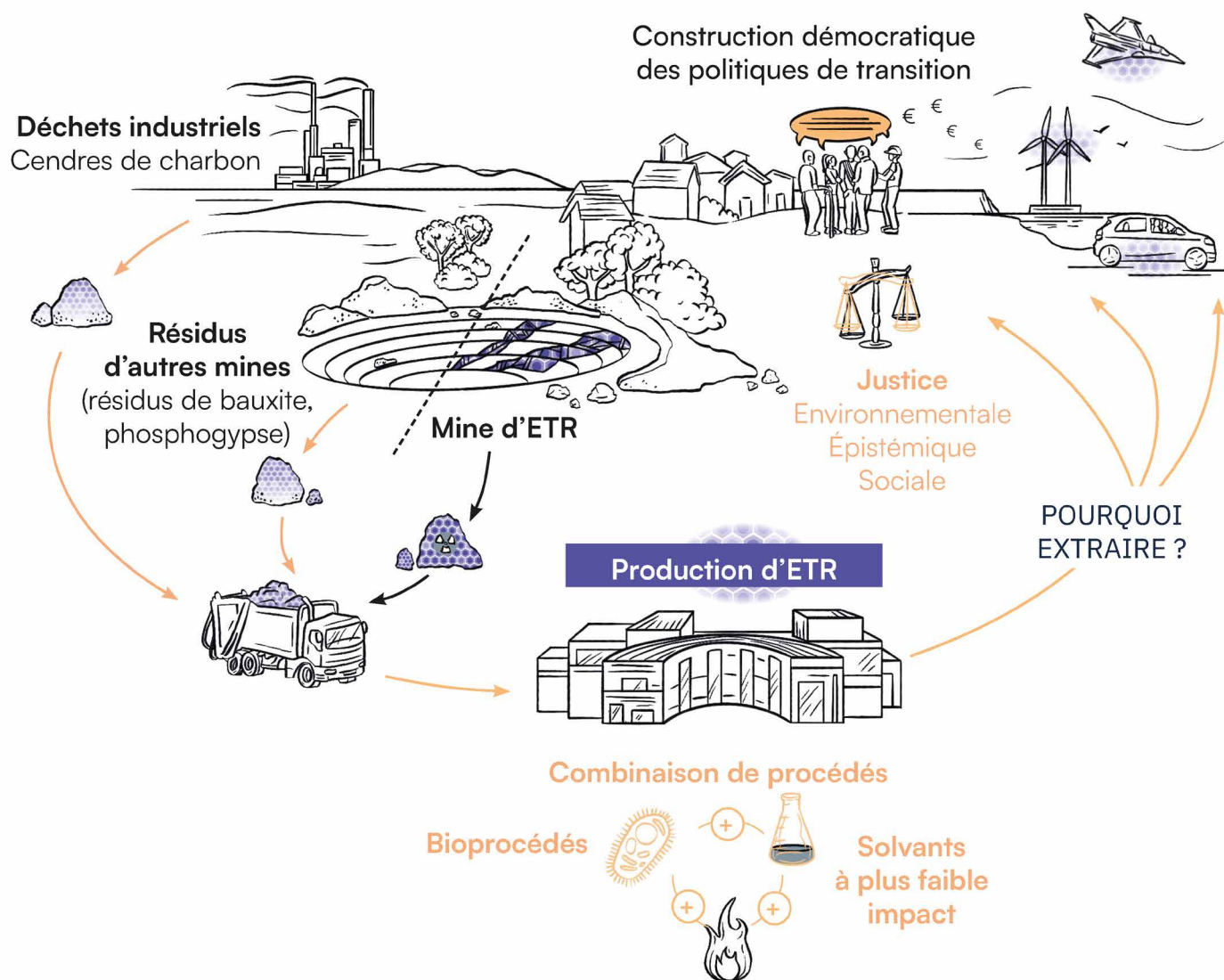


Figure 16 : Conclusion du chapitre IV « Extraire autrement ». Les leviers sont en orange.

Conclusion générale

Les ETR sont des métaux très spécifiques. Leurs caractéristiques — leur omniprésence et leur dispersion dans les technologies et les usages ainsi que le fait qu'elles ne peuvent qu'être extraites toutes ensemble, entre autres — créent une complexité qui nécessite de les appréhender de manière véritablement pluridisciplinaire et transversale. L'accès à ces ressources devient problématique du fait de tensions géopolitiques, de barrières économiques et de demande croissante. Ces enjeux ne sont pas nouveaux, mais acquièrent une actualité renouvelée avec le développement d'applications liées aux technologies de production d'énergie non carbonée.

Dans ce contexte, réfléchir aux besoins ne peut donc pas faire l'économie d'une réflexion sur la sobriété des usages.

La réduction du recours aux ETR par la technologie et par la sobriété d'usage représente une opportunité, et révèle au-delà de la recherche un besoin de réflexion pour déterminer ce qui est essentiel :

La littérature donne des pistes sur les possibles leviers d'action en matière de réduction :

- réduire la consommation d'ETR par une utilisation plus efficace des matériaux et des technologies qui en dépendent, comme décrit pour les aimants permanents,
- développer des matériaux avec des technologies alternatives qui nécessitent moins ou aucune de ces ressources, comme décrit pour l'éclairage (LED),
- réfléchir aux usages des objets contenant des ETR et aux leviers de réduction ou d'adaptation de ces usages,
- ou encore adopter un cadre juridique et de politiques publiques susceptibles d'influencer substantiellement le développement de certains secteurs.

Les leviers d'action sur la demande en ETR sont beaucoup moins étudiés par la littérature que les leviers d'action sur l'offre (production primaire et secondaire, recyclage, valorisation des déchets miniers et industriels d'ETR). Lorsque ces leviers sont spécifiquement étudiés, ils ne portent pas précisément sur les ETR mais sur les dispositifs qui les contiennent. Ces manques soulignent le besoin d'explicitement les ETR comme un enjeu clé en soi de la vulnérabilité de la France, au-delà des objets et dispositifs qui les contiennent. Le manque de traçabilité des ETR apparaît aussi comme une limite à la sobriété comme à la collecte en vue du recyclage. La circularité pourrait en effet contribuer à la sécurité des approvisionnements mais elle requiert des innovations techniques et des changements dans les règles qui encadrent le fonctionnement économique (traçabilité des ressources et des déchets, obligations de recyclage portant sur les matériaux critiques).

En sciences des matériaux, les fronts de recherche se concentrent sur l'amélioration des performances davantage que sur la sobriété en ETR. De fait, la littérature manque d'une approche véritablement systémique et interdisciplinaire de la sobriété. La recherche, toutes disciplines confondues, n'aborde pas le « juste besoin technologique » selon les usages, pour réduire la consommation d'ETR. Bien que certains cas, comme l'usage d'aimants NdFeB dans les véhicules électriques, montrent qu'une substitution par des aimants sans ETR puisse être envisageable, dans de nombreux cas la réduction ou la substitution conduit à une baisse de performance. Cette dernière pourrait être compensée en poursuivant le cas d'exemple du véhicule électrique par le poids de celui-ci ou par la volonté de développer des véhicules moins puissants.

La France dispose de sources secondaires potentiellement importantes au travers des déchets des produits d'usage (mine urbaine), mais aussi de ceux du minier et de l'industrie : des opportunités technologiques mais une filière de recyclage qui repose sur une organisation de la collecte, des infrastructures et une économie à stabiliser.

La littérature consacrée à l'optimisation des procédés de recyclage issus de la mine urbaine est particulièrement abondante (plus de 1000 articles recensés). Les filières existantes de pré-traitement démontrent une faisabilité technique solide, bien que plusieurs leviers d'optimisation restent à concrétiser. En particulier, l'hétérogénéité de la mine urbaine rend complexe l'automatisation du démantèlement. Concernant le cœur des procédés, les voies pyrométallurgiques se distinguent par leur simplicité et leur robustesse, mais sont énergivores et pas toujours pertinentes pour les flux dilués. À l'inverse, l'hydrométallurgie et ses variantes (extraction liquide-liquide, adsorption sélective, électrochimie) constituent la base des procédés de séparation. Enfin, les approches dites non conventionnelles (solvométallurgie, ionométallurgie, biométallurgie) ouvrent des perspectives plus durables, mais nécessitent encore des validations à l'échelle pilote ou industrielle.

Bien que la faisabilité technique du recyclage soit démontrée, le taux effectif de recyclage demeure inférieur à 1 % depuis plusieurs années. La littérature indique qu'il est possible d'organiser une chaîne de recyclage des ETR en France, mais que certains freins demeurent. Si dans un premier temps, l'apport de la « mine urbaine » ne serait pas suffisant pour répondre aux besoins croissants de la France (notamment dans la perspective de la transition énergétique vers des énergies renouvelables), cette chaîne de recyclage pourrait à moyen terme apporter une quantité non négligeable d'ETR, en particulier lorsque les premières générations d'éoliennes seront recyclées. D'un point de vue technique, il est possible de structurer cette chaîne de recyclage : la France dispose des savoirs scientifiques et technologiques nécessaires. C'est d'un point de vue organisationnel, juridique, politique que de nombreux défis se posent.

Tout d'abord, concernant les usages plus dispersés, la faible concentration des ETR dans les objets complexifie largement leur collecte et fragilise la rentabilité du recyclage. Le niveau et la volatilité des prix des ETR au regard d'autres métaux (or, cuivre notamment) ne sont pas assez élevés pour inciter les acteurs économiques à investir la filière. La littérature montre que la mise en place d'un marché permettant l'organisation d'une telle filière, et donc la baisse des coûts de production, ne peut se faire que grâce à la création d'outils juridiques et au développement de politiques incitatives par la puissance publique.

Exploiter les déchets miniers et de l'industrie, une opportunité à croiser aux controverses minières naissant souvent de l'absence de débat préalable et sincère sur les effets environnementaux, la finalité et le partage des bénéfices avec les populations locales.

Quant au potentiel de gisements primaires en ETR, il apparaît relativement modeste en France, à l'exception des ressources présentes dans les fonds marins. Néanmoins, de nombreuses incertitudes au sujet du potentiel de ces dernières demeurent. De plus, la littérature témoigne de profondes controverses quant à l'opportunité d'exploiter les fonds marins du fait des conséquences environnementales importantes qu'entraînerait l'exploitation de ces gisements, mais aussi de sa faisabilité technique et économique. À moyen terme, des alliances économiques et géopolitiques avec d'autres pays que la Chine sont envisagées comme des options pour la France de diversifier ses approvisionnements, notamment grâce aux ressources de l'Europe du Nord ou celles d'autres pays comme le Brésil.

Par ailleurs, une source secondaire potentiellement très importante d'ETR existe en France et en Europe dans les déchets miniers et certains déchets industriels. Si les stocks de résidus de bauxite en France et en Europe sont mal connus, ils ne sont aujourd'hui pas valorisés et pourraient représenter jusqu'à près de 270 000 tonnes d'ETR et répondre ainsi significativement aux besoins européens au moins à court terme. Le bénéfice environnemental de la valorisation des résidus de bauxite, ou d'autres déchets miniers, réside dans le fait que ces matériaux ont déjà subi les étapes de concassage et de broyage, particulièrement énergivores lors de l'extraction primaire. De plus, l'extraction des ETR selon des approches zéro déchet permettrait de

réduire les impacts environnementaux liés à leur stockage.

En revanche, l'exploitation des résidus miniers soulève des difficultés qui recoupent celles du primaire en matière technique, économique et démocratique. La littérature relative aux questions d'acceptabilité sociale montre en effet qu'une consultation restreinte des parties prenantes, avec la présentation de projets technico-économiques trop avancés, tend à augmenter les controverses et les tensions autour des projets. Au-delà de la sécurisation, les modalités de l'extraction où qu'elle se réalise sont questionnées par la littérature. Les activités minières soulèvent en elles-mêmes des enjeux environnementaux et sociaux importants. Les nombreuses études sur les controverses minières montrent que ces enjeux ne sont pas résolus par les seules démarches pédagogiques et de compensation à destination des populations locales affectées. La littérature converge sur le besoin de connecter les choix à faire en matière d'extraction avec les questions d'usage et de besoins des minéraux extraits, ce qui suppose de ne pas limiter les débats publics sur les ETR au périmètre des projets extractifs. Le renforcement des normes sociales et environnementales, notamment au travers du devoir de vigilance des entreprises, de même que l'articulation de plus en plus étroite entre les objectifs de sécurisation et ceux de sobriété et d'économie circulaire sont très récents et n'ont pas encore été réellement évalués par la littérature. Le manque d'études relatives à la question de la traçabilité des ETR dans les produits et de la transparence, de même qu'en ce qui concerne la mise en place de politiques de préférence européenne à l'image de ce qui est fait en Chine ou aux États-Unis peut être relevé.

En conclusion, la France et l'Europe disposent d'un potentiel significatif de production d'ETR secondaires, issus à la fois des déchets miniers et industriels et de la mine urbaine. La valorisation de ces ressources suppose toutefois de surmonter plusieurs freins techniques, économiques et réglementaires, ce qui appelle à un accompagnement renforcé par les politiques publiques, à travers des dispositifs de soutien, d'innovation et de structuration des filières.

Parallèlement, cet enjeu est intrinsèquement dépendant d'un débat démocratique sur la sobriété des usages et d'une vision intégrée de la transition énergétique, articulant les dimensions technologiques, sociales et environnementales afin d'assurer la cohérence et la durabilité des choix collectifs en matière de consommation de ressources critiques.

Pour aller plus loin

Le rapport complet :

CNRS. *Vers une utilisation plus responsable des terres rares tout au long de leur cycle de vie : Quelles perspectives en termes de sobriété, recyclage et mode de production ?*
Rapport de l'Expertise Scientifique Collective, 2026.

Glossaire

Aimant permanent : matériau qui produit un champ magnétique permanent sans consommer d'énergie. Le mouvement relatif d'un aimant par rapport à une bobine de cuivre (ou d'un autre métal conducteur) induit dans celle-ci un courant électrique. À l'inverse, l'injection d'un courant variable dans la bobine produit un effort qui déplace l'aimant. Ce principe est mis en œuvre, par exemple, dans les moteurs de véhicule électrique. Ceux-ci peuvent produire l'effort pour déplacer le véhicule et produire de l'énergie électrique au freinage pour recharger la batterie.

Bauxite : roche formée par accumulation de sédiments et caractérisée par sa forte concentration en aluminium. L'exploitation des mines de bauxite constitue ainsi la principale source de production mondiale d'aluminium. Les résidus de bauxite, également appelés « boues rouges », lorsqu'ils sont hydratés, contiennent des concentrations en ETR pouvant atteindre 0,2 % en masse.

Exploitation : organisation des activités visant à extraire et valoriser des métaux.

Extraction : action physique de retirer le minerai du sous-sol (sens géologique) ou l'action physico-chimique de séparer des composés métalliques d'autres composés (sens de l'ingénierie des procédés).

Gisement : gîte pour lequel les conditions du marché satisfont des conditions d'exploitation économiquement viable.

Gîte : une occurrence dans la croûte terrestre de concentrations de substances utiles (comme les métaux) anormalement élevées.

Lixiviation : traitement par dissolution d'une substance par un liquide pour en extraire les constituants solubles. La biolixiviation repose sur des micro-organismes capables d'opérer cette solubilisation.

Métaux stratégiques : métaux associés à certains secteurs stratégiques comme la défense ou ceux des politiques de transition (énergétique, 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.

Mine urbaine : masse de déchets provenant du milieu urbain (objets en fin de vie) et pouvant représenter une réserve, notamment métalliques, en vue d'être réutilisées ou recyclées

Performance des matériaux : capacité des propriétés du matériau à répondre efficacement aux exigences d'une application donnée. Par exemple, la performance d'un aimant est l'énergie maximale qu'il est capable de stocker (et donc de livrer) selon son volume, ainsi que le seuil maximal de température à partir duquel il perd son aimantation.

Phosphogypses : déchet minier généré lors de la production d'engrais à partir de roches issues de l'extraction des phosphates destinés à la production d'engrais ou d'acide phosphorique. Le stockage de ce déchet pose certains risques environnementaux et sanitaires, en raison de sa toxicité. Ce déchet contient des ETR.

Raffinage : processus physico-chimique qui permet d'obtenir un métal ou un composé de haute pureté, en éliminant les dernières impuretés présentes dans le produit issu du traitement. Cette étape finale est nécessaire à une majorité d'applications, mais pas à toutes selon les performances souhaitées.

Recyclage court (ou boucle courte) : processus de recyclage visant à réduire les étapes de récupération et de traitements de déchets, en ne revenant pas au composant* initial.

Recyclage long (ou boucle longue) : processus de recyclage qui fait intervenir des transformations complexes permettant un usage du matériau recyclé hors de ses applications d'origine.

Réemploi : toute opération par laquelle des produits ou composants qui ne sont pas des déchets sont réutilisés dans le même but que celui pour lequel ils ont été conçus. (Code de l'Environnement français art. L541-1-1).

REP : principe de Responsabilité Élargie des Producteurs, reconnu dans la directive-cadre européenne sur les déchets, selon lequel les producteurs, c'est-à-dire les personnes qui mettent sur le marché certains produits, peuvent être rendus responsables de la prévention et de la gestion des déchets issus de ces produits en fin de vie.

Réserve : partie d'une ressource qui peut être extraite de manière économiquement rentable avec les techniques disponibles et selon les conditions légales et environnementales actuelles.

Ressource : quantité totale d'un minerai ou d'un matériau présent dans le sous-sol, qu'il soit exploitable ou non à un moment donné.

Réutilisation : toute opération par laquelle des produits ou composants qui sont des déchets sont réutilisés. (Code de l'Environnement français art. L541-1-1)

Séparation : processus mécanique et/ou physique destinés à concentrer les métaux d'intérêt dans la matière (minerais ou matériau) en les isolant des autres composants.

Sobriété : elle « consiste à nous questionner sur nos besoins et à les satisfaire en limitant leurs impacts sur l'environnement » (ADEME). Dans le cadre de cette expertise, la sobriété a été abordée de trois manières différentes : (I) une approche visant à réduire la consommation d'ETR par une utilisation plus efficace des matériaux et des technologies qui en dépendent ; (II) le développement de technologies alternatives qui nécessitent moins ou aucune de ces ressources, (III) une réflexion sur les usages des objets contenant des ETR et les leviers de réduction de ces usages.

Source secondaire : sources d'ETR autres que la production primaire tirée de l'exploitation des mines d'ETR. Ces sources incluent les déchets d'autres mines (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.).

Traitement : ensemble des opérations physico-chimiques ou métallurgiques destinées à transformer la matière triée (minerais ou matériau) en un concentré métallique plus ou moins pur.

Annexe méthodologique

Constitution du groupe d'experts

Une phase de préfiguration impliquant 4 expert.e.s a fait émerger une dizaine de problématiques disciplinaires relatives aux ETR. Les pilotes scientifiques ont alors été sélectionné.e.s en raison de leurs compétences et sur la base de leur production scientifique pour répondre de manière systémique et pluridisciplinaire à la question des usages responsables des ETR face aux défis géopolitiques pour la France et l'Europe. Les expert.e.s ont été identifié.e.s sur la base de leurs champs de compétences et de leurs productions scientifiques, avec les pilotes scientifiques de l'ESCO et avec l'appui du comité de suivi (constitué de représentants des Instituts concernés du CNRS). Ils ont été retrouvés parmi les publiants français.e.s des premières listes de publications réunies sur la base de mots clés. **Un core group de 17 expert.e.s** a ainsi été constitué. Chacun.e a déclaré les liens d'intérêts qu'il entretient au regard du sujet. Ces déclarations ont été analysées par une commission présidée par le Déontologue du CNRS pour établir l'absence de conflits d'intérêts les concernant. Le CNRS n'a pas communiqué leur identité jusqu'à la restitution des résultats afin de les préserver de stratégies d'influence et de toutes formes de pression dont ils pourraient faire l'objet sur les sujets sensibles de l'expertise. Inversement, les expert.e.s n'ont pas communiqué sur leur participation à cette ESCo en dehors de leurs hiérarchies.

L'ESCO a fait appel à un second cercle de **13 expert.e.s contributeurs.trices** pour apporter un éclairage sur un volume restreint de publications et sur des domaines sur lesquels le premier cercle était en limite d'expertise.

Constitution de la base de ressources scientifiques

La constitution du corpus de publications scientifiques sur laquelle l'ESCO s'est fondée avait pour objectif de restituer l'état de l'art international sur la question « vers une utilisation responsable des terres rares tout au long de leur cycle de vie et perspectives en termes de sobriété, de recyclage et de mode de production ». La MPES a fait appel à INIST pour cela, en mettant en place une méthode dite « par entonnoir », d'un corpus élargi au corpus final.

Corpus élargi. Pour chaque chapitre, les expert.e.s du core group et l'INIST ont déterminé collectivement une liste de mots clés (cf. rapport complet) et défini des combinaisons afin d'identifier les références pertinentes au sein de 5 bases de publications scientifiques (Web of Science,

Scopus, CorHAL/Conditor, Istex et OpenAlex³⁷). Des modifications ont pu être apportées aux requêtes par mots clés en testant la capacité de récupérer les publications d'une liste témoin constituée par les pilotes et jusqu'à obtenir un taux de recouvrement avec cette liste supérieur à 98%. Cette procédure a été suivie afin de garantir la complétude de la couverture des publications pertinentes (absence de silence). **Cette recherche a finalement abouti à un premier corpus de près de 14 000 publications scientifiques.**

Corpus intermédiaire. Le groupe d'expert.e.s a ensuite opéré un tri sur la base de leurs titres, résumés et mots clés pour éliminer les publications non-pertinentes (bruit). Ont été définis collectivement des critères d'exclusion (ex. publications portant sur le scandium ou celles ne faisant pas mention de point de comparaison en sciences des matériaux pour le chapitre Réduire) et d'inclusion (ex. publications portant sur des métaux similaires aux ETR du chapitre Extraire autrement). Le tri des références a été réalisé indifféremment par n'importe quel expert au sein de l'un des deux groupes (sciences expérimentales et sciences humaines et sociales) et en utilisant les critères partagés, explicités sous forme d'étiquettes grâce au logiciel Rayyan (cf. méthodologie complète du rapport). À la fin de ce tri, le corpus était constitué de près de **4600 publications scientifiques.**

Corpus final. Les références de ce corpus intermédiaire ont été versées dans une bibliothèque numérique collective (Zotero) pour permettre la répartition par expert.e, la classification selon le plan et l'importation des textes complets des publications. Un dernier tri a été réalisé sur la base des textes complets et un peu plus de 1000 articles ont été exclus. À l'inverse, des publications ayant échappé au processus ou ayant été publiées après la constitution du corpus (2023-2024) ont été ajoutées par le groupe d'expert.e.s. **La base de ressources scientifiques finale sur laquelle se fonde le rapport de l'ESCO contient plus de 4100 publications. Le document de synthèse ne les cite pas toutes mais se fonde sur leur lecture. Les références citées dans ce document de synthèse sont listées en fin de document.**

Ce processus de constitution d'un corpus de publications traçable répond au principe de **transparence** de la charte de l'expertise scientifique du CNRS et permet de relier les résultats de l'état de l'art à son périmètre et à la base de ressources scientifiques réunies.

³⁷ Concernant la littérature grise, certaines études (études quantitatives produites par USGS, IEA etc., textes juridiques), ont été intégrées quand nécessaire, comme données de contexte.

Écriture et modalités de travail

En respect du **principe d'impartialité**, la rédaction **s'est appuyée sur les ressources scientifiques réunies pour le rapport et non sur le seul avis d'expert.e.s**. Les connexions faites entre les publications ont permis d'organiser l'architecture du rapport pour produire l'état des connaissances et son analyse. Les éventuelles controverses scientifiques et manques de connaissances ont été mis en évidence au fil de l'argumentaire et en fin de sections et de chapitres.

L'écriture du rapport et de la synthèse a été collective :

chaque section a été rédigée sur un espace de travail collaboratif sécurisé. Deux responsables ont été nommés pour chaque chapitre afin de coordonner l'écriture, organiser des groupes de travail et faire émerger les éléments principaux et les aspects interdisciplinaires. La synthèse ne cite que certaines publications, mais elle a été rédigée sur la base de 4100 publications et du rapport dans lequel figure les argumentaires plus détaillés et des éléments plus techniques.

Un processus de relectures croisées a été mis en place :

les sections ont été relues par au moins deux autres expert.e.s, afin de respecter le **principe d'impartialité** de la charte du CNRS. En plus des expert.e.s du *core group* et des pilotes scientifiques, le chef de projet, la MPES et le comité de suivi de l'ESCo participent au processus de relecture de la synthèse et du résumé.

Des plénières mensuelles ont réuni les pilotes scientifiques, le groupe d'expert.e.s et la MPES pour partager une direction commune, les méthodologies et le contenu scientifique émergeant du travail d'expertise.

Références

- Adisorn, T., Tholen, L., Gotz, T., 2021. Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy. *Energies* 14. <https://doi.org/10.3390/en14082289>
- Al-Bassam, K., Rambousek, P., Cech, S., 2021. REE-Rich Turonian Phosphates in the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic: Assessment as Source of Critical Elements and Implications for Future Exploration. *Minerals* 11. <https://doi.org/10.3390/min11030246>
- Alemrajabi, M., Ricknell, J., Samak, S., Rodriguez Varela, R., Martinez, J., Hedman, F., Forsberg, K., Rasmuson, Å.C., 2022. Separation of Rare-Earth Elements Using Supported Liquid Membrane Extraction in Pilot Scale. *Ind. Eng. Chem. Res.* 61, 18475 — 18491. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03268>
- Ali, S.H., Kalantzakos, S., Eggert, R., Gauss, R., Karayannopoulos, C., Klinger, J., Pu, X., Vekasi, K., Perrons, R.K., 2022. Closing the Infrastructure Gap for Decarbonization: The Case for an Integrated Mineral Supply Agreement. *Environ. Sci. Technol.* 56, 15280 — 15289. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05413>
- 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. *J. Ind. Ecol.* <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. *Environ. Sci. Technol.* 46, 3406 — 3414. <https://doi.org/10.1021/es203518d>
- Amato, A., Becci, A., Birloaga, I.P., De Michelis, I., Ferella, F., Innocenzi, V., Ippolito, N.M., Jiménez-Gómez, C.P., Veglio, F., Beolchini, F., 2019. Sustainability analysis of innovative technologies for the rare earth elements recovery. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.029>
- Arrachart, G., Couturier, J., Dourdain, S., Levard, C., Pellet-Rostaing, S., 2021. Recovery of Rare Earth Elements (REEs) Using Ionic Solvents. *Processes* 9, 1202. <https://doi.org/10.3390/pr9071202>
- Artiushenko, O., Raphael Freire da Silva, Zaitsev, V., 2023. Recent advances in functional materials for rare earth recovery: A review. *Sustain. Mater. Technol.* <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00681>
- Ash, J., 2024. Social impacts of critical mineral exploration on Indigenous peoples' lands: A case study from Solomon Islands. *Extr. Ind. Soc.* 17. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101439>
- Assefi, M., Maroufi, S., Yamauchi, Y., Sahajwalla, V., 2020. Pyrometallurgical recycling of Li-ion, Ni-Cd and Ni-MH batteries: A minireview. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.01.005>
- Baba, K., Hiroshige, Y., Nemoto, T., 2013. Rare-earth magnet recycling. *Hitachi Rev.*
- Bailey, G., Joyce, P.J., Schrijvers, D., Schulze, R., Sylvestre, A.M., Sprecher, B., Vahidi, E., Dewulf, W., Van Acker, K., 2020. Review and new life cycle assessment for rare earth production from bastnäsite, ion adsorption clays and lateritic monazite. *Resour. Conserv. Recycl.* 155, 104675. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104675>
- Balaram, V., 2022. Rare Earth Element Deposits: Sources, and Exploration Strategies. *J. Geol. Soc. India* 98, 1210 — 1216. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-2154-3>
- Balassone, G., Manfredi, C., Vasca, E., Bianco, M., Boni, M., Aldo Di Nunzio, Lombardo, F., Mozzillo, R., Marino, A., Mormone, A., Mura, G., Trifuoggi, M., Mondillo, N., 2021. Recycling REEs from the Waste Products of Silius Mine (SE Sardinia, Italy): A Preliminary Study. *Sustainability.* <https://doi.org/10.3390/su132414000>
- Baldassarre, B., 2025. Circular economy for resource security in the European Union (EU): Case study, research framework, and future directions. *Ecol. Econ.* 227, 108345. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108345>
- Baldassarre, B., Carrara, S., 2025. Critical raw materials, circular economy, sustainable development: EU policy reflections for future research and innovation. *Resour. Conserv. Recycl.* 215, 108060. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108060>

- Bandara, H.M.D., Mantell, M.A., Darcy, J.W., Emmert, M.H., 2015. Rare Earth Recycling : Forecast of Recoverable Nd from Shredder Scrap and Influence of Recycling Rates on Price Volatility. *J. Sustain. Metall.* <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0019-3>
- Barakos, G., Gutzmer, J., Mischo, H., 2016. Strategic evaluations and mining process optimization towards a strong global REE supply chain. *J. Sustain. Min.* 15, 26 — 35. <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. *Resour. Policy* 49, 153 — 164. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.05.003>
- Baudouin, V., 2024. Sobres perspectives - La sobriété à l'assaut du droit. *VertigO - Rev. Électronique En Sci. Environ.* <https://doi.org/10.4000/12eqw>
- Behera, S.S., Panda, S.K., Mandal, D., Parhi, P.K., 2019. Ultrasound and Microwave assisted leaching of neodymium from waste magnet using organic solvent. *Hydrometallurgy.* <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.02.003>
- Belfqueh, S., Seron, A., Chapron, S., Arrachart, G., Menad, N., 2023. Evaluating organic acids as alternative leaching reagents for rare earth elements recovery from NdFeB magnets. *J. Rare Earths* 41, 621 — 631. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.04.027>
- Bergeron, K., Jébrak, M., Yates, M., Séguin, S., Lehmann, C., Meur, V., Le, Angers, P.-Y., Durand, P., Gendron, C., 2016. Indice du risque social : un outil pour mieux saisir les enjeux, risques et opportunités des projets miniers. *L'acceptabilité sociale et les projets miniers : essai de modélisation et validation. Éthique Publique* 18.
- Beylot, A., Menad, N., Seron, A., Delain, M., Bizouard, A., Ménard, Y., Villeneuve, J., 2020. Economic assessment and carbon footprint of recycling rare earths from magnets : Evaluation at lab scale paving the way toward industrialization. *J. Ind. Ecol.* <https://doi.org/10.1111/jiec.12943>
- Bezzola, S., Günther, I., Brugger, F., Lefoll, E., 2022. CSR and local conflicts in African mining communities. *World Dev.* 158, 105968.
- Bhatnagar, A., Härrä, A., Levänen, J., Niinimäki, K., 2024. Exploring the role of social life cycle assessment in transition to circular economy : A systematic review. *Resour. Conserv. Recycl.* 207, 107702. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107702>
- Bhuwalka, K., Kirchain, R.E., Olivetti, E.A., Roth, R., 2023. Quantifying the drivers of long-term prices in materials supply chains. *J. Ind. Ecol.* 27, 141-154 — 154. <https://doi.org/10.1111/jiec.13355>
- Binnemans, K., Jones, P.T., 2023. The Twelve Principles of Circular Hydrometallurgy. *J. Sustain. Metall.* 9, 1 — 25. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00636-3>
- Binnemans, K., Jones, P.T., 2017. Solvometallurgy : An Emerging Branch of Extractive Metallurgy. *J. Sustain. Metall.* 3, 570 — 600. <https://doi.org/10.1007/s40831-017-0128-2>
- Binnemans, K., Jones, P.T., 2014. Perspectives for the recovery of rare earths from end-of-life fluorescent lamps. *J. Rare Earths* 32, 195 — 200. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60051-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60051-X)
- Binnemans, K., Jones, P.T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., Buchert, M., 2013. Recycling of rare earths: a critical review. *J. Clean. Prod.* 51, 1-22 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>
- Boetzkes, A., Diamanti, J., 2023. Geofetishism and the Tender Violence of Rare Earths. *Sub-STANCE* 52. <https://doi.org/10.1353/sub.2023.a913888>
- Bogojević, S., 2024. The European Green Deal, the rush for critical raw materials, and colonialism. *Transnatl. Leg. Theory* 15, 600 — 615. <https://doi.org/10.1080/20414005.2024.2399408>
- Borra, C.R., Pontikes, Y., Binnemans, K., Van Gerven, T., 2015. Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud). *Sustain. Miner.* 76, 20 — 27. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.01.005>
- Boudia, S., 2019. Quand une crise en cache une autre : la « crise des terres rares » entre géopolitique, finance et dégâts environnementaux : *Crit. Int.* N° 85, 85 — 103. <https://doi.org/10.3917/crit.085.0085>
- Boul, M., Radiguet, R., 2021. Du droit des déchets au droit de l'économie circulaire : regards sur la loi du 10 février 2020, *Colloques & essais. Institut francophone pour la justice et la démocratie, Bayonne.*
- Brisson, V.L., Wei-Qin Zhuang, Lisa Alvarez-Cohen, 2016. Bioleaching of rare earth elements from monazite sand. *Biotechnol. Bioeng.* 113, 339 — 348. <https://doi.org/10.1002/bit.25823>

- Bundgaard, A.M., Huulgaard, R.D., Remmen, A., 2024. Getting the Priorities Right in Material Efficiency: From the Ecodesign Directive to the Ecodesign for Sustainable Products Regulation, in: 2024 Electronics Goes Green 2024+ (EGG). Presented at the 2024 Electronics Goes Green 2024+ (EGG), IEEE, Berlin, Germany, pp. 1–7. <https://doi.org/10.23919/EGG62010.2024.10631182>
- Bünzli, J.-C.G., 2022. Applications of Rare Earths, in: The Lanthanides and Actinides. WORLD SCIENTIFIC (EUROPE), pp. 633–685. https://doi.org/10.1142/9781800610163_0017
- Bünzli, J.-C.G., 2019. Lanthanide Photonics: Shaping the Nanoworld. Trends Chem. 1, 751–762. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2019.05.012>
- Burkhardt, C., Van Nielen, S., Awais, M., Bartolozzi, F., Blo mgren, J., Ortiz, P., Xicotencatl, M.B., Degri, M., Nayebossadri, S., Walton, A., 2023. An overview of Hydrogen assisted (Direct) recycling of Rare earth permanent magnets. J. Magn. Magn. Mater. 588, 171475. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171475>
- Burton, J., Kemp, D., Barnes, R., Parmenter, J., 2024. A socio-spatial analysis of Australia's critical minerals endowment and policy implications. Resour. Policy 88. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104448>
- Burtseva, E., Bysyina, A., 2019. Damage Compensation for Indigenous Peoples in the Conditions of Industrial Development of Territories on the Example of the Arctic Zone of the Sakha Republic. Resour.-Basel 8. <https://doi.org/10.3390/resources8010055>
- Buschke, F.T., Estreguil, C., Mancini, L., Mathieux, F., Eva, H., Battistella, L., Peedell, S., 2023. Digital Storytelling Through the European Commission's Africa Knowledge Platform to Bridge the Science-Policy Interface for Raw Materials. Circ. Econ. Sustain. 3, 1141–1154. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00198-2>
- Butler, C., 2014. Rare Earth Elements: China's Monopoly and Implications for U.S. National Security. The Fletcher Forum of World Affairs 38, 23–39.
- Campbell-Johnston, K., Erik Roos Lindgreen, Mondello, G., Teresa Maria Gulotta, Vermeulen, W.J.V., Salomone, R., 2023. Thermodynamic rarity of electrical and electronic waste: Assessment and policy implications for critical materials. J. Ind. Ecol. 27, 508–521–521. <https://doi.org/10.1111/jiec.13374>
- Canelas, J., Carvalho, A., 2023. The dark side of the energy transition: Extractivist violence, energy (in) justice and lithium mining in Portugal. Energy Res. Soc. Sci. 100. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103096>
- Cassayre, L., Guzhov, B., Zielinski, M., Biscans, B., 2022. Chemical processes for the recovery of valuable metals from spent nickel metal hydride batteries: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112983>
- Castro, L., Gomez-Alvarez, H., Carmona, M., Gonzalez, F., Munoz, J.A., 2023. Influence of biosurfactants in the recovery of REE from monazite using Burkholderia thailandensis. Hydrometallurgy. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106178>
- Cen, P., Bian, X., Liu, Z., Gu, M., Wu, W., Li, B., 2021. Extraction of rare earths from bastnaesite concentrates: A critical review and perspective for the future. Miner. Eng. 171. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107081>
- Cesaria, M., Baldassare Di Bartolo, 2019. Nanophosphors-Based White Light Sources. Nanomaterials 9. <https://doi.org/10.3390/nano9071048>
- Cesaria, Maura, Baldassare Di Bartolo, DiBartolo, B., Silvestri, L., Cesaria, M., Collins, J., 2018. Nanophosphors: From Rare Earth Activated Multicolor-Tuning to New Efficient White Light Sources. Quantum Nano-Photonics 26–77. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1544-5_3
- Charles, N., Tuduri, J., Lefebvre, G., Pourret, O., Gaillard, F., Goodenough, K., 2022. Ressources en terres rares de l'Europe et du Groenland : potentiel minier et enjeux, in: Ressources métalliques 1. ISTE Group, pp. 1–137. <https://doi.org/10.51926/ISTE.9135.ch1>
- Chazot, A., Barrat, J.-A., Gaha, M., Jomaah, R., Ognard, J., Ben Salem, D., 2020. Brain MRIs make up the bulk of the gadolinium footprint in medical imaging. J. Neuroradiol. 47, 259–265. <https://doi.org/10.1016/j.neurad.2020.03.004>
- Chen, B., Li, D., Wang, F., 2020. InP Quantum Dots: Synthesis and Lighting Applications. Small 16, 2002454. <https://doi.org/10.1002/smll.202002454>
- Chen, Y., Cai, T., Zhu, X., Fan, D., Wang, Q., 2020. Analysis and Design of a New Type of Less-Rare-Earth Hybrid-Magnet Motor With Different Rotor Topologies. IEEE Trans. Appl. Supercond. 30. <https://doi.org/10.1109/tasc.2020.2965879>
- Chen, Y.-C., Yang, W.-X., 2024. Recycling of a spent residue-fluid-catalytic cracking catalyst into an adsorbent for the removal of copper(II) ions from wastewater. J. Environ. Chem. Eng. 12, 114566. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114566>

- Chen, Z., Han, Z., Gao, B., Zhao, H., Qiu, G., Shen, L., 2024. Bioleaching of rare earth elements from ores and waste materials: Current status, economic viability and future prospects. *J. Environ. Manage.* 371, 123217.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123217>
- Chenna Rao Borra, Vlugt, T.J.H., Yang, Y., S. Erik Offerman, 2018. Recovery of Cerium from Glass Polishing Waste: A Critical Review. *Metals*.
<https://doi.org/10.3390/met8100801>
- Chour, Z., Laubie, B., Morel, J.L., Tang, Y., Qiu, R., Simonnot, M.-O., Muhr, L., 2018. Recovery of rare earth elements from *Dicranopteris dichotoma* by an enhanced ion exchange leaching process. *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.* 130, 208 — 213.
<https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.06.007>
- Chour, Z., Laubie, B., Morel, J.L., Tang, Y.-T., Simonnot, M.-O., Muhr, L., 2020. Basis for a new process for producing REE oxides from *Dicranopteris linearis*. *J. Environ. Chem. Eng.* 8, 103961.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103961>
- Christmann, P., 2021. Mineral Resource Governance in the 21st Century and a sustainable European Union. *Miner. Econ.* 34, 187 — 208.
<https://doi.org/10.1007/s13563-021-00265-4>
- Costis, S., Mueller, K.K., Coudert, L., Carmen Mihaela Neculita, Reynier, N., Blais, J.-F., 2021. Recovery potential of rare earth elements from mining and industrial residues: A review and cases studies. *J. Geochem. Explor.* 221.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106699>
- Couturier, J., Pierre Tamba Oulare, Collin, B., Lallemand, C., Kieffer, I., Longerey, J., Chaurand, P., Rose, J., Borschneck, D., Angeletti, B., Criquet, S., Podor, R., Pourkhorsandi, H., Arrachart, G., Levard, C., 2024. Yttrium speciation variability in bauxite residues of various origins, ages and storage conditions. *J. Hazard. Mater.* 464.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132941>
- d'Ambrosio, L., 2021. Le devoir de vigilance : une innovation juridique entre continuités et ruptures: *Droit Société* N° 106, 633 — 647.
<https://doi.org/10.3917/drs1.106.0633>
- de Almeida, A.T., Fong, J., Falkner, H., Bertoldi, P., 2017. Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 74, 1275 — 1286.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.112>
- de Koning, A., Kleijn, R., Huppel, G., Sprecher, B., van Engelen, G., Tukker, A., 2018. Metal supply constraints for a low-carbon economy? *Resour. Conserv. Recycl.* 129, 202 — 208.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.040>
- 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, (Proceedings edited by Jeffrey C. Reid), Professional Paper.
- Deady, É.A., Mouchos, E., Goodenough, K., Williamson, B.J., Wall, F., 2016. A review of the potential for rare-earth element resources from European red muds: examples from Seydişehir, Turkey and Parnassus-Giona, Greece. *Mineral. Mag.* 80, 43-43 — 61.
<https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.052>
- Decrée, S., Coint, N., Debaille, V., Hagen-Peter, G., Leduc, T., Schiellerup, H., 2023. The potential for REEs in igneous-related apatite deposits in Europe. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 526, 219 — 249.
<https://doi.org/10.1144/SP526-2021-175>
- Dehaine, Q., Filippov, L.O., Glass, H.J., Rollinson, G., 2019. Rare-metal granites as a potential source of critical metals: A geometallurgical case study. *Ore Geol. Rev.* 104, 384 — 402.
<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.11.012>
- Demol, J., Ho, E., Soldenhoff, K., Senanayake, G., 2019. The sulfuric acid bake and leach route for processing of rare earth ores and concentrates: A review. *Hydrometallurgy* 188, 123 — 139.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.05.015>
- Deng, C., Zhang, X., Guo, F., Wang, S., Wang, X., 2025. The current status of recycling technology for waste NdFeB resources. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 27, 796 — 811.
<https://doi.org/10.1007/s10163-025-02162-2>
- 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. *J. Clean. Prod.* 277.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123299>
- Dijk, M., Wells, P., Kemp, R., 2016. Will the momentum of the electric car last? Testing an hypothesis on disruptive innovation. *Technol. Forecast. Soc. Change* 105, 77 — 88.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.01.013>
- Dingwall, J., 2020. Commercial Mining Activities in the Deep Seabed beyond National Jurisdiction: the International Legal Framework, in: *Publications on Ocean Development*. pp. 139 — 162.
https://doi.org/10.1163/9789004391567_009

- Dinh, T., Dobo, Z., Kovacs, H., 2022. Phytomining of rare earth elements - A review. *Chemosphere* 297. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134259>
- Dobransky, S., 2015. The Curious Disjunction of Rare Earth Elements and US Politics: Analyzing the Inability to Develop a Secure REE Supply Chain, in: Kiggins, R.D. (Ed.), *The Political Economy of Rare Earth Elements*. Palgrave Macmillan UK, London, pp. 85 — 105. https://doi.org/10.1057/9781137364241_5
- Dou, S., Xu, D., Zhu, Y., Keenan, R., 2023. Critical mineral sustainable supply: Challenges and governance. *Futures* 146. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2023.103101>
- Dunlap, A., Riquito, M., 2023. Social warfare for lithium extraction? Open-pit lithium mining, counterinsurgency tactics and enforcing green extractivism in northern Portugal. *Energy Res. Soc. Sci.* 95. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102912>
- El Maangar, A., Fleury, C., Pellet-Rostaing, S., Zemb, T., 2024. Leaching and recycling of NdFeB permanent magnets using ionic non-toxic hydrotropes instead of extractants. *Front. Chem. Eng.* 6. <https://doi.org/10.3389/fceng.2024.1420008>
- Elerian, M., Cees van Rhee, Helmons, R., 2022. Experimental and Numerical Modelling of Deep-Sea-Mining-Generated Turbidity Currents. *Minerals* 12. <https://doi.org/10.3390/min12050558>
- Fan, X., Xiang, J., Zhang, D., Nie, Z., Liu, Y., Zhang, L., Zhang, D., 2022. Highly-efficient and sequential recovery of rare earth elements, alumina and silica from coal fly ash via a novel recyclable ZnO sinter method. *J. Hazard. Mater.* 437, 129308. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129308>
- Fathollahzadeh, H., Hackett, M.J., Khaleque, H.N., Eksteen, J.J., Kaksonen, A.H., Watkin, E.L.J., 2018. Better together: Potential of co-culture microorganisms to enhance bioleaching of rare earth elements from monazite. *Bioresour. Technol. Rep.* 3, 109 — 118. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.07.003>
- Figueiredo, F.M.J., M. Fatima Araujo, Marcalo, J., Leal, J.P., Sardinha, J.P., 2024. Determination of rare earth elements in CRT phosphors and NdFeB magnets residues using an ED-XRF portable spectrometer to assist field semi-quantitative screening. *Microchem. J.* <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110136>
- Fu, B., Hower, J.C., Zhang, W., Luo, G., Hu, H., Yao, H., 2022. A review of rare earth elements and yttrium in coal ash: Content, modes of occurrences, combustion behavior, and extraction methods. *Prog. Energy. Comb. Sci.* 88, 100954. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100954>
- Fonseca, A., Mary Louise McAllister, Fitzpatrick, P., 2013. Measuring what? A comparative anatomy of five mining sustainability frameworks. *Miner. Eng.* 46, 180 — 186. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.008>
- Gavin, B., 2015. Sustainable development of China's rare earth industry within and without the WTO. *J. World Trade* 49, 495 — 516. <https://doi.org/10.54648/trad2015020>
- Ge, Z., Geng, Y., Dong, F., Liang, J., Zhong, C., 2022. Towards carbon neutrality: Improving resource efficiency of the rare earth elements in China. *Front. Environ. Sci.* 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.962724>
- Gehlmann, F., Haustein, S., Klockner, C.A., 2024. Willingness to pay extra for electric cars with sustainably produced batteries. *Transp. Res. Part - Transp. Environ.* 128. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104110>
- Gemechu, E.D., Sonnemann, G., Young, S.B., 2017. Geopolitical-related supply risk assessment as a complement to environmental impact assessment: the case of electric vehicles. *Int. J. Life Cycle Assess.* 22, 31-39 — 39. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0917-4>
- Gholz, E., Hughes, L., 2021. Market structure and economic sanctions: the 2010 rare earth elements episode as a pathway case of market adjustment. *Rev. Int. Polit. Econ.* 28, 611 — 634. <https://doi.org/10.1080/09692290.2019.1693411>
- Gkika, D., Chalari, M., Kyzas, G.Z., 2024. Review of Methods for Obtaining Rare Earth Elements from Recycling and Their Impact on the Environment and Human Health.
- Goldman, J.A., 2014. The U.S. Rare Earth Industry: Its Growth and Decline. *J. Policy Hist.* 26, 139 — 166. <https://doi.org/10.1017/s0898030614000013>
- Golinska-Dawson, P., Sakao, T., Sundin, E., Werner-Lewandowska, K., 2025. How can OEMs scale up remanufacturing in product-as-a-service (PaaS)? — challenges and enablers from a theoretical and industrial perspective. *Int. J. Prod. Res.* 63, 3854 — 3883. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2423798>
- Gonzalez-Torres, M., Bertoldi, P., Castellazzi, L., Perez-Lombard, L., 2023. Review of EU product energy efficiency policies: What have we achieved in 40 years? *J. Clean. Prod.* 421, 138442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138442>

- Good, N.M., Kang-Yun, C.S., Su, M.Z., Zytick, A.M., Barber, C.C., Vu, H.N., Grace, J.M., Nguyen, H.H., Zhang, W., Skovran, E., Fan, M., Park, D.M., Norma Cecilia Martinez-Gomez, 2023. Scalable and Consolidated Microbial Platform for Rare Earth Element Leaching and Recovery from Waste Sources. *Environ. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c06775>
- Govindan, K., Hasanagic, M., 2018. A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective. *Int. J. Prod. Res.* 56, 278 — 311. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402141>
- Graedel, T.E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B.K., Sibley, S.F., Sonnemann, G., 2011. What Do We Know About Metal Recycling Rates? *J. Ind. Ecol.* 15, 355 — 366. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x>
- 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. *Resour. Conserv. Recycl.* 218, 108197. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108197>
- Grosjean, N., Blaudez, D., Chalot, M., Gross, E.M., Le Jean, M., 2020. Identification of new hardy ferns that preferentially accumulate light rare earth elements: a conserved trait within fern species. *Environ. Chem.* 17, 191 — 200. <https://doi.org/10.1071/EN19182>
- Grosjean, N., Purwadi, I., Sirguey, C., Chalot, M., Le Jean, M., van der Ent, A., Blaudez, D., 2024. Chapter Two - Rare earth elements in plants: transfer, transport, accumulation, impacts and perspectives, in: Chalot, M. (Ed.), *Advances in Botanical Research*. Academic Press, pp. 19 — 61. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2023.10.005>
- Grosse, F., 2023. Croissance soutenable? la société au défi de l'économie circulaire. PUG, Fontaine.
- Grosse, F., 2014. Les limites du recyclage dans un contexte de demande croissante de matières premières: *Ann. Mines - Responsab. Environ.* N° 76, 58 — 63. <https://doi.org/10.3917/re.076.0058>
- Gu, X., Ieromonachou, P., Zhou, L., Tseng, M.-L., 2018. Developing pricing strategy to optimise total profits in an electric vehicle battery closed loop supply chain. *J. Clean. Prod.* 203, 376-385 — 385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.209>
- Gui, L., Atasu, A., Ergun, Ö., L. Beril Toktay, 2013. Implementing Extended Producer Responsibility Legislation. *J. Ind. Ecol.* 17, 262-276 — 276. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00574.x>
- Gupta, A., Caravan, P., Price, W.S., Platas-Iglesias, C., Gale, E.M., 2020. Applications for Transition-Metal Chemistry in Contrast-Enhanced Magnetic Resonance Imaging. *Inorg. Chem.* 59, 6648 — 6678. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c00510>
- Habib, K., Hansdottir, S.T., Habib, H., 2020. Critical metals for electromobility: Global demand scenarios for passenger vehicles, 2015-2050. *Resour. Conserv. Recycl.* <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104603>
- Habib, K., Schibye, P.K., Vestbo, A.P., Dall, O., Wenzel, H., 2014. Material Flow Analysis of NdFeB Magnets for Denmark: A Comprehensive Waste Flow Sampling and Analysis Approach. *Environ. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1021/es501975y>
- Habibzadeh, A., Kucuker, M.A., Gökelma, M., 2023. Review on the Parameters of Recycling NdFeB Magnets via a Hydrogenation Process. *ACS Omega* 8, 17431 — 17445. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00299>
- Hagelüken, C., Lee-Shin, J.U., Carpentier, A., Heron, C., 2016. The EU Circular Economy and Its Relevance to Metal Recycling. *Recycling* 1, 242 — 253. <https://doi.org/10.3390/recycling1020242>
- Halkos, G.E., Aslanidis, P.-S.C., 2024. Reviewing the integrated institutional waste-related framework for circular economy in the European Union. *Waste Manag. Bull.* 2, 28 — 35. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.06.002>
- Hanauer, L., Morris, L.J., 2014. Chinese Engagement in Africa: Drivers, Reactions, and Implications for U.S. Policy
- Harpprecht, C., Brenda Miranda Xicotencatl, Sander van Nielen, Marc van der Meide, Li, C., Li, Z., Tukker, A., Steubing, B., 2024. Future environmental impacts of metals: A systematic review of impact trends, modelling approaches, and challenges. *Resour. Conserv. Recycl.* 205. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107572>
- Hatakeyama, K., 2015. Rare Earths and Japan: Traditional Vulnerability Reconsidered, in: Kiggins, R.D. (Ed.), *The Political Economy of Rare Earth Elements*. Palgrave Macmillan UK, London, pp. 43 — 61. https://doi.org/10.1057/9781137364241_3
- He, P., Feng, H., Hu, G., Hewage, K., Achari, G., Wang, C., Sadiq, R., 2020. Life cycle cost analysis for recycling high-tech minerals from waste mobile phones in China. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119498>
- He, Y., Ma, L., Liang, X., Li, X., Zhu, J., He, H., 2024. Resistant rare earth phosphates as possible sources of environmental dissolved rare earth elements: Insights from experimental bio-weathering of xenotime and monazite. *Chem. Geol.* 661, 122186. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122186>

- Hidalgo-Crespo, J., Riel, A., Golinska-Dawson, P., Peeters, J.R., Werner-Lewandowska, K., Dufflou, J.R., 2024. Facilitating circularity: challenges and design guidelines of Product-as-a-Service (PaaS) business model offers for electrical and electronic equipment. *Procedia CIRP*, 34th CIRP Design Conference 128, 567 – 572. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.037>
- Hoenderdaal, S., Luis Tercero Espinoza, Marscheider-Weidemann, F., Graus, W., 2013. Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.043>
- Hong, S.K., Kim, Y., Kim, Y.-M., 2024. Assessment of REY resource potential in deep-sea sediments with Fe – Mn (oxyhydr)oxides in the Pacific Ocean. *J. Geochem. Explor.* 267, 107581. <https://doi.org/10.1016/j.jexplo.2024.107581>
- Hool, A., Helbig, C., Wierink, G., 2023. Challenges and opportunities of the European Critical Raw Materials Act. *Miner. Econ.* <https://doi.org/10.1007/s13563-023-00394-y>
- Horta Arduin, R., Mathieux, F., Huisman, J., Blengini, G.A., Charbuillet, C., Wagner, M., Baldé, C.P., Perry, N., 2020. Novel indicators to better monitor the collection and recovery of (critical) raw materials in WEEE: Focus on screens. *Resour. Conserv. Recycl.* 157, 104772. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104772>
- Huiyun, J., Xu, M., Zhou, L., 2019. Collaborative collection effort strategies based on the “Internet plus recycling” business model. *J. Clean. Prod.* 241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118120>
- Humphreys, D., 1995. Whatever happened to security of supply? Minerals policy in the post-cold war world. *Resour. Policy* 21, 91 – 97. [https://doi.org/10.1016/0301-4207\(95\)00057-w](https://doi.org/10.1016/0301-4207(95)00057-w)
- Ikhlal, M., 2017. Evaluation of the environmental impacts of rare earth elements production. *Int. J. Environ. Stud.* <https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1341737>
- Innocenzi, V., Nicolo Maria Ippolito, Ida De Michelis, Prisciandaro, M., Medici, F., Veglio, F., 2017. A review of the processes and lab-scale techniques for the treatment of spent rechargeable NiMH batteries. *J. Power Sources*. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.07.034>
- Islam, M.T., Huda, N., 2018. Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review. *Resour. Conserv. Recycl.* 137, 48–75 – 75. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.026>
- Jalali, J., Lebeau, T., 2021. The Role of Microorganisms in Mobilization and Phytoextraction of Rare Earth Elements: A Review. *Front. Environ. Sci.* 9, 688430. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.688430>
- Jally, B., Laubie, B., Chour, Z., Muhr, L., Qiu, R., Jean Louis Morel, Tang, Y., Simonnot, M.-O., 2021. A new method for recovering rare earth elements from the hyperaccumulating fern *Dicranopteris linearis* from China. *Miner. Eng.* 166. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106879>
- Jansen, M., Meisen, T., Plociennik, C., Berg, H., Pomp, A., Windholz, W., 2023. Stop Guessing in the Dark: Identified Requirements for Digital Product Passport Systems. *Systems* 11. <https://doi.org/10.3390/systems11030123>
- Jenkins, H., 2004. Corporate social responsibility and the mining industry: conflicts and constructs. *Corp. Soc. Responsib. Environ. Manag.* 11, 23 – 34. <https://doi.org/10.1002/csr.50>
- Jenkins, H., Obara, L., 2006. Corporate Social Responsibility (CSR) in the mining industry – the risk of community dependency, in: *Corporate Responsibility Research Conference*, Dublin. Citeseer, pp. 4 – 5.
- Jiang, J., Lu, Y., Yan, X., Wang, L., 2020. An optimization dust-removing electrode design method aiming at improving dust mitigation efficiency in lunar exploration. *Acta Astronaut.* 166, 59 – 68. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.10.004>
- Jin, H., Byung Duk Song, Yih, Y., Sutherland, J.W., 2019. A bi-objective network design for value recovery of neodymium-iron-boron magnets: A case study of the United States. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.101>
- Jin, H., Yih, Y., Sutherland, J.W., 2018. Modeling operation and inventory for rare earth permanent magnet recovery under supply and demand uncertainties. *J. Manuf. Syst.* <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2017.11.002>
- Jones, P.T., Geysen, D., Tielemans, Y., Van Passel, S., Pontikes, Y., Blanpain, B., Quaghebeur, M., Hoekstra, N., 2013. Enhanced Landfill Mining in view of multiple resource recovery: a critical review. *J. Clean. Prod.* 55, 45–55 – 55. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.021>

- Jonsson, E., Törmänen, T., Keiding, J.K., Bjerkgård, T., Eilu, P., Pokki, J., Gautneb, H., Reginiussen, H., Rosa, D., Sadeghi, M., Sandstad, J.S., Stendal, H., 2023. Critical metals and minerals in the Nordic countries of Europe: diversity of mineralization and green energy potential. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 526, 95 — 152.
<https://doi.org/10.1144/SP526-2022-55>
- Jowitt, S.M., Werner, T.T., Weng, Z., Mudd, G.M., 2018. Recycling of the rare earth elements. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*
<https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.008>
- Julsrud, T.E., Kallbekken, S., Aasen, M., 2023. Can shared autonomous vehicles become a sustainable mode of mobility in the future? Insights from a practice-based study of urban dwellers in Norway. *J. Environ. Policy Plan.* 25, 703 — 722.
<https://doi.org/10.1080/1523908x.2023.2251923>
- Kama, K., 2015. Circling the economy: resource-making and marketization in EU electronic waste policy. *Area* 47, 16-23 — 23.
<https://doi.org/10.1111/area.12143>
- Kamenopoulos, S.N., Shields, D., Agioutantis, Z., 2015. Sustainable Development Criteria and Indicators for the Assessment of Rare Earth Element Mining Projects, in: *Rare Earths Industry: Technological, Economic, and Environmental Implications*. pp. 87 — 109.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802328-0.00006-1>
- Kampker, A., Heimes, H.H., Offermanns, C., Friege, M.H., Graaf, M., Natalia Soldan Cattani, Spaeth, B., 2023. Cost-Benefit Analysis of Downstream Applications for Retired Electric Vehicle Batteries. *World Electr. Veh. J.* 14.
<https://doi.org/10.3390/wevj14040110>
- Kang, X., Csetenyi, L., Gadd, G.M., 2023. Fungal biorecovery of cerium as oxalate and carbonate biominerals. *Fungal Biol.* 127, 1187 — 1197.
<https://doi.org/10.1016/j.funbio.2022.07.006>
- Kannstatter, T., Meerschiff, S., 2015. Launching an E-carsharing system in the polycentric area of Ruhr. *Green Energy Technol.* 203, 187 — 208.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-13194-8_11
- Katiyar, N., Kulshreshtha, A., Singh, P.K., 2024. A Review of Integration Techniques of Multi-Geoscience Data-Sets in Mineral Prospectivity Mapping. *Earth Sci.* 13, 127 — 140.
<https://doi.org/10.11648/j.earth.20241304.12>
- Kato, Y., Fujinaga, K., Nakamura, K., Takaya, Y., Kitamura, K., Ohta, J., Toda, R., Nakashima, T., Iwamori, H., 2011. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nat. Geosci.* 4, 535 — 539.
<https://doi.org/10.1038/ngeo1185>
- Khan, S.A., 2016. E-products, E-waste and the Basel Convention: Regulatory Challenges and Impossibilities of International Environmental Law. *Rev. Eur. Comp. Int. Environ. Law* 25, 248-260 — 260.
<https://doi.org/10.1111/reel.12163>
- Kiggins, R.D. (Ed.), 2015. *The Political Economy of Rare Earth Elements*. Palgrave Macmillan UK, London.
<https://doi.org/10.1057/9781137364241>
- Kleijn, R., van der Voet, E., 2010. Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 2784 — 2795.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.066>
- Klinger, J.M., 2018a. *Rare Earth Frontiers*. Cornell University Press.
- Klinger, J.M., 2018b. Rare earth elements: Development, sustainability and policy issues. *Extr. Ind. Soc.* 5, 1 — 7.
<https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.12.016>
- Koese, M., Parzer, M., Sprecher, B., Kleijn, R., 2025. Self-sufficiency of the European Union in critical raw materials for E-mobility. *Resour. Conserv. Recycl.* 212, 108009.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108009>
- Komnitsas, K., 2020. Social License to Operate in Mining: Present Views and Future Trends. *Resour.-Basel* 9.
<https://doi.org/10.3390/resources9060079>
- Kraus, C., 2010. Creating a Soviet “Semi-Colony”? Sino-Soviet Cooperation and its Demise in Xinjiang, 1949-1955. *Chin. Hist. Rev.* 17, 129 — 165.
<https://doi.org/10.1179/tcr.2010.17.2.129>
- Ku, A., Setlur, A., Loudis, J., 2015. Impact of Light Emitting Diode Adoption on Rare Earth Element Use in Lighting: Implications for Yttrium, Europium, and Terbium Demand. *Electrochem. Soc. Interface*.
<https://doi.org/10.1149/2.F04154if>
- Kulkarni, S., Zhao, F., Nlebedim, I.C., Fredette, R., Paranthaman, M.P., 2023. Comparative Life Cycle Assessment of Injection Molded and Big Area Additive Manufactured NdFeB Bonded Permanent Magnets. *J. Manuf. Sci. Eng.-Trans. Asme*.
<https://doi.org/10.1115/1.4056489>
- Langkau, S., Erdmann, M., 2021. Environmental impacts of the future supply of rare earths for magnet applications. *J. Ind. Ecol.*
<https://doi.org/10.1111/jiec.13090>

Lanzilotti, C.O., Pinto, L.F.R., Facchini, F., Digiesi, S., 2022. Embedding Product-Service System of Cutting Tools into the Machining Process: An Eco-Efficiency Approach toward Sustainable Development. *Sustainability* 14. <https://doi.org/10.3390/su14031100>

Laurent, B., 2023. Quelle politique du territoire face à l'extraction minière?, in: Cerceau, J., Laurent, B. (Eds.), *Quand La Mine Déborde. Enquêtes Sur La Fabrique Des Territoires Extractifs*. Presses des Mines, pp. 157 — 178.

Lhuillier, G., 2022. The Proposal for a European Directive on Duty of care of company with regard to sustainability / La proposition de directive sur le devoir de vigilance des entreprises en matière de durabilité, in *International Business Law Journal*, Sweet & Maxwell, issue 2022, .N°5, pp. 422-455.

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, 116-125 — 125. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.06.009>

Li, Z., Zhong, X., Xu, X., 2023. The mechanism of retired power batteries recycling through blockchain token incentives. *J. Clean. Prod.* 415. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137560>

Liang, Y., Kleijn, R., Voet, E. van der, 2023a. Increase in demand for critical materials under IEA Net-Zero emission by 2050 scenario. *Appl. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121400>

Liang, Y., Kleijn, R., Voet, E. van der, 2023b. Increase in demand for critical materials under IEA Net-Zero emission by 2050 scenario. *Appl. Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121400>

Liu, T., Chen, J., 2021. Extraction and separation of heavy rare earth elements: A review. *Sep. Purif. Technol.* 276, 119263. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119263>

Lovik, A.N., Hagelueken, C., Wager, P., 2018. Improving supply security of critical metals: Current developments and research in the EU. *Sustain. Mater. Technol.* 15, 9-18 — 18. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2018.01.003>

Lu, G., Liang, H., 2024. Review and test on rare earths recovery from polishing powder waste. *Heliyon* 10, e40785. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.10.101>

Luo, X., Zhang, Y., Zhou, H., He, K., Luo, C., Liu, Z., Tang, X., 2022. Review on the Development and Utilization of Ionic Rare Earth Ore. *Minerals* 12, 554. <https://doi.org/10.3390/min12050554>

Luszczek, K., Przylibski, T.A., 2019. Potential deposits of selected metallic resources on L chondrite parent bodies. *Planet. Space Sci.* 168, 40 — 51. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.02.005>

Lyman, J.W., Palmer, G.R., 1992. Scrap treatment method for rare earth transition metal alloys. *US 5,129,945 (US 5129945A)*.

Machacek, E., Fold, N., 2018. Competitors contained? Manufacturer strategies in the global rare earth value chain: Insights from the magnet filament. *Extr. Ind. Soc.- Int. J.* 5, 18 — 27. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.12.012>

Machacek, E., Richter, J.L., Habib, K., Klossek, P., 2015. Recycling of rare earths from fluorescent lamps: Value analysis of closing-the-loop under demand and supply uncertainties. *Resour. Conserv. Recycl.* 104, 76 — 93. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.005>

Magrini, C., Jagodzinska, K., 2022. Can bioleaching of NIB magnets be an answer to the criticality of rare earths? An ex-ante Life Cycle Assessment and Material Flow Cost Accounting. *J. Clean. Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132672>

Malainine, C.-E., Raji, O., Ouabid, M., Bodinier, J.-L., Hicham El Messbahi, 2022. Prospectivity mapping of carbonatite-associated iron oxide deposits using an integration process of ASTER and Sentinel-2A multispectral data. *Int. J. Remote Sens.* 43, 4951 — 4983. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2121189>

Manhart, A., 2011. International Cooperation for Metal Recycling From Waste Electrical and Electronic Equipment. *J. Ind. Ecol.* 15, 13-30 — 30. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00307.x>

Marty, J., Ruel, S., 2025. Unpacking the interconnected challenges of rare metals supply chains: A systematic literature network analysis and conceptual framework. *Resour. Policy* 106, 105624. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105624>

Marx, J., Schreiber, A., Zapp, P., Walachowicz, F., 2018. Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Permanent Magnet Production from Different Rare Earth Deposits. *Acs Sustain. Chem. Eng.* <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04165>

Mazzarano, M., 2022. Material governance and circularity policies: How waste policies and innovation affect household appliances? accumulation. *Ecol. Econ.* 200. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107538>

McGaughey, S.A., Iqbal, S., De Rosa, A., Caley, J.A., Kaksonen, A.H., Villa-Gomez, D., Byrt, C.S., 2025. Interactions of rare earth elements with living organisms and emerging biotechnical applications. *PLANTS PEOPLE PLANET* 7, 1251 — 1274. <https://doi.org/10.1002/ppp3.70010>

- McLeod, C.L., Krekeler, Mark.P.S., 2017. Sources of Extraterrestrial Rare Earth Elements: To the Moon and Beyond. *Resour.-Basel* 6. <https://doi.org/10.3390/resources6030040>
- McLeod, C.L., Shaulis, B.J., 2018. Rare Earth Elements in Planetary Crusts: Insights from Chemically Evolved Igneous Suites on Earth and the Moon. *Minerals* 8. <https://doi.org/10.3390/min8100455>
- Medeiros, C.A.D., Trebat, N.M., 2017. Transforming natural resources into industrial advantage: the case of China's rare earths industry. *Braz. J. Polit. Econ.* 37, 504 — 526. <https://doi.org/10.1590/0101-31572017v37n03a03>
- Menendez, A., James, R., Shulga, N., Connelly, D., Roberts, S., 2018. Linkages between the Genesis and Resource Potential of Ferromanganese Deposits in the Atlantic, Pacific, and Arctic Oceans. *Minerals* 8. <https://doi.org/10.3390/min8050197>
- Meng, X., Zhao, H., Zhang, Y., Shen, L., Gu, G., Qiu, G., Zhang, X., Yu, H., He, X., Liu, C., 2022. Simulated bioleaching of ion-adsorption rare earth ore using metabolites of biosynthetic citrate: An alternative to cation exchange leaching. *Miner. Eng.* 189. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107900>
- Meng, X., Zhao, H., Zhao, Y., Shen, L., Gu, G., Qiu, G., 2023. Heap leaching of ion adsorption rare earth ores and REEs recovery from leachate with lixiviant regeneration. *Sci. Total Environ.* 898. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165417>
- Merle, R., Troll, V.R., Hook, M., Kuchler, M., Byrne, P.K., Donoso, G., 2023. Extra-terrestrial resources: A potential solution for securing the supply of rare metals for the coming decades? *Geol. Today* 39, 225 — 230. <https://doi.org/10.1111/gto.12454>
- Merlin, J., Laurent, B., Gunzburger, Y., 2021. Promise engineering: Investment and its conflicting anticipations in the French mining revival. *Econ. Soc.* 50, 590 — 617.
- Micheaux, H., 2023. L'évolution de la responsabilité élargie du producteur : de la fin de vie des produits à l'économie circulaire : *Entrep. Hist.* n° 110, 87 — 104. <https://doi.org/10.3917/eh.110.0087>
- Miller, K.A., Brigden, K., Santillo, D., Currie, D., Johnston, P., Thompson, K.F., 2021. Challenging the Need for Deep Seabed Mining From the Perspective of Metal Demand, Biodiversity, Ecosystems Services, and Benefit Sharing. *Front. Mar. Sci.* 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.706161>
- Mohammadi, A., Badewa, O.A., Chulaee, Y., Ionel, D.M., Essakiappan, S., Manjrekar, M., leee, 2023. Design Optimization of a Direct-drive Wind Generator with Non-rare-earth PM Flux Intensifying Stator and Reluctance Rotor. 2023 leee Int. Electr. Mach. Drives Conf. Iemdc. <https://doi.org/10.1109/iemdc55163.2023.10238962>
- Moldoveanu, G.A., Papangelakis, V.G., 2016. An overview of rare-earth recovery by ion-exchange leaching from ion-adsorption clays of various origins. *Mineral. Mag.* 80, 63 — 76. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.051>
- Monfared, B., Furberg, R., Palm, B., 2014. Magnetic vs. vapor-compression household refrigerators: A preliminary comparative life cycle assessment. *Int. J. Refrig.-Rev. Int. Froid.* <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.02.013>
- Morrow, J.R., Tsitovich, P.B., McMahon, M., Gilad, A., Bulte, J., VanZijl, P., 2017. Transition Metal paraCEST Probes as Alternatives to Lanthanides. *Chem. Exch. Satur. Transf. Imaging Adv. Appl.* 257 — 282.
- Murrey, A., Jackson, N.A., 2020. A decolonial critique of the racialized "localwashing" of extraction in Central Africa. *Ann. Am. Assoc. Geogr.* 110, 917 — 940.
- Nakajima, N., Vanderburg, W.H., 2005. A Failing Grade for Our Efforts to Make Our Civilization More Environmentally Sustainable. *Bull. Sci. Technol. Soc.* 25, 129-144 — 144. <https://doi.org/10.1177/0270467605274856>
- Nassar, N.T., Graedel, T.E., Harper, E.M., 2015. By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Sci. Adv.* 1, e1400180. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400180>
- Neramballi, A., Milios, L., Sakao, T., Matschewsky, J., 2024. Toward a policy landscape to support the product-as-a-service design process for a circular economy. *J. Ind. Ecol.* 28, 1045 — 1059. <https://doi.org/10.1111/jiec.13535>
- Ngom, A., 2022. Les terres rares d'Afrique, un potentiel recours pour l'Union européenne dans le respect du droit international: *Rev. Int. Droit Économique t.XXXVI*, 5 — 27. <https://doi.org/10.3917/ride.361.0005>
- Nguyen, R.T., Diaz, L.A., D. Devin Imholte, Lister, T.E., 2017. Economic Assessment for Recycling Critical Metals From Hard Disk Drives Using a Comprehensive Recovery Process. *Jom.* <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2399-2>
- Ni'am, A.C., Wang, Y.-F., Chen, S.-W., Chang, G.-M., You, S.-J., 2020. Simultaneous recovery of rare earth elements from waste permanent magnets (WPMs) leach liquor by solvent extraction and hollow fiber supported liquid membrane. *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.* 148, 107831. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107831>

- Nikulski, J.S., Ritthoff, M., Nadja von Gries, 2021. The Potential and Limitations of Critical Raw Material Recycling: The Case of LED Lamps. *Resour.-Basel*. <https://doi.org/10.3390/resources10040037>
- Niskanen, J., Lahtinen, M., Perämäki, S., 2022. Acetic acid leaching of neodymium magnets and iron separation by simple oxidative precipitation. *Clean. Eng. Technol.* 10, 100544. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100544>
- Nlebedim, I.C., King, A.H., 2018. Addressing Criticality in Rare Earth Elements via Permanent Magnets Recycling. *Jom*. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2698-7>
- Nordelof, A., Grunditz, E., Lundmark, S., Tillman, A.-M., Alatalo, M., Thiringer, T., 2019. Life cycle assessment of permanent magnet electric traction motors. *Transp. Res. Part - Transp. Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.004>
- Nykanen, V., Groves, D.I., Ojala, V.J., Eilu, P., Gardoll, S.J., 2008. Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper-gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland. *Aust. J. Earth Sci.* 55, 25 – 38. <https://doi.org/10.1080/09692290.2019.1693411>
- Omodara, L., Turpeinen, E.M., Pitkaaho, S., Keiski, R.L., 2020. Substitution potential of rare earth catalysts in ethanol steam reforming. *Sustain. Mater. Technol.* 26. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00237>
- Palmie, M., Miehe, L., Mair, J., Wincent, J., 2024. Valuation entrepreneurship through product-design and blame-avoidance strategies: How Tesla managed to change the public perception of sustainable innovations. *J. Prod. Innov. Manag.* 41, 644 – 676. <https://doi.org/10.1111/jpim.12732>
- Pateli, I.M., Abbott, A.P., Binnemans, K., Nerea Rodriguez Rodriguez, 2020. Recovery of yttrium and europium from spent fluorescent lamps using pure levulinic acid and the deep eutectic solvent levulinic acid-choline chloride. *Rsc Adv.* <https://doi.org/10.1039/d0ra05508e>
- Paulikas, D., Katona, S., Ilves, E., Ali, S.H., 2022. Deep-sea nodules versus land ores: A comparative systems analysis of mining and processing wastes for battery-metal supply chains. *J. Ind. Ecol.* 26, 2154 – 2177. <https://doi.org/10.1111/jiec.13225>
- Paulson, L., Büchs, M., 2022. Public acceptance of post-growth: Factors and implications for post-growth strategy. *Futures* 143, 103020. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.103020>
- Peelman, S., Sun, Z.H.I., Sietsma, J., Yang, Y., Alam, S., Kim, H., Neelameggham, N., Ouchi, T., Oosterhof, H., 2016. Hydrometallurgical Extraction Of Rare Earth Elements From Low Grade Mine Tailings. *Rare Met. Technol.* 2016 17 – 29
- Peet, R., Watts, M. (Eds.), 2010. *Liberation ecologies: environment, development, social movements*, 2. ed., digital print. ed. Routledge, London.
- Peiravi, M., Dehghani, F., Ackah, L., Baharlouei, A., Godbold, J., Liu, J., Mohanty, M., Ghosh, T., 2021. A Review of Rare-Earth Elements Extraction with Emphasis on Non-conventional Sources: Coal and Coal Byproducts, Iron Ore Tailings, Apatite, and Phosphate Byproducts. *Min. Metall. Explor.* 38, 1 – 26. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00307-5>
- Peiro, L.T., Mendez, G.V., 2013. Material and Energy Requirement for Rare Earth Production. *Jom*. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0719-8>
- Petov, V., Babaevskaya, D., Taratkin, M., Chuvalov, L., Lusuadi, L., Misrai, V., Sukhanov, R., Scoffone, C.M.M., Enikeev, D., 2022. Thulium Fiber Laser Enucleation of the Prostate: Prospective Study of Mid- and Long-term Outcomes in 1328 Patients. *J. Endourol.* 36, 1231 – 1236. <https://doi.org/10.1089/end.2022.0029>
- Petterson, M.G., Tawake, A., 2019. The Cook Islands (South Pacific) experience in governance of seabed manganese nodule mining. *Ocean Coast. Manag.* 167, 271 – 287. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.09.010>
- 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, 165. <https://doi.org/10.2533/chimia.2019.165>
- Pim, J.E., 2021. “Galiza is (not) a mine”: rural responses to pro-extractivist policies. *Araucaria-Rev. Iberoam. Filos. Polit. Humanidades* 23, 441 – 466. <https://doi.org/10.12795/araucaria.2021.i48.20>
- Prats Raspini, J., Canal Bonfante, M., Rossetti Cunico, F., Alarcon, O.E., Campos, L.M.S., 2022. Drivers and barriers to a circular economy adoption: a sector perspective on rare earth magnets. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01424-7>
- Prno, J., Scott Slocombe, D., 2012. Exploring the origins of ‘social license to operate’ in the mining sector: Perspectives from governance and sustainability theories. *Resour. Policy* 37, 346 – 357. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.04.002>
- Qiu, Y., Suh, S., 2019. Economic feasibility of recycling rare earth oxides from end-of-life lighting technologies. *Resour. Conserv. Recycl.* <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104432>

- Rabbani, M., Taqi Rabbani, M., Muthoni, F., Sun, Y., Vahidi, E., 2024. Advancing phytomining: Harnessing plant potential for sustainable rare earth element extraction. *Bioresour. Technol.* 401, 130751. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130751>
- Radley, B., 2024. Conflict Minerals Inc.: War, Profit and White Saviourism in Eastern Congo. *Afr. Aff.* 123, 419 — 421. <https://doi.org/10.1093/afraf/adae023>
- Ralph, N., Assoc., 2021. A conceptual merging of circular economy, degrowth and conviviality design approaches applied to renewable energy technology. *J. Clean. Prod.* 319. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128549>
- Raminosoa, T., El-Refaie, A.M., Pan, D., Huh, K.-K., Alexander, J.P., Grace, K., Grubic, S., Galioto, S., Reddy, P.B., Shen, X., 2015. Reduced Rare-Earth Flux-Switching Machines for Traction Applications. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 51, 2959 — 2971. <https://doi.org/10.1109/tia.2015.2397173>
- Rasoulnia, P., Barthen, R., Lakaniemi, A.-M., Ali-Loytty, H., Puhakka, J.A., 2022. Low residual dissolved phosphate in spent medium bioleaching enables rapid and enhanced solubilization of rare earth elements from end-of-life NiMH batteries. *Miner. Eng.* <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107361>
- Rasoulnia, P., Barthen, R., Puhakka, J.A., Lakaniemi, A.-M., 2021a. Leaching of rare earth elements and base metals from spent NiMH batteries using gluconate and its potential bio-oxidation products. *J. Hazard. Mater.* <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125564>
- Rasoulnia, P., Barthen, R., Valtonen, K., Lakaniemi, A.-M., 2021b. Impacts of Phosphorous Source on Organic Acid Production and Heterotrophic Bioleaching of Rare Earth Elements and Base Metals from Spent Nickel-Metal-Hydride Batteries. *Waste Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01398-x>
- Rasoulnia, P., Hajdu-Rahkama, R., Puhakka, J.A., 2023. High-rate and-yield continuous fluidized-bed bioconversion of glucose-to-gluconic acid for enhanced metal leaching. *Chem. Eng. J.* <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142088>
- Reisdörfer, G., Bertuol, D.A., Tanabe, E.H., 2020. Extraction of neodymium from hard disk drives using supercritical CO₂ with organic acids solutions acting as cosolvents. *J. CO₂ Util.* 35, 277 — 287. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.10.008>
- Riano, S., Petranikova, M., Onghena, B., Tom Vander Hoogerstraete, Banerjee, D., Foreman, M.R.S.J., Ekberg, C., Binnemans, K., 2017. Separation of rare earths and other valuable metals from deep-eutectic solvents: a new alternative for the recycling of used NdFeB magnets. *Rsc Adv.* <https://doi.org/10.1039/c7ra06540j>
- Roche, L., Arendt, R., Bach, V., Finkbeiner, M., 2023. The social impacts of resource extraction for the clean energy transition: A qualitative news media analysis. *Extr. Ind. Soc.* 13. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101213>
- Rosario-Beltre, A.J., Sanchez-Espana, J., Rodriguez-Gomez, V., Francisco Javier Fernandez-Naranjo, Bellido-Martin, E., Adanez-Sanjuan, P., Julio Cesar Arranz-Gonzalez, 2023. Critical Raw Materials recovery potential from Spanish mine wastes: A national-scale preliminary assessment. *J. Clean. Prod.* 407. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137163>
- Ruiz, C., Antonio Arribas, Antonio Arribas, 2002. Mineralogy and geochemistry of the Masa Valverde blind massive sulphide deposit, Iberian Pyrite Belt (Spain). *Ore Geol. Rev.* 19, 1 — 22. [https://doi.org/10.1016/s0169-1368\(01\)00037-3](https://doi.org/10.1016/s0169-1368(01)00037-3)
- Sager, M., Wiche, O., 2024. Rare Earth Elements (REE): Origins, Dispersion, and Environmental Implications—A Comprehensive Review. *Environments* 11, 24. <https://doi.org/10.3390/environments11020024>
- Sajn, R., Alijagic, J., Ristic, I., 2024. Secondary Deposits as a Potential REEs Source in South-Eastern Europe. *Minerals* 14. <https://doi.org/10.3390/min14020120>
- Sakao, T., Golinska-Dawson, P., Vogt Duberg, J., Erik, S., Hidalgo-Crespo, J., Riel, A., Peeters, Jef, Green, Aaron, Mathieux, Fabrice, 2023. Product-as-a-service for critical raw materials: challenges, enablers, and needed research.
- Schleich, J., Durand, A., Brugger, H., 2021. How effective are EU minimum energy performance standards and energy labels for cold appliances? *Energy Policy* 149, 112069. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112069>
- Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P., Hake, J.-F., Voßenkaul, D., Friedrich, B., 2016. Environmental impacts of rare earth mining and separation based on eudialyte: A new European way. *Resources*. <https://doi.org/10.3390/resources5040032>

- Schulze, R., Buchert, M., 2016. Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material. *Resour. Conserv. Recycl.* <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.004>
- Secinaro, S., Calandra, D., Lanzalonga, F., Ferraris, A., 2022. Electric vehicles? consumer behaviours: Mapping the field and providing a research agenda. *J. Bus. Res.* 150, 399 – 416. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.06.011>
- Siderius, H.-P., 2013. The role of experience curves for setting MEPS for appliances. *Energy Policy* 59, 762–772 – 772. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.032>
- Simandl, G.J., Paradis, S., 2018. Carbonatites: related ore deposits, resources, footprint, and exploration methods. *Appl. Earth Sci.* 127, 123 – 152. <https://doi.org/10.1080/25726838.2018.1516935>
- Sobiech-Grabka, K., Stankowska, A., Jerzak, K., 2022. Determinants of Electric Cars Purchase Intention in Poland: Personal Attitudes v. Economic Arguments. *Energies* 15. <https://doi.org/10.3390/en15093078>
- Sprecher, B., Kleijn, R., Gert Jan Kramer, 2014. Recycling Potential of Neodymium: The Case of Computer Hard Disk Drives. *Environ. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1021/es501572z>
- Tahanian, H., Aliahmadi, M., Faiz, J., 2020. Ferrite Permanent Magnets in Electrical Machines: Opportunities and Challenges of a Non-Rare-Earth Alternative. *IEEE Trans. Magn.* 56. <https://doi.org/10.1109/tmag.2019.2957468>
- Tanvar, H., Barnwal, A., Dhawan, N., 2020. Characterization and evaluation of discarded hard disc drives for recovery of copper and rare earth values. *J. Clean. Prod.* 249, 119377. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119377>
- Tassin Campanella, V., 2024. *Routledge Handbook Of Seabed Mining And The Law Of The Sea*, Routledge Handbook of Seabed Mining and the Law of the Sea. <https://doi.org/10.4324/9780429426162>
- Tayebi-Khorami, M., Edraki, M., Corder, G., Golev, A., 2019. Re-Thinking Mining Waste through an Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations. *Minerals* 9, 286. <https://doi.org/10.3390/min9050286>
- Thiebaud, E., Hilty, L.M., Schluep, M., Boni, H.W., Faulstich, M., 2018. Where Do Our Resources Go? Indium, Neodymium, and Gold Flows Connected to the Use of Electronic Equipment in Switzerland. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su10082658>
- Thomsen, H.S. 2017. Are the increasing amounts of gadolinium in surface and tap water dangerous? *Acta Radiologica* 58(3), 259–263. <https://doi.org/10.1177/0284185116666419>
- Turner, T., Fursov, K., Nefedova A., 2022. Early adopters of new transportation technologies: Attitudes of Russia's population towards car sharing, the electric car and autonomous driving. *Transp. Res. Part - Policy Pract.* 155, 403 – 417. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.11.006>
- Traore, M., Gong, A., Wang, Y., Qiu, L., Bai, Y., Zhao, W., Liu, Yang, Chen, Y., Liu, Ying, Wu, H., Li, S., You, Y., 2023. Research progress of rare earth separation methods and technologies. *J. Rare Earths* 41, 182 – 189. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2022.04.009>
- Utochnikova, V.V., 2021. Chapter 318 - Lanthanide complexes as OLED emitters, in: Bünzli, J.-C.G., Pecharsky, V.K. (Eds.), *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*. Elsevier, pp. 1 – 91. <https://doi.org/10.1016/bs.hpcr.2021.05.001>
- V. Balaram, 2019. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geosci. Front.* <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
- van der Ent, A., Baker, A.J.M., Reeves, R.D., Chaney, R.L., Anderson, C.W.N., Meech, J.A., Erskine, P.D., Simonnot, M.-O., Vaughan, J., Morel, J.L., Echevarria, G., Fogliani, B., Rongliang, Q., Mulligan, D.R., 2015. Agromining: Farming for Metals in the Future? *Environ. Sci. Technol.* 49, 4773 – 4780. <https://doi.org/10.1021/es506031u>
- van Nielen, S.S., Kleijn, R., Sprecher, B., Miranda Xicotencatl, B., Tukker, A., 2022. Early-stage assessment of minor metal recyclability. *Resour. Conserv. Recycl.* 176, 105881. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105881>
- Vatamanescu, E.-M., Nicolescu, L., Gazzola, P., Amelio, S., 2023. Integrating smart mobility and electric car sharing adoption in a common framework: Antecedents and mediators. *J. Clean. Prod.* 418. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138254>
- Vats, M.C., Singh, S.K., 2015. Assessment of gold and silver in assorted mobile phone printed circuit boards (PCBs): Original article. *Waste Manag.* 45, 280 – 288. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.002>
- Vaughan, J., Gontijo, V., Valenta, R., Alonso, E., 2023. Rare earth element sources, end-use demand trends, and hydrometallurgical separations.
- Venkatesan, P., Tom Vander Hoogerstraete, Hennebel, T., Binnemans, K., Sietsma, J., Yang, Y., 2018a. Selective electrochemical extraction of REEs from NdFeB magnet waste at room temperature. *Green Chem.* <https://doi.org/10.1039/c7gc03296j>

- Venkatesan, P., Vander Hoogerstraete, T., Binnemans, K., Sun, Z., Sietsma, J., Yang, Y., 2018b. Selective Extraction of Rare-Earth Elements from NdFeB Magnets by a Room-Temperature Electrolysis Pretreatment Step. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 6, 9375 — 9382. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01707>
- Vera, M., Schippers, A., Hedrich S., Sand, W., 2022. Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of microbial metal sulfide oxidation — part A. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 106, 6933 — 6952. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-12168-7>
- 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 Praksis* 8, 41 — 51.
- Vind, J., Malfliet, A., Blanpain, B., Tsakiridis, P.E., Tkaczyk, A.H., Vassiliadou, V., Papias, D., 2018. Rare Earth Element Phases in Bauxite Residue. *Minerals* 8. <https://doi.org/10.3390/min8020077>
- Wakolbinger, T., Toyasaki, F., Nowak, T., Nagurny, A., 2014. When and for whom would e-waste be a treasure trove? Insights from a network equilibrium model of e-waste flows. *Int. J. Prod. Econ.* 154, 263-273 — 273. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.04.025>
- Wan, Y., Yang, L., 2024. Differential recycling strategies and government intervention in a closed-loop supply chain. *Comput. Ind. Eng.* 187. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109816>
- Wang, C., 2018. WTO rare earths case's influence on China's domestic regulatory changes. *J. World Trade* 52, 307 — 330. <https://doi.org/10.54648/trad2018014>
- Wang, P., Yang, Y.-Y., Heidrich, O., Chen, L.-Y., Chen, L.-H., Fishman, T., Chen, W.-Q., 2024. Regional rare-earth element supply and demand balanced with circular economy strategies. *Nat. Geosci.* 17, 94 — 102. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01350-9>
- Wang, Y., Sun, B., Gao, F., Chen, W., Nie, Z., 2022. Life cycle assessment of regeneration technology routes for sintered NdFeB magnets. *Int. J. LIFE CYCLE Assess.* <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02081-6>
- Werker, J., Wulf, C., Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., 2019. Social LCA for rare earth NdFeB permanent magnets. *Sustain. Prod. Consum.* 19, 257-269 — 269. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.07.006>
- Weszkalnys, G., 2014. Anticipating oil: the temporal politics of a disaster yet to come. *Sociol. Rev.* 62, 211 — 235.
- Wicki, M., Bruckmann, G., Bernauer, T., 2022. How to accelerate the uptake of electric cars? Insights from a choice experiment. *J. Clean. Prod.* 355. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131774>
- Wiedmann, T., Lenzen, M., Keyßer, L.T., Steinberger, J.K., 2020. Scientists' warning on affluence. *Nat. Commun.* 11, 3107. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16941-y>
- Wilson, C.R., Hardy, L.A., Irby, P.B., Fried, N.M., Choi, B., Kollias, N., Zeng, H., Kang, H., Wong, B., Ilgner, J., Tearney, G., Gregory, K., Marcu, L., Skala, M., Campagnola, P., Mandelis, A., 2016. Proximal Fiber Tip Damage during Holmium: YAG and Thulium Fiber Laser Ablation of Kidney Stones. *Photonic Ther. Diagn.* Xii 9689. <https://doi.org/10.1117/12.2207895>
- Wilson, M., Goffnett, S., 2022. Reverse logistics: Understanding end-of-life product management. *Bus. Horiz.* 65, 643-655 — 655. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2021.10.005>
- Wilts, H., Bringezu, S., Bleischwitz, R., Lucas, R., Wittmer, D., 2011. Challenges of metal recycling and an international covenant as possible instrument of a globally extended producer responsibility. *Waste Manag. Res.* 29, 902 — 910. <https://doi.org/10.1177/0734242x11415311>
- Wu, T., Cao, S., Kou, M., Xie, Y., Ding, G., Guo, S., Zheng, B., Chen, R., Zhong, M., Yan, A., 2023. Magnetic performance and microstructure of NdFeB sintered magnet by diffusing Tb10Pr90-x(Cu,Al,Ga)x alloys. *J. Alloys Compd.* 934. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167888>
- Wu, Y., Song, M., Zhang, Q., Wang, W., 2021. Review of rare-earths recovery from polishing powder waste. *Resour. Conserv. Recycl.* 171, 105660. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105660>
- Wulf, C., Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., Schloer, H., 2017. Lessons Learned from a Life Cycle Sustainability Assessment of Rare Earth Permanent Magnets. *J. Ind. Ecol.* 21, 1578-1590 — 1590. <https://doi.org/10.1111/jiec.12575>
- Xavier, L.H., Ottoni, M., Abreu, L.P.P., 2023. A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials. *Resour. Conserv. Recycl.* 190, 106840. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106840>

- Xie, C., Xiao, Y., He, C., Liu, W.-S., Tang, Y.-T., Wang, S., Antony van der Ent, Jean Louis Morel, Simonnot, M.-O., Qiu, R.-L., 2023. Selective recovery of rare earth elements and value-added chemicals from the *Dicranopteris linearis* bio-ore produced by agromining using green fractionation. *J. Hazard. Mater.* 443. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130253>
- Ye, Q., Wang, D., Wei, N., 2024. Engineering biomaterials for the recovery of rare earth elements. *Trends Biotechnol.* 42, 575 – 590. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2023.10.011>
- Yeh, C.-H., Xu, Y., 2013. Sustainable planning of e-waste recycling activities using fuzzy multicriteria decision making. *J. Clean. Prod.* 52, 194-204 – 204. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.003>
- 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. *Environ. Rev.* 29, 354 – 377. <https://doi.org/10.1139/er-2020-0115>
- Zapp, P., Marx, J., Schreiber, A., Friedrich, B., Vossenkaul, D., 2018. Comparison of dysprosium production from different resources by life cycle assessment. *Resour. Conserv. Recycl.* <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.006>
- Zeng, Z., Gao, Y., Ni, S., Zhang, S., Fu, X., Sun, X., 2023. Investigation on the recovery of thorium and rare earth from radioactive waste residue by functionalized ionic liquids. *Sep. Purif. Technol.* 317, 123901. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123901>
- Zhang, L., Dong, H., Liu, Y., Bian, L., Wang, X., Zhou, Z., Huang, Y., 2018. Bioleaching of rare earth elements from bastnaesite-bearing rock by actinobacteria. *Chem. Geol.* 483, 544 – 557. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.03.023>
- Zhang, N., Li, H.-X., Liu, X.-M., 2016. Recovery of scandium from bauxite residue—red mud: a review. *Rare Met.* 35, 887 – 900. <https://doi.org/10.1007/s12598-016-0805-5>
- Zhang, Q., Burrage, M.K., Lukaschuk, E., Shanmuganathan, M., Popescu, I.A., Nikolaidou, C., Mills, R., Werys, K., Hann, E., Barutcu, A., Polat, S.D., Salerno, M., Jerosch-Herold, M., Kwong, R.Y., Watkins, H.C., Kramer, C.M., Neubauer, S., Ferreira, V.M., Piechnik, S.K., Hypertrophic Cardiomyopathy Regis, 2021. Toward Replacing Late Gadolinium Enhancement With Artificial Intelligence Virtual Native Enhancement for Gadolinium-Free Cardiovascular Magnetic Resonance Tissue Characterization in Hypertrophic Cardiomyopathy. *Circulation* 144, 589 – 599. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.121.054432>
- Zhang, S., Ding, Y., Liu, B., Chang, C., 2017. Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE. *Waste Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.04.003>
- Zhong, C., Geng, Y., Ge, Z., Rui, X., Liang, J., Wei, W., 2023. Promoting future sustainable utilization of rare earth elements for efficient lighting technologies. *Environ. Res. Lett.* 18. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acdf74>
- Zhou, B., Li, Z., Chen, C., 2017. Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies. *Minerals* 7, 203. <https://doi.org/10.3390/min7110203>
- Zhou, R., Brown, D., 2024. Epistemic justice and critical minerals-Towards a planetary just transition. *Extr. Ind. Soc.* 18. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101463>
- Zhu, X., Fan, D., Xiang, Z., Quan, L., Hua, W., Cheng, M., 2019. Systematic multi-level optimization design and dynamic control of less-rare-earth hybrid permanent magnet motor for all-climatic electric vehicles. *Appl. Energy* 253. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113549>
- Zinoveev, D., Pasechnik, L., Fedotov, M., Dyubanov, V., Grudinsky, P., Alpatov, A., 2021. Extraction of Valuable Elements from Red Mud with a Focus on Using Liquid Media-A Review. *Recycling* 6. <https://doi.org/10.3390/recycling6020038>



**Centre national
de la recherche scientifique
CNRS**

Mission Pour l'Expertise Scientifique - MPES
3, rue Michel-Ange - 75794 Paris Cedex 16
+ 33 1 44 96 40 00

Rejoignez-nous sur :



cnrs.fr