

Chapitre 4 : Extraire autrement

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

Rapport de l'expertise scientifique collective

TABLE DES MATIERES DU CHAPITRE 4

4 EXTRAIRE AUTREMENT	431
4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe:	431
cartographie des ressources	431
4.1.1 Cartographie des ressources : positionnement de la France dans le contexte géologique européen	432
4.1.2 Les gisements formés en conditions géologiques profondes	434
4.1.2.1 Carbonatites — phosphates et carbonates	435
4.1.2.2 Magmas alcalins, peralcalins et peralumineux	435
4.1.2.3 Autres types de gisements profonds (IOA Iron Oxyde Apatite, IOCG Iron Oxyde Copper Gold, hydrothermal, métamorphique)	436
4.1.3 Les gisements formés en conditions géologiques peu profondes : altération, sédimentaires et hydrothermaux	438
4.1.3.1 Régolithe	438
4.1.3.2 Gisements sédimentaires	439
4.1.3.3 Les gisements hydrothermaux de type sulfures massifs volcaniques (VMS)	440
4.1.4 Les « pistes du futur » : Fonds marins, météorites, sources secondaires (résidus de bauxite, cendres volantes, phosphogypse, stériles de charbon)	441
4.1.4.1 Sources extra-terrestres	441
4.1.4.2 Fonds marins	444
4.1.4.3 Sources secondaires	455
4.1.5 Résumé et conclusion	471
4.2 L'existence de procédés innovants, environnementalement plus respectueux	473
4.2.1 Nouvelles pistes de techniques d'exploration	473
4.2.1.1 Exploration de nouveaux gisements	474
4.2.1.2 Exploration du minerai	476
4.2.1.3 Intelligence artificielle au service de l'exploration	477
4.2.1.4 Résumé	478
4.2.2 Procédés techniques d'extraction des ETR	478
4.2.2.1 Sources primaires	478
4.2.2.2 Sources secondaires	524
4.2.3 Une évaluation de la durabilité encore incomplète : verrous méthodologiques et variabilité des impacts	539
4.2.3.1 Impacts environnementaux selon les types de gisements d'ETR	540
4.2.3.2 Contexte et limites des études actuelles	543
4.3 L'intégration des considérations humaines et environnementales dans l'extraction	546
4.3.1 L'émergence par la « <i>soft law</i> » des notions de responsabilité sociale et de durabilité : des mots d'ordre limités pour extraire autrement	548
4.3.1.1 Cadres et outils de la Responsabilité Sociale des Entreprises (RSE)	548
4.3.1.2 . Question de l'adaptation des approches relevant de la RSE à la spécificité des terres rares	553
4.3.1.3 Évaluation de la RSE	555
4.3.1.4 Conséquences de l'intégration des cadres de la responsabilité et de la durabilité dans le monde de l'investissement financier	557
4.3.2 Le « durcissement » et l'adaptation du cadre juridique en réponse aux insuffisances de la RSE	559

4.3.3	La réactualisation de l'ambition de responsabilité sociale et de durabilité par la transition énergétique, source de nouvelles asymétries	561
4.3.3.1	Transformation de la problématique de la « responsabilité », qu'elle soit « soft » ou « hard », par la transition énergétique	561
4.3.3.2	De nouvelles formes d'extractivisme et de colonialisme vert	563
4.3.4	Comment mieux faire pour extraire autrement	566
4.3.4.1	La prise en compte des populations locales : une question de justice sociale et environnementale	566
4.3.4.2	Extraire autrement : des approches à explorer	568
4.3.5	Conclusion	573
4.4	Produire autrement des terres rares : vers une approche interdisciplinaire, contextualisée, territorialement et socialement ancrée	574
4.5	Liste des références du chapitre 4	577

4 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, 2014, 2023). 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 des années à venir. 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.

4.1 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 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.

Le potentiel du sous-sol (ressources primaires, minéral) dépend de la richesse en substances utiles pouvant être extraites de la roche (minéral). C'est l'histoire géologique qui détermine au cours du temps et dans l'espace la formation d'un **gîte minéral**, qui peut être assimilé à une anomalie chimique naturelle avec des concentrations élevées (teneurs) et volume (tonnages) en substances diverses (minéral, métaux de bases et leurs cortèges de co-produits). Les processus naturels de formation d'un gîte métallique sont

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

tout à fait analogues à ceux mis en œuvre par l'industrie minière. Les métaux sont extraits d'une source initiale, concentrés dans des solutions (eau/magma), puis séparés pour former ces anomalies métalliques naturelles. Au gîte, on rattache le terme de *ressources*. Un gîte minéral sera ensuite considéré comme un **gisement** selon ses ressources en tonnage et teneurs, ainsi que sa valeur économique (marché), et donc sa susceptibilité d'être exploité dans les conditions techniques, environnementales et sociales du moment. La notion de gisement est donc une notion anthropique et dynamique. Au gisement, on rattache le terme de *réserves*.

Le cadre réglementaire et la gouvernance des ressources pour extraire « autrement » imposent de penser les ressources/réserves en associant les gisements géologiques et leurs potentiels économiques en lien avec les données territoriales (sociales, géographiques, démographiques, politiques). En effet, pour qu'un gîte soit considéré comme un gisement, il est nécessaire qu'il y ait un portage politique et une appropriation sociale, au-delà de la présence d'une ressource économiquement rentable. Ainsi, extraire autrement oblige *in fine* à une identification des gisements primaires et secondaires et à leur mise en perspective sociétale.

À l'aval de la mine, des déchets miniers sont produits par l'activité industrielle humaine. Ces déchets constituent une source alternative de substances secondaires. La nature du sous-sol et les procédés d'exploitation et d'extraction minérale et métallurgique conditionnent le potentiel d'enrichissement en éléments d'intérêt dans le résidu final. La typologie des déchets peut être distinguée selon les différentes étapes du procédé d'extraction depuis le pré-traitement des roches excavées et broyées (e.g. stériles) jusqu'aux traitements thermiques et/ou chimiques (résidus industriels). Enfin, les effluents ou végétations contaminés issus de la mine primaire ou de ses déchets apparaissent aujourd'hui comme des objets à traiter, mais aussi comme potentielles sources secondaires d'extraction (phytoextraction).

4.1.1 Cartographie des ressources : positionnement de la France dans le contexte géologique européen

Les ETR n'étant pas si rares en termes de concentration moyenne dans la croûte terrestre, les occurrences à faibles teneurs (<%) sont assez nombreuses et ont été bien identifiées en Europe (e.g. (Goodenough et al., 2016); Figure 4.1 (Charles et al., 2022)).

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

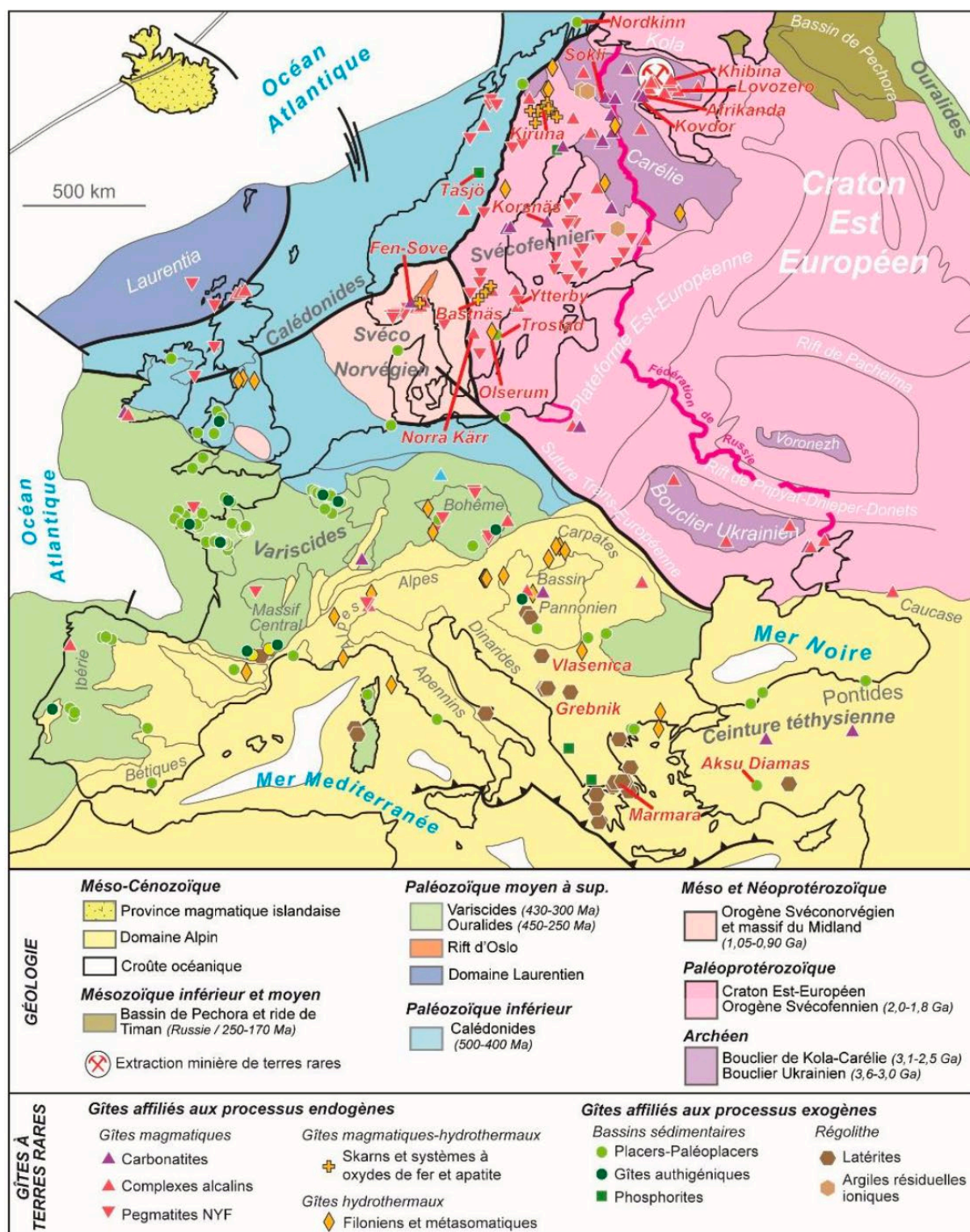


Figure 4.1 Distribution des différentes occurrences d'ETR affiliées aux processus endogènes et exogènes en Europe. Tirée de (Charles et al., 2022).

Cette cartographie des gisements a été établie par les différentes agences nationales de recherches géologiques (e.g. BRGM, British Geological Survey,...), suite à des financements visant à évaluer le potentiel minier européen. Les cartographies produites sont consensuelles et ne tiennent pas compte des teneurs et volumes potentiels des différents gîtes minéraux ni du cortège de leurs produits associés. Si une évaluation du potentiel de ces gîtes de moyenne et petite taille est de mise, cela nécessiterait des

études quantitatives détaillées afin de comprendre les processus de formation et de concentration des petits et moyens gisements.

En Europe, les principaux gisements sont localisés sur le bouclier scandinave et au Groenland (Decrée et al., 2023; Jonsson et al., 2023; Sarapaa et al., 2013). L'architecture géologique du Nord de l'Europe est caractéristique des zones de cratons abondamment minéralisées dans le monde (comme l'Australie et le Canada). Les terrains archéens du bouclier fennoscandien et du Groenland affleurement bien ainsi que les ceintures orogéniques mobiles du protérozoïque et les terrains accrétés au Phanérozoïque, présentant à la fois des complexes magmatiques jeunes et des unités sédimentaires plus ou moins préservées. Le Groenland possède 8 gîtes d'ETR de grande à très grande taille non exploités avoisinant les 34,79 Mt en **ressources estimées** (Jonsson et al., 2023). La Norvège montre 3 gisements non exploités de moyenne à grande taille (0,70 Mt) dont deux sont situés dans les roches magmatiques du rift d'Oslo 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 (type Iron Oxyde Apatite (IOA)) à Kiruna et à Malmberget dans le nord du pays (Decrée et al., 2023). Jonsson et al. ne reportent qu'un seul gisement de taille moyenne non exploité (Kontioaho, 0,04 Mt) en Finlande (Jonsson et al., 2023), mais d'autres publications montrent les efforts d'exploration des ETR dans ce pays (Sarapaa et al., 2013). Dans le centre du pays, deux gisements sub-économiques (Korsnäs and Otanmäki) sont situés dans des roches magmatiques plus ou moins affectées par des phénomènes hydrothermaux.

Outre l'Europe du Nord, les gîtes identifiés sont de plus petites tailles, notamment en France. Ces indices d'ETR sont principalement situés dans les reliques de l'orogénèse varisque comme les Massif Armoricain et de l'Ardenne ainsi que le Massif Central. Ce sont principalement des gisements de type paleoplacer qui concentrent les minéraux lourds suite à l'érosion et des granites et pegmatites, fruits de la fusion partielle de la croûte terrestre lors de l'orogénèse varisque.

Pour les géologues, les principales classifications de gîtes minéraux reposent sur **les processus responsables de la minéralisation**. Ces processus géologiques primaires sont complexes et seront distingués ici en **deux grands groupes profonds et de surface** pour lesquels, nous détaillerons les sous-types dans ce chapitre avant de donner des pistes identifiées dans la littérature pour des gisements futurs non conventionnels.

Les gîtes minéraux sont des objets naturels dont les propriétés (volumes, teneurs, minéralogie) sont intrinsèques et spécifiques à chacune des occurrences. Les **minéraux porteurs d'ETR** appartiennent à différentes familles chimiques et minéralogiques. Parmi les phosphates, la monazite et l'apatite contiennent des ETR légers et le xenotime incorpore préférentiellement les ETR lourds. La bastnäsité est un fluorocarbonate d'ETR. L'eudyalite et l'allanite font partie de la famille des silicates et la loparite appartient à la famille des oxydes. Les argiles peuvent également contenir des ETR. Ces différents minéraux peuvent apparaître dans les différents types de gisements, selon leur affinité chimique et leur stabilité thermodynamique.

4.1.2 Les gisements formés en conditions géologiques profondes

La fusion partielle des enveloppes terrestres profondes (le manteau ou la croûte terrestre) est à l'origine de la formation des roches magmatiques. Leur contenu en éléments majeurs, mineurs et traces (dont les ETR) dépend du fractionnement de ces éléments individuels lors du processus de fusion partielle (taux de fusion, minéraux de la source), mais également du devenir de ces éléments lors de la remontée du magma, de ses possibles interactions et contaminations avec les roches encaissantes et lors de la cristallisation fractionnée dans des chambres magmatiques de profondeur intermédiaire. Les ETR sont

des éléments dits incompatibles, c'est-à-dire qui vont préférentiellement dans la phase liquide lors de la fusion partielle. Ces roches profondes peuvent arriver en surface rapidement sous forme de roche volcanique peu cristallisée (e.g. basalte ou carbonatite) ou bien cristallisée complètement en profondeur (e.g. granite) et remonter lentement à la faveur des processus tectoniques.

4.1.2.1 Carbonatites – phosphates et carbonates

Les carbonatites sont des roches magmatiques composées de plus de 50% de carbonates primaires (calcite, dolomite), de la biotite et de l'apatite. Elles se forment par cristallisation fractionnée d'un magma carbonaté d'origine mantellique. Il y a deux modèles de formation pour les carbonatites (Simandl & Paradis, 2018). Le premier implique un très faible degré de fusion partielle d'un manteau enrichi en CO_2 et CaO. Le deuxième met en jeu une différenciation et démixion entre une phase riche en éléments volatils carbonatés et une phase silicatée. Les carbonatites subissent souvent du métasomatisme en lien avec les roches encaissantes au moment de leur mise en place. Les principaux gisements mondiaux d'ETR sont associés à ce type de roche (e.g. Bayan Obo, Chine, Mountain Pass, USA, Mt Weld, Australie). La monazite et la bastnäsité sont les principaux minéraux porteurs d'ETR dans les carbonatites (W. Chen et al., 2017).

En Europe, la plupart des gisements de type carbonatites sont localisés dans le bouclier scandinave. En Finlande, les carbonatites de Laivajoki et Kortejärvi (J. Nykanen et al., 1997; O'Brien, 2015) présentent des concentrations en ETR moyennes de (210-1644 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) et (443-892 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) respectivement. Les minéraux d'ETR sont principalement la monazite et l'allanite. Ces magmas se mettent en place au Paléoproterozoïque à la faveur d'une faille d'échelle crustale. La carbonatite dévonienne de **Sokli** est l'une des plus prometteuses du pays (Sarapaa et al., 2013) avec 0,5-1,83 % massique d'ETR, incluant 0,11-1,81 % d'ETR légers et 0,01-0,041 % d'ETR lourds. La particularité de ce gisement est son altération métasomatique formée par métamorphisme de contact et qui semble concentrer les ETR. Le plus important potentiel en ETR se situe dans cette auréole et dans les dykes tardifs. En Norvège, la carbonatite de **Fen**, proche d'Oslo, a fait l'objet d'une annonce médiatisée par la compagnie minière norvégienne Rare Earths Norway (juin 2024). Les données du service géologique de Norvège (NGU) citées par Charles et al. soulignent le potentiel exceptionnel de ce gisement en Europe (Charles et al., 2022). Les teneurs en ETR les plus élevées se situent dans la carbonatite à hématite avec environ 2,8 % d'ETR et dans la carbonatite à ankérite-dolomite avec 1,51 % d'oxydes d'ETR. Les ressources inférées sont au minimum de 84 Mt @ 1,08 % d'oxydes d'ETR.

En Europe centrale, Banks et al. ont étudié l'essaim d'âge Varisque à Miocène de carbonatites du sud-ouest de l'Allemagne (Banks et al., 2019). Il y a au moins 5 carbonatites (dont le Kaiserstuhl Volcanic Complex) associées à une douzaine de pointements volcaniques dans le sud-ouest de l'Allemagne. Les études préliminaires, tant sur des affleurements en surface qu'en carotte, montrent que les ETR sont plutôt portés par l'apatite et le pyrochlore. Les concentrations en ETR des roches totales de ces carbonatites peuvent montrer des valeurs jusqu'à 8000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (0,8 %) d'oxydes d'ETR.

4.1.2.2 Magmas alcalins, peralcalins et peralumineux

Les roches magmatiques alcalines sont le résultat d'un faible degré de fusion partielle du manteau terrestre en profondeur que l'on peut trouver dans des contextes tardi-orogéniques ou de divergence continentale. Ces conditions ont pour conséquence une relativement faible teneur en silice et un enrichissement en éléments alcalins (K_2O , Na_2O). Par contre, les granites tardi-orogéniques peralumineux, qui sont plutôt le résultat de la fusion partielle de la croûte continentale épaissie lors de l'orogénèse, ne semblent pas enrichis en ETR (Bea et al., 1994).

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

De manière générale, les **granites à métaux rares** en Europe (Dehaine et al., 2019) sont des granites alcalins tardi-varisques à potentiel en ETR. Les auteurs montrent, au travers de l'exemple du granite de St Austell (UK), que les résidus de traitement géométallurgique exploités pour le kaolin peuvent être enrichis en ETR (notamment la fraction micacée d'un granite initialement riche en biotite) par rapport au granite ($170 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). La pré-concentration de la monazite est favorisée lors de la kaolinitisation. En effet, la monazite se retrouve dans la fraction micacée. Cet article pose la question du contenu en de granites du même âge abondants dans la chaîne varisque. Les ETR, notamment les légers, pourraient être recouverts en co-produits du kaolin.

Des **intrusions alcalines** plus jeunes ont pu être également identifiées comme possiblement enrichies en ETR. Par exemple, le complexe alcalin de Ditrau en Roumanie (Honour et al., 2018) est une intrusion magmatique alcaline d'âge triassique où les ETR sont plutôt portés par l'apatite. Les veines minéralisées tardives hydrothermales sont riches en carbonates où l'hôte d'ETR est la monazite. L'histoire magmatique-hydrothermale complexe a donné naissance à de nombreuses lithologies. Les lithologies les plus mafiques semblent les plus enrichies en ETR (jusqu'à $800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) qui se sont comportées comme des éléments compatibles, donc enrichis dans le résidu solide lors de la fusion partielle.

Dans le nord de l'Europe, **Norra Kär** est un gisement très prometteur. Il s'agit d'un gisement magmatique alcalin d'âge Protérozoïque (Sjöqvist et al., 2013). Les ressources sont évaluées à près de 55 Mt @ 0,55 % d'oxydes d'ETR (Charles et al., 2022). Il a la particularité de contenir de l'eudyalite, un zirconsilicate qui peut incorporer des ETR en quantité variable. Certains des horizons de cette intrusion complexe peuvent contenir jusqu'à $1200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ d'oxydes d'ETR (Sjöqvist et al., 2013). Finalement, le Groenland possède également plusieurs gisements de type alcalin dont ceux de **Kvanefjeld** et **Kringlerne** (Sjöqvist et al., 2013), en marge du complexe magmatique d'Ilímaussaq, qui sont de classe mondiale (Charles et al., 2022). Pour Kvanefjeld, les ressources indiquées représentent 3,42 Mt d'oxydes d'ETR dont 0,13 Mt d'oxydes d'ETR lourds et les ressources inférées sont de 2,22 Mt d'oxydes d'ETR dont 0,08 Mt d'oxydes d'ETR. Pour Kringlerne, les ressources inférées sont supérieures à 4 300 Mt de minerai d'eudialyte avec une moyenne de 0,5 % d'oxydes d'ETR légers et 0,15 % d'oxydes d'ETR lourds (soit 27,95 Mt d'oxydes d'ETR). De manière générale, ce sont des gisements qui présentent une complexité minéralogique remarquable, non seulement en termes de minéraux d'ETR (apatite, loparite, eudialyte, ancylite...), mais aussi de phases silicatées.

4.1.2.3 Autres types de gisements profonds (IOA Iron Oxide Apatite, IOCG Iron Oxide Copper Gold, hydrothermal, métamorphique)

Les autres types de gisements profonds mettent en jeu des processus de transformation en profondeur (métamorphiques et métagénétiques) qui peuvent se superposer, dans le cas de terrains géologiques qui enregistrent des histoires longues et complexes, à une première phase de formation primaire profonde. Les exemples suivants sont des exemples non exhaustifs de gisements profonds qui ont eu une évolution longue et complexe qui ont enrichi les gisements en ETR.

Les minéralisations d'ETR des îles Canaries (Dill et al., 2023) font partie de la province d'Afrique de l'ouest qui se poursuit vers les Monts Atlas au Maroc. Ce sont des **gisements complexes** (de moins de 23 Ma) qui combinent des phases d'intrusions de carbonatites et de magmatisme alcalin et des altérations de type Kiruna où les minéralisations d'ETR sont associées à des concentrations en fer. Les auteurs explorent les concentrations en ETR des roches magmatiques primaires, ainsi que leurs produits d'érosion et les caractéristiques géomorphologiques qui contrôlent ces deux types d'occurrences en ETR. Les concentrations primaires les plus fortes sont de l'ordre de $41 \text{ à } 3013 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ alors que les sables montrent des concentrations plus basses assez homogènes entre 183 et $279 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Les veines pegmatitiques varisques sont le produit direct de la fusion partielle de la croûte continentale lors de l'épaississement crustal ou de l'effondrement de la chaîne Varisque, des pegmatites sont présentes en Europe, notamment en France et en Allemagne. Les pegmatites sont des roches magmatiques de composition granitique, riche en aluminium, présentant une texture avec de très gros cristaux centimétriques à métriques parfois. Ce sont des produits très différenciés des séries magmatiques, riches en éléments volatils et souvent enrichis en éléments incompatibles comme les ETR. Les Massifs de Bohême (Dill & Dill, 2015) et ceux de Harz (Alles et al., 2019) ont été étudiés en détail. Les ETR dans les veines polymétalliques des montagnes de Harz sont portés par la synchysite, un fluorocarbonate d'ETR. Les concentrations d'ETR totales dans les roches totales sont d'environ 1500 mg.kg⁻¹. Les auteurs indiquent que l'enrichissement en ETR intermédiaires (avec un pic d'Eu) pourrait permettre une exploitation rentable.

Le **dépôt porphyrique** de Skouries en Grèce montre que les minéraux riches en cuivre (chalcopyrite et bornite) peuvent contenir des micro-inclusions de minéraux silicatés du groupe des épidotes enrichies en ETR (Economou-Eliopoulos et al., 2005). Ce sont des allanites qui se forment notamment suite à une altération potassique intense au cœur du gisement.

La Suède possède des minéralisations en ETR à **l'évolution complexe** bien identifiées, de type apatite-oxyde de fer (e.g. **Kiruna**), des skarns dans le district de Bergsladen, des dépôts **hydrothermaux** (**Olserum, Bastnäs**) et des intrusions de type alcalines à carbonatitiques (Norra Kär) (Sadeghi et al., 2020). Cet article résume le projet Eurare financé par l'UE et compare, à l'échelle du pays, les concentrations en ETR de ces minéralisations et les signaux géochimiques du bruit de fond géochimique du socle et du sol glaciaire (till). En combinant ces informations, les auteurs concluent à un bon potentiel de découverte de gisement d'ETR en Suède, étant donné qu'il existe de nombreux domaines avec de fortes anomalies positives (jusqu'à 1%) en cartographie géochimique non associées à des gisements connus (notamment au centre du pays vers Östersund et au sud entre Malmö et Karlskrona).

En résumé, 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 carbonate ou en silice¹.

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 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 (type IOA) 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 caractérisés 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 (Dehaine et al., 2019). Finalement, dans ce type de gisement primaire, comme pour les autres types, **il y a un**

¹ Trois substances chimiques utilisées pour leurs propriétés spécifiques. Le phosphore, élément structurant du vivant, est crucial pour l'agriculture. Les carbonates sont largement utilisés dans l'industrie, notamment dans la fonte du fer. La silice possède des propriétés de transparence optique et d'isolant électrique.

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.

4.1.3 Les gisements formés en conditions géologiques peu profondes : altération, sédimentaires et hydrothermaux

Différents types d'environnement géologique superficiel, en contexte continental ou océanique, sont capables de générer des gisements d'ETR. On distingue les gisements d'altération (régolithe), sédimentaires, et hydrothermaux. Les analogues actuels aident à comprendre la formation des gisements du passé. Les environnements propices à ces gisements recouvrent toute la variété de conditions physico-chimiques où l'eau est présente comme vecteur de transport des métaux : les profils d'altération des surfaces continentales, les sédiments de rivière, de rivages marins ou encore les précipitations hydrothermales sur le plancher des fonds océaniques.

4.1.3.1 Régolithe

L'altération chimique des roches est un processus très efficace pour générer des enrichissements métalliques naturels en surface. Lorsqu'une roche issue des profondeurs est mise en surface, en contact avec l'eau et l'air, elle s'altère. Cette réaction a une cinétique qui est lente, contrôlée intrinsèquement par les caractéristiques de la roche, mais aussi par le climat. Plus celui-ci est chaud et humide, plus les cinétiques de réaction sont rapides et efficaces. Cette altération en climat chaud se traduit par les cuirasses rouges riches en fer et aluminium couvrant environ 30% des terres émergées des pays équatoriaux. Lors des interactions entre les eaux d'altération et la roche, les éléments les plus solubles comme le sodium, le calcium, le magnésium sont lessivés, c'est-à-dire qu'ils seront extraits de la roche et transférés dans les eaux de la nappe phréatique. Ce **lessivage** produit dans la roche altérée un enrichissement des métaux faiblement solubles comme le fer, l'aluminium et les ETR. Ces processus sont à l'origine des gisements de type **régolithe**. Dans les environnements les plus altérés, les régolithes sont enrichis en argiles et oxydes de fer (latérites) ou en aluminium (bauxites), qui sont une source majeure pour les ETR lourds (adsorption ionique).

Dans les régolithes, la concentration des ETR augmente avec le lessivage progressif de la roche, c'est-à-dire avec le degré d'altération. Ce processus est renforcé en climat chaud et humide, favorisant la concentration en ETR (Sanematsu et al., 2013). Le potentiel minier d'un régolithe dépend de son degré d'altération et des concentrations initiales de la roche mère. Les latérites sur carbonatites présentent les concentrations les plus élevées en ETR (Giovannini et al., 2021), alors que celles issues de roches pauvres en ETR, comme en Nouvelle-Calédonie, restent peu attractives (Ulrich et al., 2019).

Aujourd'hui, la production mondiale d'ETR lourds provient principalement des gisements d'adsorption ionique du Sud-Est de la Chine, notamment dans des profils latéritiques des provinces du Jiangxi et du Fujian (Bao & Zhao, 2008). Ces gisements se développent au sein de régolithes, c'est-à-dire des formations superficielles où la roche est altérée sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Les gisements du Sud-Est de la Chine sont enrichis en ETR lourds par des processus liés à la cristallisation et altération hydrothermale du granite (Y. H. M. Li et al., 2017; C. Xu et al., 2017), auxquels se surimposent des processus d'altération supergène, comme observé sur le basalte d'Emeishan (M. Zhang et al., 2023). Les gisements de type adsorption ionique présentent de faibles teneurs en ETR (0,05 - 0,3 % massique)

comparés aux gisements primaires magmatiques. Cependant, ces faibles teneurs sont compensées par un enrichissement en ETR lourds, les plus onéreuses et critiques, ainsi que par une extraction par lixiviation facilitée du fait de leur adsorption aux argiles. De plus, les lixiviats extraits présentent peu le thorium et l'uranium et des protocoles de récupération des métaux dissous émergent pour récupérer ces éléments radioactifs (X. Yang et al., 2020). Dans les gisements de type adsorption ionique, les ETR sont adsorbés entre les feuillets des argiles. L'extraction des ETR se fait par lixiviation sur site, permettant de récupérer plus de 95 % des ETR par simple échange ionique (Moldoveanu & Papangelakis, 2016)

Régolithes : Bauxites et latérites en France et Europe

De nombreux pays présentent des régolithes et la possibilité de découvrir un nouveau gisement de type ion adsorption est encore à explorer (Sanematsu et al., 2016). Les régolithes sont des formations géologiques présentes en France, qu'ils soient passés (bauxites du Sud-Est) ou actuels (Guyane).

Les régolithes sont présents dans plusieurs régions d'Europe, notamment dans le bassin méditerranéen. Toutefois, les processus d'altération qui ont conduit à leur formation remontent à plusieurs dizaines de millions d'années. Les bauxites de France, d'Italie (Buccione et al., 2016) et de Grèce (Kalatha et al., 2017) présentent des concentrations en ETR de 0,03-0,1 % massique, comparables aux gisements de type ion-adsorption. Ces gisements bauxitiques intéressent l'Europe, car ils ont été ou sont exploités pour l'aluminium et contiennent d'autres métaux critiques comme le gallium, le cobalt et le scandium. En dehors de l'Europe, les bauxites karstiques de République Dominicaine présentent des concentrations élevées en ETR, atteignant jusqu'à 1,4 % massique (Villanova-de-Benavent et al., 2023). Un des points cruciaux demeure de comprendre leur potentiel en ETR selon la concentration, du fractionnement ETR légers/ETR lourds et aussi de la spéciation des ETR (Denys et al., 2021; Santana & Botelho, 2022).

De manière intéressante, certains sols italiens développés sur substrats volcaniques montrent des teneurs en ETR bien supérieures aux bauxites, bien que leur spéciation ne soit pas encore claire (Mongelli et al., 2014).

Concernant la Guyane, peu d'études permettent d'évaluer le potentiel en ETR des régolithes. Certaines recherches sur des exploitations pour l'or au Brésil suggèrent que les lithologies aurifères ne sont pas favorables à l'enrichissement en ETR (Pedro Paulo Da Costa Alves Filho et al., 2024; Wendel Valter Da Silveira Pereira et al., 2023)).

4.1.3.2 Gisements sédimentaires

En Europe, les gisements sédimentaires, qui se forment par dépôt gravitaire ou par précipitation chimique, restent peu explorés pour leur potentiel en ETR.

À l'échelle internationale, les plus gros gisements sédimentaires correspondent à des **placers** qui se trouvent principalement en Australie, Brésil, Inde et Asie du Sud-Est (Sengupta et al., 2016). Les placers sont des gisements formés par accumulation gravitaire de sables aux densités élevées. Ces gisements sont le résultat de la séparation et tri par les actions d'érosion, de transport et de dépôt lors du ralentissement du flux hydrologique. Ces gisements sont appelés placers, ou paléoplacers quand formés dans le passé. La monazite et le xenotime sont les deux minéraux principaux de ce type de gisement. En **France**, des paléoplacers à monazite sont identifiés dans les formations du Massif Armoricaïn (Tuduri et al., 2023), avec des ressources de 3000-4000 tonnes à 0,4-0,8 % d'oxydes d'ETR (Charles et al., 2023). Ces paléoplacers se retrouvent également ailleurs en Europe (Belgique, Portugal, Espagne, Royaume-Uni) dans des formations géologiques équivalentes. Dans ces paléoplacers, la monazite se présente en nodules millimétriques à centimétriques qui pourraient favoriser leur extraction. Autrement, les placers, comme les sables de Sardaigne (Carcangiu et al., 1991), montrent également des

concentrations intéressantes en ETR (0,017-0,053 %), mais leur variabilité minéralogique et volumétrique limite leur exploitation à grande échelle.

Mis à part les placers, les **phosphorites** sont également une cible prometteuse. Les phosphorites se forment par précipitation chimique assistée par des organismes (biominéralisation). Celles de République tchèque peuvent contenir jusqu'à 1338 mg·kg⁻¹ d'ETR et 368 mg·kg⁻¹ d'yttrium (Al-Bassam et al., 2021). Les phosphorites offrent un double intérêt, combinant les ETR et l'uranium exploitable pour le nucléaire, mais nécessitent des technologies de purification avancées pour une exploitation durable (M. Chen & Graedel, 2015).

Parmi les gisements sédimentaires, les charbons sont identifiés comme de potentiels gisements intéressants. Les teneurs des charbons sont variables, mais typiquement de l'ordre de plusieurs centaines à milliers de mg·kg⁻¹ (Peiravi et al., 2021). Les **charbons**, comme ceux du Kentucky sont ceux qui ont fait l'objet des études les plus poussées. Les valeurs les plus élevées, de 1965 à 4198 mg·kg⁻¹, sont trouvées dans des niveaux riches en argile d'origine volcanique (Hower et al., 1999). D'autres éléments comme le Zr peuvent être également enrichis. Les minéraux porteurs d'ETR sont difficiles à déterminer sans méthode minéralogique de haute résolution spatiale, car les grains sont micrométriques. Des monazites peuvent être identifiées grâce à la microscopie électronique à balayage ou à transmission. Des projets pilotes incluent des modélisations techno-économiques, en intégrant les charbons ainsi que leurs co-produits (Honaker et al., 2017, 2020).

Enfin, les **schistes riches en hydrocarbures et autres shale**, bien que principalement exploités pour le gaz naturel, pourraient représenter une source alternative d'ETR avec des concentrations de 295 à 342 mg·kg⁻¹ (Bhattacharya et al., 2022).

4.1.3.3 Les gisements hydrothermaux de type sulfures massifs volcaniques (VMS)

Les gisements hydrothermaux résultent de la précipitation de minéraux à partir de fluides aqueux chauds, concentrés en ETR. Lors du refroidissement, les métaux ne sont plus solubles dans le fluide et précipitent pour former des gisements métalliques. C'est le cas notamment des gîtes de sulfures massifs précipités à partir de fluides d'origine volcanique. Les sulfures massifs volcaniques (VMS) représentent des gisements analogues de gisements des fonds océaniques. En Europe, les plus grands gisements de ce type se trouvent sur la péninsule ibérique dans la ceinture pyriteuse et sont exploités pour les métaux de base (Cu, Pb, Zn). Parmi ces gisements, certains présentent des enrichissements en ETR (20-350 mg·kg⁻¹) (Costis et al., 2021; Ruiz et al., 2002).

En résumé, 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 sédiments², présents notamment dans le Massif armoricain (Charles et al., 2023). Leurs concentrations sont assez élevées (0,4-0,8 % d'oxyde d'ETR), mais les occurrences sont disséminées et forment seulement de petits gisements (3000 t).

² 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.

- 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⁻¹ soit 0,05%)

En conclusion, 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 & Papangelakis, 2016), minimisant les étapes de séparations, seraient transposables.

4.1.4 Les « pistes du futur » : Fonds marins, météorites, sources secondaires (résidus de bauxite, cendres volantes, phosphogypse, stériles de charbon)

4.1.4.1 Sources extra-terrestres

4.1.4.1.1 Potentiel géologique

Les météorites ou astéroïdes comme source potentielle de métaux rares, longtemps considérée comme de la science-fiction, ont été évoqués lors du discours de lancement du programme France 2030 par le président Macron. Certains auteurs proposent également les météorites (fragments de roches ou de métal qui tombent sur Terre après avoir traversé l'atmosphère) et les astéroïdes (corps rocheux ou métalliques qui orbitent autour du Soleil) comme possible source d'ETR. À l'heure actuelle, 14 036 astéroïdes sont connus pour se déplacer sur une orbite proche de la Terre, dont 1684 sont considérés comme des astéroïdes pouvant potentiellement entrer en collision avec la terre (Chen et Graedel, 2015). Ces auteurs indiquent néanmoins que, basés sur l'abondance des ETR dans les 38 chondrites carbonatées qu'ils ont étudiées, ces dernières ne valent pas la peine d'être exploitées à court terme.

De manière générale les études convergent sur le fait que les abondances des ETR dans les astéroïdes sont très inférieures aux concentrations d'exploitation sur terre (Luszczek & Przylibski, 2019; McLeod & Krekeler, 2017; McLeod & Shaulis, 2018). Dallas et al. montrent dans leur étude que si les astéroïdes sont susceptibles de constituer une source importante de platine, de sélénium et de gallium et, dans une moindre mesure, d'argent, d'indium et de tellure, les arguments en faveur de l'extraction du lithium et des ETR à partir de corps extraterrestres sont en revanche bien moins convaincants (Dallas et al., 2021).

Certains **basaltes lunaires (de type KREEP)** sont enrichis en potassium (K), ETR et phosphore (P) par rapport aux chondrites. Bien que les concentrations en ETR totales soient faibles (< 0,5 % ; (McLeod & Shaulis, 2018)), ils montrent des concentrations en **ETR lourds** 200 à 300* plus élevées que les chondrites, et donc plutôt plus élevées que les carbonatites et roches magmatiques alcalines classiquement exploitées sur terre. Les météorites de type pallasite et sidérite, qui se trouvent en orbite proche de la terre, peuvent aussi être enrichies en ETR (Merle et al., 2023). Les chondrites (ou météorites

pierreuses, avec moins de 35% de métal) peuvent être classées selon leur minéralogie. Les chondrites de type L contiennent seulement quelques $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ d'ETR (Luszczek & Przylibski, 2019). Les roches magmatiques évoluées, notamment celles échantillonnées sur la lune représentent le réservoir KREEP dont le volume estimé est de $2.2 \times 10^8 \text{ km}^3$ (McLeod & Shaulis, 2018) concentrent les éléments incompatibles (qui ont tendance à migrer dans le liquide lors de la fusion partielle) et sont les roches les plus susceptibles de contenir des ETR. Des échantillons de la mission Apollo ont été étudiés (McLeod & Shaulis, 2018). Les minéraux qui contiennent les ETR légers sont des groupes monazite, de la perrierite et de la chevkinite. Un minéral riche en Y (jusqu'à 12 % d'oxyde d'Y) du groupe de la bêtafite (yittrobetafite) a été trouvé dans ces échantillons. La ressource potentielle en ETR est de 225 000 à 450 000 Mt pour ce réservoir KREEP dans son ensemble dont le volume a été estimé à $2.2 \times 10^8 \text{ km}^3$ (McLeod & Shaulis, 2018).

Malgré les horizons qui paraissent lointains pour cette exploitation, certains auteurs ont déjà réfléchi aux techniques minières spatiales. Notamment Jiang et al., qui ont désigné des électrodes capables d'enlever les poussières lunaires (J. Jiang et al., 2020). La technologie photovoltaïque d'élimination de la poussière lunaire s'est avérée avoir des applications potentielles pour l'exploration spatiale future. D'autres ont développé des techniques de positionnement optimisées à partir de modèles analytiques et numériques pour localiser les mines spatiales (Danijela Ignjatovic Stupar et al., 2022). Cette méthodologie pourra être utilisée pour l'exploration spatiale, notamment dans le positionnement au sein des tubes de lave lunaires, qui constituent l'endroit le plus sûr pour installer la vie humaine.

Finalement, les modèles techno-économiques sont rares, mais certains auteurs s'y sont attachés (A. M. Hein et al., 2020) et ont mis en lumière que les facteurs technologiques clés pour les missions d'exploitation minière des astéroïdes sont la fréquence et le nombre d'engins spatiaux par mission qui contrôlent la rentabilité. Certains auteurs (Dallas et al., 2021) soulignent l'avantage environnemental qu'il y aurait selon eux à extraire dans ces astres plutôt que sur terre. Pour autant, les obstacles techniques et économiques sont énormes; la perception de ce type d'extraction est présentée dans la littérature comme le point culminant de l'hyper-capitalisme qui essaie de s'affranchir de la finitude de la planète Terre (Merle et al., 2023). Pour ces auteurs, qu'ils soient positifs ou négatifs, les impacts potentiels de l'extraction et de l'exploitation des ressources spatiales pourraient profondément changer la société.

4.1.4.1.2 Régime juridique de l'exploitation éventuelle de ces météorites

Certains États ont, dans ce contexte, récemment adapté leur législation à la possibilité de développer des activités commerciales dérivées de la lune et des astéroïdes et d'exploiter ainsi les ressources pouvant être extraites de l'espace extra-atmosphérique. C'est le cas des États-Unis (*Space resource exploration and utilization Act of 2015*, Executive Order 13914), du Luxembourg (*Loi sur l'exploration et l'utilisation des ressources de l'espace*, 2017), du Japon, ou encore des Émirats Arabes Unis. Or, cette tendance a pu être dénoncée par certains États (Belgique, Russie) comme contraire au droit international développé dans les années 1970. Deux traités internationaux (accords juridiquement contraignants, conclus entre deux ou plusieurs États) ont en effet été conclus à cette époque en lien avec les ressources spatiales (Malinowski et al., 2019; Merle et al., 2023).

Le Traité 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, du 27 janvier 1967. Celui-ci ne fait pas explicitement référence à l'extraction ou à l'appropriation des ressources spatiales. Le préambule reconnaît « l'intérêt que présente pour l'humanité tout entière le progrès de l'exploration et de l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique à des fins pacifiques », et les « vastes perspectives qui s'offrent à l'humanité du fait de la découverte de l'espace extra-atmosphérique par l'homme » : un lien clair est ainsi établi entre les progrès de l'exploration et de l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique et l'intérêt de l'humanité (Koschinsky et al., 2018). D'après l'article 1 « L'exploration et l'utilisation de

l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes, doivent se faire pour le bien et dans l'intérêt de tous les pays, quel que soit le stade de leur développement économique ou scientifique; 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. Il ne s'intéresse pas à l'exploitation par les personnes privées, mais ne l'interdit pas pour autant.

Le Traité sur la lune et les autres corps célestes du 5 décembre 1979 qualifie quant à lui la lune et ses ressources naturelles de « patrimoine commun de l'humanité » (article 1(1)) et prévoit que « les États parties au présent Accord s'engagent à établir un régime international, y compris des procédures appropriées, régissant l'exploitation des ressources naturelles de la Lune lorsque cette exploitation sera sur le point de devenir possible ». Un régime de gestion rationnelle de ces ressources est prévu, de même qu'une répartition équitable des bénéfices tirés de leur exploitation avec les pays en développement. Mais ce traité comprend seulement 17 ratifications et donc 17 Parties, alors que le premier est beaucoup plus largement ratifié (Malinowski et al., 2019; Merle et al., 2023) .

On peut donc noter des ambivalences et des incertitudes concernant le droit applicable à l'exploitation des ressources spatiales, et en particulier aux météorites, ou autres objets spatiaux se retrouvant sur terre soit par le biais de phénomènes naturels soit à la suite d'une intervention humaine. Selon deux publications étudiées (Malinowski et al., 2019; Merle et al., 2023), il n'y a en effet aucune raison de considérer les météorites de la même manière que l'espace extra-atmosphérique, la réalité physique ayant changé entre le moment où ces météorites faisaient partie de l'espace et le moment où elles se trouvent sur terre. Étant donné les développements unilatéraux actuels et les progrès technologiques, le rôle des instruments réglementaires pour l'approvisionnement en ressources de l'espace vers la Terre devrait, pour les auteurs étudiés, être davantage exploré et clarifié (A. M. Hein et al., 2020).

En résumé, 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 & Przylibski, 2019; McLeod & Krekeler, 2017; McLeod & 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.

En conclusion, 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

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

de vue géologique, technique et juridique. Comme le résumait Merle et al., 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 (Merle et al., 2023). 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.

4.1.4.2 Fonds marins

Malgré le fait que depuis des décennies il soit estimé que l'exploitation minière en mer, si elle avait lieu, ne serait probablement pas rentable, les regards se tournent actuellement en direction des fonds marins avec l'espoir d'assurer la sécurité de la chaîne d'approvisionnement, d'améliorer la performance économique et d'éviter les dommages à l'environnement et aux droits humains à terre (A. M. Hein et al., 2020; Koschinsky et al., 2018). L'exploitation des minerais des fonds marins suscite en effet les convoitises et alimente les espoirs de développement économique depuis les années 1970 sans avoir encore été concrétisée et leur valorisation semble toujours très lointaine malgré les annonces récentes de la société The Metals Company (voir ci-dessous) tout en étant beaucoup plus crédible que celle des astéroïdes et météorites.

La France possède *a priori* une position privilégiée dans l'optique d'une éventuelle exploitation des ressources minérales offshore, puisque celle-ci possède le second espace maritime le plus étendu au monde grâce à ses territoires ultramarins (Antilles françaises, Clipperton, îles Éparses, Guyane française, La Réunion, Mayotte, Nouvelle-Calédonie, Polynésie Française, Saint-Pierre-et-Miquelon, TAAF, Wallis-et-Futuna), derrière les États-Unis. Le Service hydrographique national français (SHOM) totalise dans ce contexte 10 911 921 km² de zones maritimes françaises, en prenant en compte la zone économique exclusive (ZEE), mais aussi le plateau continental étendu.

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

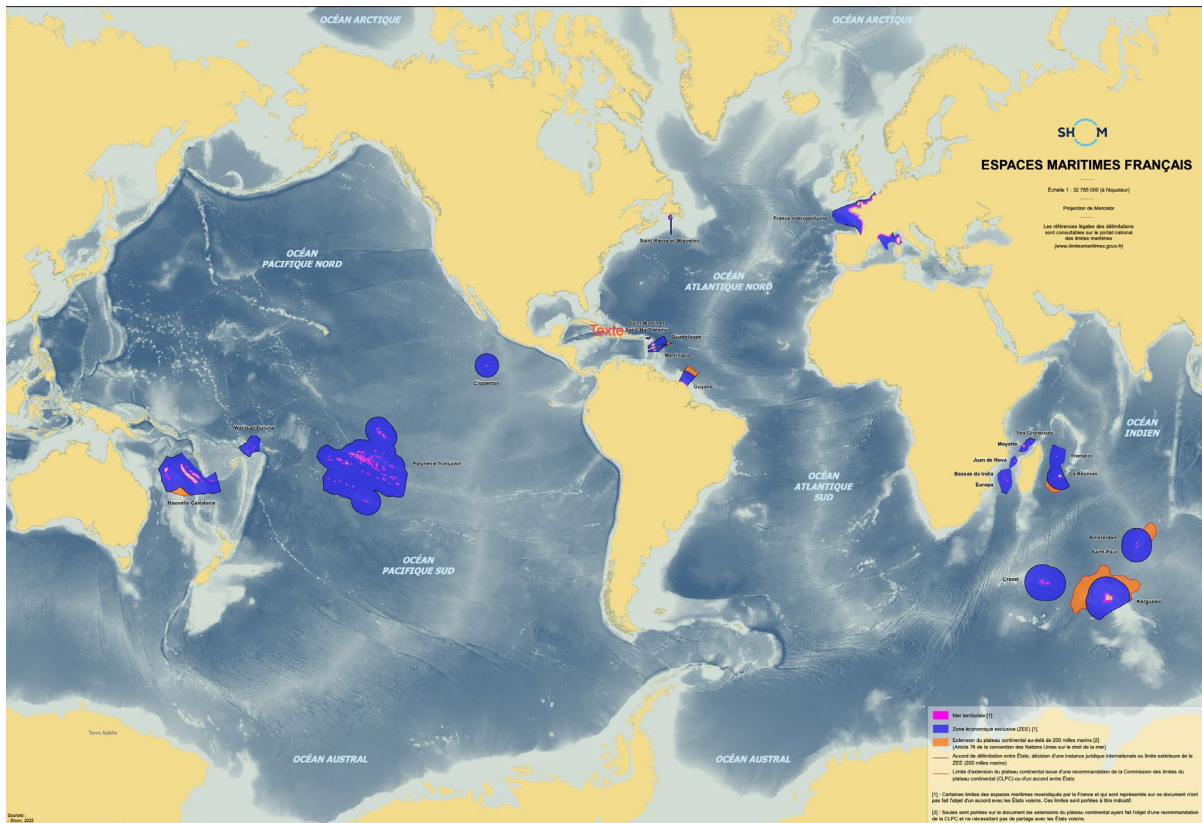


Figure 4.2 Carte des espaces maritimes français élaborée par Shom
https://limitesmaritimes.gouv.fr/sites/default/files/2023-03/Espaces_maritimes_FR_20230303_2.pdf.
 Image libre de droits.

Ces territoires ultramarins lui permettent en effet d'exercer des « droits souverains » dans un rayon de 200 milles marins (*nautical miles*, soit 370 km) autour des côtes, calculés à partir de lignes de base déterminées par les États qui servent de point de départ au calcul des différentes zones maritimes. Au sein de cette limite des 200 milles marins s'appliquent les régimes juridiques de la ZEE et du plateau continental prévus par la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer (CNUDM) de 1982, qui représente une véritable « constitution » pour les océans. Les îles permettent ainsi à la France d'avoir accès aux espaces maritimes alentour en vue principalement de l'exploitation des ressources minérales et biologiques. La limite de 200 milles marins peut même être étendue (jusqu'à 350 milles marins des côtes ou jusqu'à une distance n'excédant pas 100 milles marins de l'isobathe de 2 500 mètres dans le cas où le plateau continental naturel se prolonge au-delà de 200 milles marins), ce qui permet à la France d'étendre ses droits souverains sur le sol et le sous-sol, et donc également sur les ressources minières de ces espaces (CNUDM, article 76). La Convention des Nations Unies sur le droit de la mer a ainsi permis aux États d'étendre largement leurs compétences et leurs droits en mer, vers le large. À l'heure actuelle, la France a officialisé une extension de son plateau continental en ce qui concerne La Réunion, la Guyane, la Nouvelle-Calédonie, les Antilles françaises ainsi que les îles Kerguelen, Saint-Paul et Amsterdam (voir le site internet de la Commission des limites du plateau continental). Cette extension se fait dans le cadre d'une procédure devant la Commission des limites du plateau continental, composée de scientifiques chargés de donner un avis quant au bien-fondé de la demande d'extension de l'État du point de vue géo-morphologique.

Les réserves potentielles d'ETR se trouvent également au-delà du plateau continental et donc des limites des zones dites « sous juridiction étatique » (précisions *infra*). Or, la question de l'exploitation des ressources minérales dans les fonds marins internationaux intéresse directement la France, puisque celle-ci est membre de l'Autorité internationale des fonds marins, ce qui lui permet d'avoir par le biais de l'Institut français d'exploitation de la mer (IFREMER) accès à plusieurs zones d'exploration, non seulement

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

au sein de la zone de Clarion-Clipperton, en ce qui concerne les nodules polymétalliques, mais aussi de la dorsale medio-Atlantique, en ce qui concerne les sulfures polymétalliques.

Une carte des zones d'exploration pour les nodules polymétalliques dans la zone de Clarion Clipperton est disponible sur le site internet de l'Autorité internationale des fonds marins : <https://www.isa.org.jm/maps/clarion-clipperton-fracture-zone/>.

4.1.4.2.1 Potentiel géologique

De manière générale, les fonds marins peuvent être considérés comme des gisements de bas grade (< 0.2 %) et à possible large tonnage (> 100 Mt) (Pak et al., 2019). Entre autres, un large projet de cartographie et de quantification de la ressource des eaux européennes (GeoERA-MINDeSEA) a été récemment financé par le programme de recherche Horizon 2020 de l'Union européenne. Les résultats ont été synthétisés (Gonzalez et al., 2023).

Les ressources en ETR des fonds marins peuvent se présenter sous différentes formes géologiques (Gonzalez et al., 2023). Il peut s'agir de minéralisations hydrothermales, des croûtes de manganèse et/ou ferromanganésifères, de nodules à sulfures polymétalliques, de minéralisations détritiques (phosphorites et placers marins) et enfin des boues ou sédiments très fins devenus d'intérêt pour les ETR plus récemment (Gonzalez et al., 2023). Trois grands processus de formation peuvent agir de manière combinée ou non pour former ces objets géologiques. Ce sont les processus hydrogénétiques, diagénétiques, et hydrothermaux.

Les nodules polymétalliques peuvent se présenter sous forme de croûtes de manganèse et/ou ferromanganésifères ou de sulfures polymétalliques (J. R. Hein et al., 2020) de différentes origines. Les minéralisations hydrogénétiques se forment par l'oxydation du Mn^{2+} et Fe^{2+} dissous dans l'eau de mer et la précipitation d'oxydes de Mn^{4+} et Fe^{3+} colloïdaux autour d'un nucléus. La précipitation diagénétique se fait dans la porosité des sédiments profonds. L'oxydation de la matière organique contenue dans ces derniers favorise la réduction et la dissolution des oxydes de manganèse. Les solutions résultantes sont chargées en métaux et vont migrer vers le contact entre les sédiments et l'eau de mer riche en oxygène où ils vont re-précipiter des oxydes polymétalliques (J. R. Hein et al., 2020).

Les minéralisations hydrogénétiques Fe-Mn (oxyhydroxydes) incorporent les ETR par sorption, co-précipitation et substitution dans la structure (jusqu'à 0,4 % en masse). Les ETR légers dissouts dans l'eau de mer à partir des carbonates sont chargés positivement et sont attirés par les minéraux de manganèse hydrogénétiques chargés négativement (per exemple la vernadite). Les ETR lourds forment des complexes carbonatés (Gonzalez et al., 2023). Les plus grandes concentrations de ce type de minéralisations sont associées à des complexes volcaniques sous-marins et des rides océaniques d'âge Crétacé-Cénozoïque notamment aux Canaries, à Madère et aux Açores.

La zone de Clarion-Clipperton est une zone potentiellement prometteuse en minerais et donc en ETR. Le secteur sous contrat du BRG (Institut Fédéral pour les géosciences et les ressources naturelles) de la zone de Clarion-Clipperton a été étudié en détail (Kuhn & Ruehlemann, 2021) pour son abondance, masse et distribution de taille des nodules. La concentration moyenne en ETR est d'environ $700 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ pour un volume estimé de nodules 540 ± 189 millions de tonnes (Mt) et un contenu total en ETR de 0.4 Mt. D'autres études se sont concentrées sur les nodules de la zone de Clarion Clipperton. La concentration moyenne en ETR total est de $620 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Kozłowska-Roman & Mikulski, 2021) Ce sont des nodules d'origine mixte, diagénétiques et hydrogénétiques avec de fines couches concentriques reflétant ces différents processus successifs. Ye et Shulga ont montré qu'il y a différents types morphologiques de nodules, les plus enrichis (jusqu'à $1515 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ d'ETR totaux) étant des petits nodules (1 - 1.5 cm) d'origine hydrogénétiques (L. Ye Reykhard & Shulga, 2019). Selon Menendez et al. cet enrichissement en ETR par **les processus hydrogénétiques est lié à la lenteur du processus de**

précipitation colloïdale des ETR initialement complexés dans l'eau de mer alors que les processus diagénétiques sont beaucoup plus rapides (Menendez et al., 2018).

Selon Menendez et al., **la ressource représentée par ces nodules se situe entre 2,1 et Mt 12,1 Mt** (Menendez et al., 2018). Les régions les plus prometteuses sont l'Atlantique NW (1.1 à 3.8 Mt d'ETR) avec une concentration moyenne de $3880 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, le SW Pacifique (3.0 à 2.9 Mt) avec une concentration moyenne de $2870 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ et la zone de Clarion Clipperton (1.0 à 3.4 Mt) avec une concentration moyenne de $988 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En Chine, Zhang et al. ont trouvé des concentrations pour les nodules et croûtes de $1097 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $1624 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivement (Z. Zhang et al., 2012).

De nouvelles techniques d'exploration sont constamment en développement pour améliorer la cartographie des nodules de ferromanganèse sur les fonds marins. Par exemple Guo et al. suggèrent d'utiliser la détection d'un des isotopes naturels du radon (^{222}Rn) comme méthode rapide et peu coûteuse de détection de la présence de nodules (X. Guo et al., 2022). En effet, les auteurs ont prouvé l'existence d'une corrélation positive entre un excès de Radon 222 et la probabilité de présence de nodules ferromangnésifères.

Les croûtes (ou encroûtements) ferro-mangnésifères peuvent se former de trois manières différentes ou combinées (Marino et al., 2019). L'étude de la province des monts sous-marins des îles Canaries montre que ce sont les croûtes d'origine hydrogénétique qui sont les plus riches en ETR (jusqu'à 0.5%) alors que celles d'origine diagénétiques ou hydrothermales sont appauvries (Figure 14 de l'article). Ces nodules peuvent montrer des zonations concentriques infra millimétriques avec de fortes variations en ETR. Les zones formées par précipitation hydrogénétiques sont les plus enrichies (jusqu'à $3068 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ETR totaux) en ETR légers (jusqu'à $3000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ représentant 90% des ETR totaux présents) et le principal minéral porteur d'ETR est la Fe-vernadite (jusqu'à $3000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; (Marino et al., 2023). La précipitation hydrogénétique des oxyhydroxydes de Fe-Mn est directement liée à la présence d'une OMZ (Oxygen Minimum Zone) épaisse, qui est un réservoir de Mn dissous et d'autres éléments dans les eaux marines. Marino et al. estiment la ressource dans le secteur des îles Canaries à $130 \text{ t}/\text{km}^2$ d'ETR récupérables par des processus métallurgiques (Marino et al., 2023). Les monts sous-marins de la mer Tyrrhénienne ont aussi été étudiés (Eckhardt et al., 1997). Les encroûtements sont principalement d'origine hydrothermale et ne sont pas enrichis en ETR (La $2.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Plus vers le sud et l'ouest de l'Atlantique (Rio Grande Rise), Silva de Matos et al. montrent que les encroûtements peuvent être très hétérogènes en termes de minéralogie et chimie à l'échelle millimétrique (Caroline Silva De Matos et al., 2023). Les couches les plus externes et jeunes, composées majoritairement d'oxydes de manganèse et hydroxydes de fer peu cristallisés, de ces encroûtements sont plus enrichies en ETR (jusqu'à $1800 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Ces concentrations sont confirmées par des études plus systématiques (Menendez et al., 2018) ou plus anciennes (B. Nagender Nath et al., 1992; Banakar et al., 1997; Baturin & Yushina, 2007; Eric Heinen De Carlo & McMurtry, 1992).

Finalement, cet enrichissement dans les encroûtements hydrogénétiques a été confirmé expérimentalement (X. Jiang et al., 2011). L'enrichissement en ETR est principalement dû à la précipitation/cristallisation d'oxydes/hydroxydes ferriques amorphes qui complexent préférentiellement les ETR^{3+} de l'eau de mer. Dans ce contexte, le fractionnement des ETR lourds et légers est dû à l'adsorption préférentielle des **ETR lourds** par les oxydes/hydroxydes ferriques amorphes.

Quant à eux, **les sulfures massifs sont générés à partir de processus hydrothermaux (minéralisations hydrothermales)**. Les minéralisations de sulfures d'origine hydrothermale montrent des concentrations très variables ($37.2\text{—}4092 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) en ETR, mais elles restent faibles de manière générale ($< 5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) dont la source est principalement les fluides hydrothermaux eux-mêmes (280 t calculées par (Zeng et al., 2015)). Les autres auteurs s'accordent pour dire que les concentrations sont faibles ($< 25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Dekov et al., 2007, 2010)) et montrent une large variabilité qui peut être due à un mélange de processus (Rachel A Mills et al., 2001) les rapports entre Nd/Yb et l'anomalie en Ce sont des bons marqueurs de

l'origine hydrothermale vs hydrogénétique des encroûtements, riches en ETR et par ailleurs en Co, Ni avec un rapport Fe/Mg relativement constant.

Finalement, **les sédiments et boues marines profondes** peuvent contenir des ETR, notamment les boues des fonds océaniques profonds. De manière générale, les sédiments sub-lysocline localisés proches de la profondeur dans l'océan à partir de laquelle la solubilité du calcaire augmente fortement (appelée la lysocline) sont plus riches en ETR (jusqu'à $1000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; (Barrett et al., 2021)). Les concentrations les plus fortes d'environ $5000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ont été décrites par (Takaya et al., 2018) dans des boues échantillonnées dans l'océan Pacifique au large de l'île japonaise de Minamitorishima. Les auteurs ont estimé la ressource à 1.2 Mt d'oxyde d'ETR (pour une surface de 105 km^2). Les minéraux porteurs d'ETR sont principalement des phosphates de calcium d'origine biogénique avec des concentrations allant jusqu'à $22000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. En utilisant un séparateur basé sur la force centrifuge, les minéraux les plus riches en ETR ont été séparés de manière efficace grâce à leur taille de grain. Kon et al. reportent des boues au large du Japon (zone de Minami-Torishima) qui contiennent des minéraux d'apatite relativement enrichis en ETR lourds qui seraient influencés par l'eau de mer (Kon et al., 2014). Ces apatites contiennent $21,000 \pm 4,900 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en moyenne d'ETR totaux. Par ailleurs, la composition des boues océaniques du Pacifique ont été étudiées de manière systématique (Kato et al., 2011) avec 2000 échantillons provenant de 78 sites répartis régulièrement. En faisant l'hypothèse d'une concentration moyenne de $1180 \pm 189 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, les auteurs estiment une quantité de $9,110 \pm 1,460$ tonnes d'oxydes d'ETR (par km^2 pour une épaisseur de 10 m). **Le potentiel de ces boues riches en ETR est renforcé par le fait qu'elles sont facilement lessivages avec de l'acide chlorhydrique ou sulfurique (et pourraient être traitées comme des gisements de type ion-adsorption) et contiennent de faibles teneurs en éléments radioactifs. Cependant les énormes volumes mis en jeu et leur faible accessibilité rendent l'exploitation de cette ressource très improbable. En effet, si on draguait tous les sédiments de l'océan Pacifique situés à plus de 4 km de profondeur sur une épaisseur d'un mètre (1.1 million km^2), la ressource serait de 450 Mt d'oxydes d'ETR** (Hong et al., 2024).

Par contre Yasukawa et al. ont montré que les micronodules du Pacifique Nord contenus dans des sédiments profonds autour de l'île de Minamitorishima étaient intéressants pour une co-extraction de Co, Ni, Mo, mais pas pour les ETR (Yasukawa et al., 2020).

Des études ont également été menées sur les sédiments des fonds de l'océan Atlantique (Menendez et al., 2017), notamment le long d'un transect au niveau du parallèle 24° entre la plaine abyssale de Nares, les Canaries et les bassins nord-américains. Les concentrations sont en moyenne 4 fois plus faibles que dans l'océan Pacifique. Les sédiments les plus riches en ETR sont les boues rouges (concentration moyenne $257 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ impliquant 167 tonnes d'oxydes d'ETR / km^2) qui peuvent contenir des micronodules ferromanganésifères (jusqu'à $3620 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ d'ETR). Les concentrations en ETR sont plus fortes dans les boues rouges pélagiques à accumulation lente où se forment des oxy-hydroxydes de Fe et Mn d'origine hydrogénétique ainsi que dans les nodules de source hydrogénétique.

Finalement, Pourret et Tuduri se concentrent sur le potentiel en ETR des sédiments qui se déposent sur les plateaux continentaux (Pourret & Tuduri, 2017). La composition en ETR de l'eau de mer peut être expliquée par une combinaison de sources intra-océaniques et fluviales. En effet, dans les estuaires, la majeure partie des ETR sous forme colloïdale est fractionnée par coagulation et adsorption sur des particules (oxydes de Mn, matière organique) et est donc susceptible d'être piégée dans les sédiments de la plateforme continentale. Par exemple, le système de l'estuaire de l'Amazone délivre $2600 \text{ t}/\text{an}$ d'ETR et celui de la Dordogne + Garonne $6.2 \text{ t}/\text{an}$ dans l'océan Atlantique.

Quelques études disponibles portent sur les **techniques novatrices d'exploitation minière pour les grands fonds** pour limiter les impacts. Les méthodes conventionnelles vont causer des impacts importants en générant des nuages de turbidité. Les courants de turbidité sont des courants de gravité chargés de sédiments, la force de gravité agissant de manière différentielle sur le mélange eau-sédiments plus dense que le fluide ambiant. Afin de mieux comprendre la nature, la dynamique et la vitesse de ces courants, une série de modélisations expérimentales et numériques a été effectuée (Elerian et al., 2022).

Le comportement mécanique d'un écoulement biphasique. Ces résultats permettraient de quantifier ces courants déclenchés par l'exploitation sous-marine et minimiser l'impact de la mine sous-marine. De même, une étude (Schacht et al., 2023) se focalise la manière de réduire le nuage turbiditique et sa re-sédimentation qui serait engendré par la mine en eaux profondes et la rendre la moins invasive possible. D'autres expériences numériques (Y. Liu & Yao, 2023) se focalisent sur les conditions d'équilibre dynamique de l'écoulement diphasique dans le conduit vertical d'un système selon la position du gaz injecté et d'autres facteurs afin d'optimiser un système de pompes à air comprimé pour l'exploitation sous-marine. Finalement, afin de mieux monitorer ces effets turbiditiques, Aliena et al. ont développé un capteur adapté aux conditions extrêmes des fonds marins (Aliena et al., 2023). Ce capteur de pression différentielle est destiné à la surveillance du système de tuyauterie et permettrait de monitorer la quantité de solides transportés, la progression du broyage associée et le changement des propriétés du fluide associé à la charge en particules fines.

Malgré les potentielles innovations technologiques, les impacts environnementaux de l'exploitation minière de fonds marins restent potentiellement très nombreux.

4.1.4.2.2 Impacts environnementaux et écotoxicité en lien avec la potentielle exploitation minière des fonds marins

Les fonds marins, tout en étant les écosystèmes prédominants de notre planète, restent des zones les moins explorées et seraient peuplés d'environ dix millions d'espèces. Ils se différencient des écosystèmes moins profonds par une dynamique lente, une sensibilité aux perturbations anthropiques et une grande stabilité environnementale. Plusieurs articles donnent une bonne description de la biodiversité de différents sites sous-marins riches en ETR ou plus généralement en éléments traces métalliques comme les nodules polymétalliques, les sources hydrothermales, les croûtes de ferro-manganèse mais qui correspondent à des zones très locales et restreintes (Correa et al., 2022). Les dommages environnementaux liés à l'exploitation minière sous-marine sont encore largement inconnus, posant d'entrée de jeu la question critique de la viabilité de l'exploitation minière sous-marine face aux problèmes du marché et des questions environnementales.

Les impacts environnementaux de l'extraction minière sous-marine comprennent principalement la modification de l'habitat et des communautés benthiques, une perte de biodiversité et des changements dans la structure des écosystèmes, le rejet de sédiments et de panaches, le rejet de composés toxiques, la production de lumière et de bruit, la pollution thermique, les émissions atmosphériques, le retrait d'eau ambiante et la destruction des ressources génétiques marines. La plus grande incertitude à l'heure actuelle, est l'impossibilité de savoir si les fonds marins retourneraient à l'équilibre après exploitation en raison du nombre important d'espèces endémiques (Sakellariadou et al., 2022).

Les impacts environnementaux liés plus précisément aux techniques d'extraction sous-marines constituées d'un collecteur et d'un convoyeur connectés à une plate-forme de surface seraient tout d'abord physiques sur le fond sous-marin, générant un changement notable de topographie comme la disparition des substrats benthiques. Le collecteur détruit la surface touchée, qui s'aplatit et les sédiments comprimés ne peuvent ni reformer un habitat ni être recolonisés (Toro et al., 2022). Des zones d'eaux nuageuses sont générées, avec des panaches de matière en suspension. Enfin, la re-sédimentation, très importante, pourrait réduire la disponibilité de nourriture pour certains organismes.

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

L'évaluation des risques environnementaux est également décrite et documentée selon les formes et zones de minerais exploitées. Les zones abyssales où se trouvent les nodules abritent une grande diversité d'espèces, avec des organismes qui vivent dans les sédiments fins, à la surface du dépôt, dans les nodules et la colonne d'eau. En 2004, la zone Clarion Clipper n'avait pas récupéré ses habitats benthiques endommagés 26 ans avant par l'extraction de nodules à l'aide de véhicules miniers. Les études indiquent une diversité et une biomasse de vers nématodes réduites et une élimination presque complète de l'épifaune, soulignant l'importance des nodules pour la biodiversité épifaunique des abysses.

Les techniques d'extraction des croûtes ferromanganésiques sur les monts sous-marins (Correa et al., 2022) auraient des impacts environnementaux identiques à celles du chalutage comme des dommages importants aux habitats alors que ces habitats particuliers des monts sous-marins participent fortement à l'enrichissement écologique global des grands fonds. La dégradation de ces habitats induirait une importante diminution de la biodiversité, de la couverture et de l'abondance de la faune voire une mortalité directe des organismes benthiques, mésopélagiques ou bathypélagiques vivants aux différentes profondeurs.

Les sources hydrothermales en haute mer abritent une biodiversité unique d'espèces indigènes et présentent des caractéristiques physiques et écologiques différentes de celles de tout autre écosystème ou biome sur la planète, avec des températures élevées et une absence totale de lumière, qui soutiennent des réseaux trophiques basés sur la production primaire chimioautotrophe. La compréhension de ces écosystèmes a permis de contribuer aux théories sur l'origine de la vie et la photosynthèse sur la terre (Toro et al., 2022). Ce sont des zones d'intérêt pour l'étude de l'adaptation aux environnements extrêmes et de la diversité fonctionnelle des micro-organismes. Les impacts environnementaux sont dans ce cas aussi physiques avec des décapages de substrats et l'aplatissement et compression des sédiments ne permettant plus le rétablissement des habitats ni leur recolonisation. Cette revue indique cependant que certains auteurs avancent une capacité de rétablissement de certains organismes vivants, déjà adaptés aux environnements extrêmes.

La littérature envisage des préconisations et restaurations écologiques pour les zones d'extraction minières sous-marines comme la mise en place de couloirs biologiques non exploités servant de refuges temporaires ; la mise en place de substrats artificiels offrant un relief et une stabilité structurelle pour la relocalisation des animaux ; le maintien d'une proportion de nodules sur le fond marin et l'intégration d'une approche basée sur les services écosystémiques (Hauton et al., 2017; Orcutt et al., 2020). Malgré l'existence d'un cadre juridique pour les ressources minérales marines, il n'a pas encore été possible de détailler comment les aspects environnementaux seront gérés pour leur exploitation, et le total des dommages qu'ils engendreraient est encore incertain. La préservation des milieux aquatiques sous-marins et des écosystèmes doit faire partie des réflexions entre les différentes parties prenantes des industries des pêches et des minéraux, de la production d'énergie éolienne en mer ou de la société civile.

4.1.4.2.3 Encadrement juridique de l'exploitation des ETR en mer

Le régime juridique relatif à l'exploration et l'exploitation des ressources minières offshore varient selon que l'on se trouve dans les espaces sous juridiction nationale ou dans les espaces internationaux.

Concernant d'abord le régime juridique relatif à l'exploration et l'exploitation des ETR dans les espaces maritimes français, la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer de 1982 (CNUDM) prévoit que l'État possède des droits souverains et exclusifs en matière d'exploration et l'exploitation des ressources

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

minérales situées sur son plateau continental (CNUDM, article 76). C'est donc à chaque État de déterminer l'opportunité et les modalités d'exploration et d'exploitation de ces ressources. Si la France a adopté un moratoire sur l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures offshore (Loi n° 2017-1839 *mettant fin à la recherche ainsi qu'à l'exploitation des hydrocarbures*), cette réglementation ne concerne pas les ressources minières dont l'exploration et l'exploitation sont régies par le Code minier (voir notamment les articles L.122-1 et suiv.). En revanche, la Polynésie française et la Nouvelle-Calédonie, de même que Wallis-et-Futuna, se sont positionnées pour un moratoire (interdiction temporaire) relatif à toute activité d'exploration et d'exploitation des ressources minérales (Délibération n° 2022-100/APF du 8 décembre 2022 de l'Assemblée de la Polynésie française relative à un moratoire sur l'exploitation minière des grands fonds marins, Journal Officiel n° 100 du 16/12/2022, p. 27950 ; Congrès de la Nouvelle-Calédonie, Loi du pays portant moratoire sur l'exploration et l'exploitation des ressources minérales de la zone économique exclusive de la Nouvelle-Calédonie adoptée le 29 avril 2025 ; l'Assemblée territoriale de Wallis-et-Futuna a également préconisé en 2019 un moratoire de 50 ans sans que celui-ci ait été entériné par le gouvernement central).

Concernant l'Europe, la Norvège avait annoncé être le premier État du monde à se lancer sur la voie de l'exploitation des ressources minières, avec la loi publiée le 22 mars 2019 entrée en vigueur le 1er juillet 2019. Le parlement avait voté en faveur de l'ouverture d'une première zone d'exploration le 9 janvier 2024, mais ce dernier a finalement annoncé faire marche arrière le 1er décembre 2024, suspendant le projet d'abord pour un an puis pour 4 ans la possibilité de délivrer des permis d'exploration en vue de l'exploitation, jusqu'à la fin donc de l'année 2029. En ce qui concerne l'Union européenne, le règlement 2024/1252 adopté par le Parlement et le Conseil européens le 11 avril 2024 *établissant un cadre visant à garantir un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques (Critical Raw Materials Act)* se prononce 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. Il précise en effet à son paragraphe 18 que « Conformément au principe de précaution, la Commission ne peut pas accorder le statut de projet stratégique à un projet d'exploitation minière en eaux profondes avant que les effets de l'exploitation minière en eaux profondes sur le milieu marin, la biodiversité et les activités humaines n'aient fait l'objet de recherches suffisantes, que les risques n'aient été correctement évalués et qu'il ne soit établi que les technologies et les pratiques opérationnelles envisagées ne portent pas gravement atteinte à l'environnement ». Le Parlement européen avait d'ailleurs réagi à l'adoption de la loi norvégienne le 7 février 2024 2024/2520 (RSP), notamment parce qu'une grande partie de la zone proposée pour l'exploration se situe sur le plateau continental norvégien étendu et la zone maritime sur-jacente constitue une zone de pêche internationale.

Si la présence d'ETR dans les espaces maritimes français n'a pas encore fait l'objet d'estimations précises, les ZEE de Polynésie et de Nouvelle-Calédonie, ou encore celle de l'île de Clipperton en abritent potentiellement : seule une infime partie des fonds marins a pour l'instant été explorée et d'importants gisements ont déjà été identifiés dans le Pacifique, au large du Japon (Kato et al., 2011), ainsi que dans la ZEE des îles Cooks (Dingwall, 2021; Petterson & Tawake, 2019; Sakellariadou et al., 2022).

Il convient de préciser qu'à quelques exceptions près (Petterson & Tawake, 2019) la littérature analysée dans le cadre de l'expertise scientifique collective aborde relativement peu cette question de l'exploitation des ETR situés sur le plateau continental des États, s'intéressant dans une bien plus grande mesure à la question de l'exploitation des ressources minérales dans les fonds marins internationaux.

Concernant le régime juridique de l'exploration et de l'exploitation des ETR au-delà des limites de la juridiction nationale, dans les zones maritimes internationales (la « Zone »), celui-ci est caractérisé par le fait que les ressources minérales sont considérées comme le « patrimoine commun de l'humanité » : les bénéfices tirés de leur exploitation doivent être redistribués aux pays en développement ; cet espace doit être utilisé de manière pacifique et être préservé. Leur gestion est centralisée au sein d'une organisation internationale spécifique, l'Autorité internationale des fonds marins créée en 1994 et dont le siège se situe à Kingston (Jamaïque) (CNUDM, Partie XI ; (Dingwall, 2020)). La CNUDM met en place, dans ce contexte,

un système de patronage par les États Parties à la Convention des entreprises privées ou publiques, ces entreprises pouvant être patronnées par un État d'une autre nationalité que la leur. Il s'agit d'une sorte d'immatriculation, notion clé permettant ensuite de répartir la responsabilité entre l'État patronnant, l'entreprise patronnée et l'Autorité. Actuellement, 31 contrats d'exploration des ressources minérales ont été octroyés par l'Autorité dont deux de ces contrats ont été attribués à l'IFREMER. Si la France s'est prononcée en faveur d'une interdiction de l'exploitation minière dans les espaces maritimes internationaux, cette interdiction n'a pas été actée par l'Autorité internationale des fonds marins. Cette dernière développe actuellement son Code minier et en particulier le Règlement qui sera applicable aux activités d'exploitation (Dingwall, 2020).

L'État de Nauru, à travers l'entreprise privée The Metals Compagny qu'il patronne, a annoncé être prêt à se lancer dans l'exploitation des nodules polymétalliques et a ce faisant activé, en novembre 2024, la « règle des deux » ans selon laquelle la réglementation relative à l'exploitation de ces ressources devra être achevée dans les deux ans suivant cette demande, faute de quoi l'entreprise démarrera son exploitation sans cadre juridique défini (Miller et al., 2021; Pecoraro et al., 2024). Dans l'hypothèse où le Règlement d'exploitation ne serait pas adopté suffisamment rapidement, la société The Metals Compagny a même annoncé qu'elle pourrait se tourner vers les États-Unis, non membres de l'Autorité internationale des fonds marins (car non parties à la Convention des Nations Unies sur le droit de la mer) pour agir de manière unilatérale, en dehors du cadre international en cours de construction auquel pourtant la quasi-totalité des États adhère, ce qui pose de sérieuses questions concernant la conformité d'une telle entreprise au droit international³. 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.

Une pression très forte peut être ainsi constatée, à l'échelle internationale, sur les minéraux des grands fonds marins et ces derniers pourraient jouer un rôle dans la transition environnementale et la demande croissante en métaux (Miller et al., 2021). Les investissements se sont largement accrus, l'exploitation apparaissant imminente (Dingwall, 2018). Les travaux de recherche étudiés témoignent du fait que les industries espèrent que l'exploitation sera possible et rentable (Dingwall, 2018; Miller et al., 2021), sans que cela ne soit réellement démontré. La protection des investisseurs qui se lancent dans l'exploration et l'exploitation des ressources minérales est étudiée par certains auteurs. D'autres se focalisent sur la question de la gestion du risque et de l'incertitude dans les contrats relatifs à ces activités à risque (Krutilla et al., 2021). Il convient de relever que la réglementation en place dans le cadre de l'AIFM est singulière : habituellement, la réglementation environnementale n'est mise en place que longtemps après la commercialisation de l'activité alors qu'il est ici question d'anticiper au maximum (Koschinsky et al., 2018). Cela s'explique par le statut unique de cet espace.

Dans certains cas, la littérature étudiée présente l'exploitation des minéraux offshore comme inévitable du fait de l'augmentation estimée de la demande ; dans d'autres, elle serait un moindre mal (Miller et al., 2021). Une étude compare par exemple la quantité de déchets générés par l'exploitation minière sur terre et en mer en vue de la production de batteries et conclut que l'exploitation offshore permettrait, à long terme, une réduction des déchets (Paulikas et al., 2022). Dans la même veine, l'exploitation sur terre

³ <https://www.leclubdesjuristes.com/international/donald-trump-signe-un-decret-relatif-a-l'exploitation-des-grands-fonds-marins-une-remise-en-cause-du-multilateralisme-en-droit-international-de-la-mer-10469/>

laisserait une empreinte importante en termes d'infrastructures, alors qu'en mer cette empreinte serait forcément limitée puisqu'il n'y aurait pas de plateformes permanentes. Le plus gros défi dans ce contexte reste alors de développer une méthode efficiente et non carbonée de séparation pour l'extraction des ETR (Sakellariadou et al., 2022).

Pour autant, de très importantes incertitudes demeurent, non seulement quant aux effets de la création de panaches de sédiments sur le milieu marin, mais aussi quant à la rentabilité économique potentielle de l'exploitation de ces ressources et au régime juridique associé. Cela nécessite de garder une vision globale des divers impacts des activités d'exploitation. Certains auteurs affirment, de plus, que les réserves terrestres de métaux — y compris, donc, d'ETR — seraient suffisantes pour effectuer la transition vers les technologies renouvelables, excepté pour le lithium. Or, l'exploitation des fonds marins ne vise pas le lithium. Cependant, les scénarios diffèrent et dépendent notamment des modèles de transports envisagés pour le futur, en ce qui concerne les batteries (Miller et al., 2021). L'amélioration de la conception technologique pourrait également avoir une influence majeure sur la demande future de matières premières et de produits finis. Pour Merle et al., les défis technologiques demeurent très importants et le développement de l'exploitation minière offshore ne permettrait pas forcément de contourner les enjeux géopolitiques actuels (Merle et al., 2023). En outre, il y a peu de chances que les mines terrestres soient vraiment affectées par un démarrage de l'exploitation des fonds marins. Une partie des auteurs prônent finalement la sobriété et la recherche pour rendre la conception des produits plus soutenable, faisant référence à l'objectif du développement durable (ODD) 12 - « établir des modes de consommation et de production durables » (Miller et al., 2021). Les incertitudes générées sont non seulement d'ordre technologique et économique, mais aussi d'ordre social, car cette activité générerait peu d'emplois tout en ayant, entre autres, un potentiel impact sur l'industrie de la pêche, comme cela a été le cas pour Solwara 1 (Koschinsky et al., 2018).

4.1.4.2.4 Incertitudes quant aux estimations des ressources dans les fonds marins du fait de la complexité minéralogique

Les fonds océaniques sont constitués par des solides naturels hétérogènes, dont la complexité naturelle reflète une grande diversité de propriétés physiques (granulométrie, porosité, perméabilité), chimiques (teneurs en ETR, co-produits) et minéralogiques (notamment les minéraux porteurs des ETR). Cette hétérogénéité et complexité, qui s'exerce de l'échelle du minéral à l'échelle régionale, explique pourquoi les études d'exploration produisent des estimations de ressources associées à des incertitudes élevées. C'est dans les fonds marins que ces incertitudes d'extrapolation sur les ressources peuvent avoir l'impact le plus significatif, car ceux-ci sont peu accessibles et restent très peu explorés en comparaison du sous-sol continental. En effet, la difficulté d'estimer les ressources des fonds marins réside dans le saut d'échelle entre les études locales sur quelques échantillons (de taille pluri-centimétrique) pour lesquelles les concentrations en ETR sont bien contraintes et l'extrapolation sur des volumes répartis au fond des océans, notamment sur la surface du Pacifique et les épaisseurs de ses surfaces exploitables. Dans la théorie, sur l'intégralité du Pacifique sur une épaisseur de 1 m, avec une topographie homogène, il y aurait 400 Mt de ressources possibles. Les estimations sur les nodules polymétalliques 10-15Mt sont quant à elles basées sur une évaluation de la densité de nodules sur des surfaces restreintes (par exemple Clarion-Clipper zone).

En résumé, 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 Mt - 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 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. estiment une quantité de 9110 ± 1460 t d'oxydes d'ETR par km² pour une épaisseur de 10 m (Kato et al., 2011). 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 et 5. de bruit, 6. la pollution thermique, 7. les émissions atmosphériques, 8. les rejets dans l'eau, 9. le retrait d'eau ambiante, et 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 (Pettersson & Tawake, 2019; Virginie Tassin Campanella, 2024) la littérature analysée aborde relativement peu la question de l'exploitation des ETR situés dans les zones situées sous la 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.

En conclusion, 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., 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 (Merle et al., 2023).

4.1.4.3 Sources secondaires

Au-delà des sources primaires et de la mine urbaine, l'étude du potentiel de diverses sources secondaires pour l'extraction d'ETR fait l'objet de nombreux travaux afin d'estimer les stocks disponibles et évaluer le potentiel d'extraction de ces éléments (Binnemans et al., 2015). Avec l'épuisement progressif des principaux gisements primaires (Peiravi et al., 2021), l'exploitation des sources secondaires devient une alternative attractive, notamment dans les régions dépourvues de production primaire. En particulier, d'après le « Mining, Minerals, and Sustainable Development Project » il est estimé que plus de 100 milliards de déchets miniers sont générés par an dans le monde (Tayebi-Khorami et al., 2019). Le potentiel de ces déchets pour l'exploitation d'éléments critiques et en particulier d'ETR est encore largement méconnu.

Une approche intégrée pour exploiter ces déchets miniers est nécessaire dans une approche d'économie circulaire (Tayebi-Khorami et al., 2019). Elle doit intégrer les dimensions sociales, économiques, juridiques, environnementales, géologiques, métallurgiques. Des efforts importants restent nécessaires en matière de recherche et développement afin d'identifier des solutions efficaces et efficientes dans chacun de ces domaines. 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).

En 2019, 4,6 milliards de tonnes de résidus miniers ont été générées, contenant environ 1,96 Mt d'ETR, soit bien au-delà des 210 000 tonnes extraites des gisements primaires (Peiravi et al., 2021). Cependant, leur exploitabilité reste conditionnée par des facteurs économiques et environnementaux.

L'exploitation des sources secondaires telles que les déchets miniers offre de nombreux avantages par rapport aux sources primaires régulièrement mis en avant par les auteurs :

- Les ETR s'accumulent et se concentrent dans les résidus lors des procédés industriels permettant d'atteindre des concentrations relativement intéressantes supérieures à 400-500 mg·kg⁻¹ et pouvant atteindre quelques milliers de mg·kg⁻¹.

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

- Bien que les concentrations en ETR dans ces résidus soient modérées par rapport à des sources primaires, les volumes de ces résidus produits annuellement à l'échelle mondiale représentent des quantités importantes d'ETR qui pourraient répondre significativement à la demande et réduire ainsi les risques d'approvisionnement.
- Les matières premières (bauxite, charbon, phosphates) dont sont issus ces résidus ont subi un premier traitement physique de broyage/concassage pour leur exploitation (extraction de l'alumine, combustion du charbon, extraction de l'acide phosphorique). Les résidus ainsi produits présentent une granulométrie fine limitant le besoin de rebroyer ces échantillons pour l'extraction des ETR, une étape généralement très énergivore dans l'industrie minière.
- L'exploitation de ces résidus dans une approche d'économie circulaire « zéro déchets » (ETR et autres éléments de la matrice) permettrait d'éviter les nombreuses problématiques existantes de stockage de ces résidus (Occupation des sols, contamination environnementale, exposition des populations aux poussières, etc.)

Parmi ces sources secondaires, les résidus de bauxite issus de la production d'alumine, les cendres produites lors de la combustion du charbon et le phosphogypse, résidu d'extraction de l'acide phosphorique, sont cités comme étant les sources secondaires à fort potentiel (Binnemans et al., 2015).

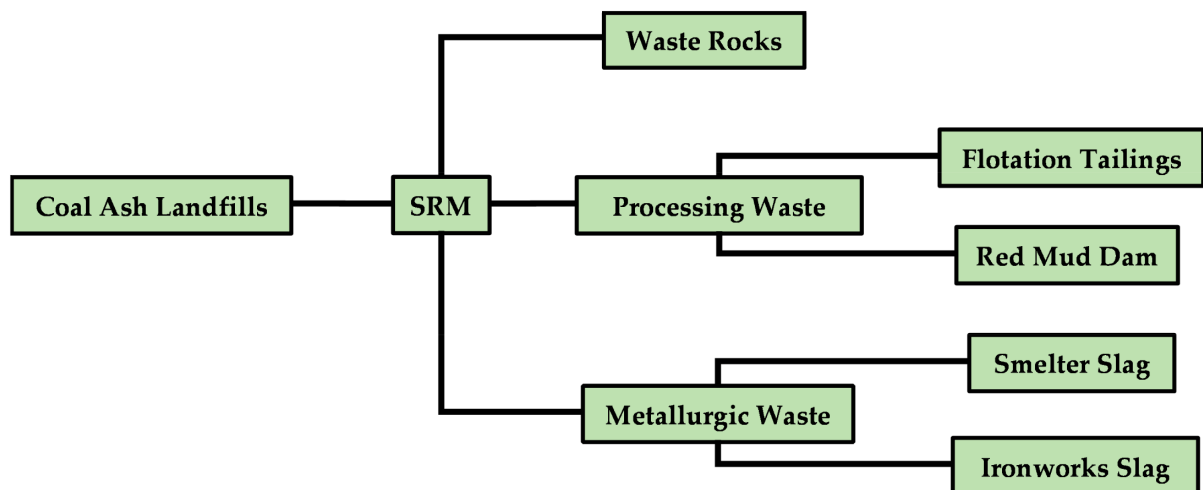


Figure 4.3 Tirée de (Sajn et al., 2024). Sous licence CC-BY.

Les déchets miniers sont également des sources potentielles d'ETR. Ils incluent les stériles miniers (charbon par exemple), mais aussi des effluents générés sur les sites de stockage des résidus comme les drainages miniers acides.

Un aperçu des différentes sources secondaires et leurs spécificités en termes de propriétés, distributions, stocks et potentiel d'extraction des ETR est détaillé par la suite.

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

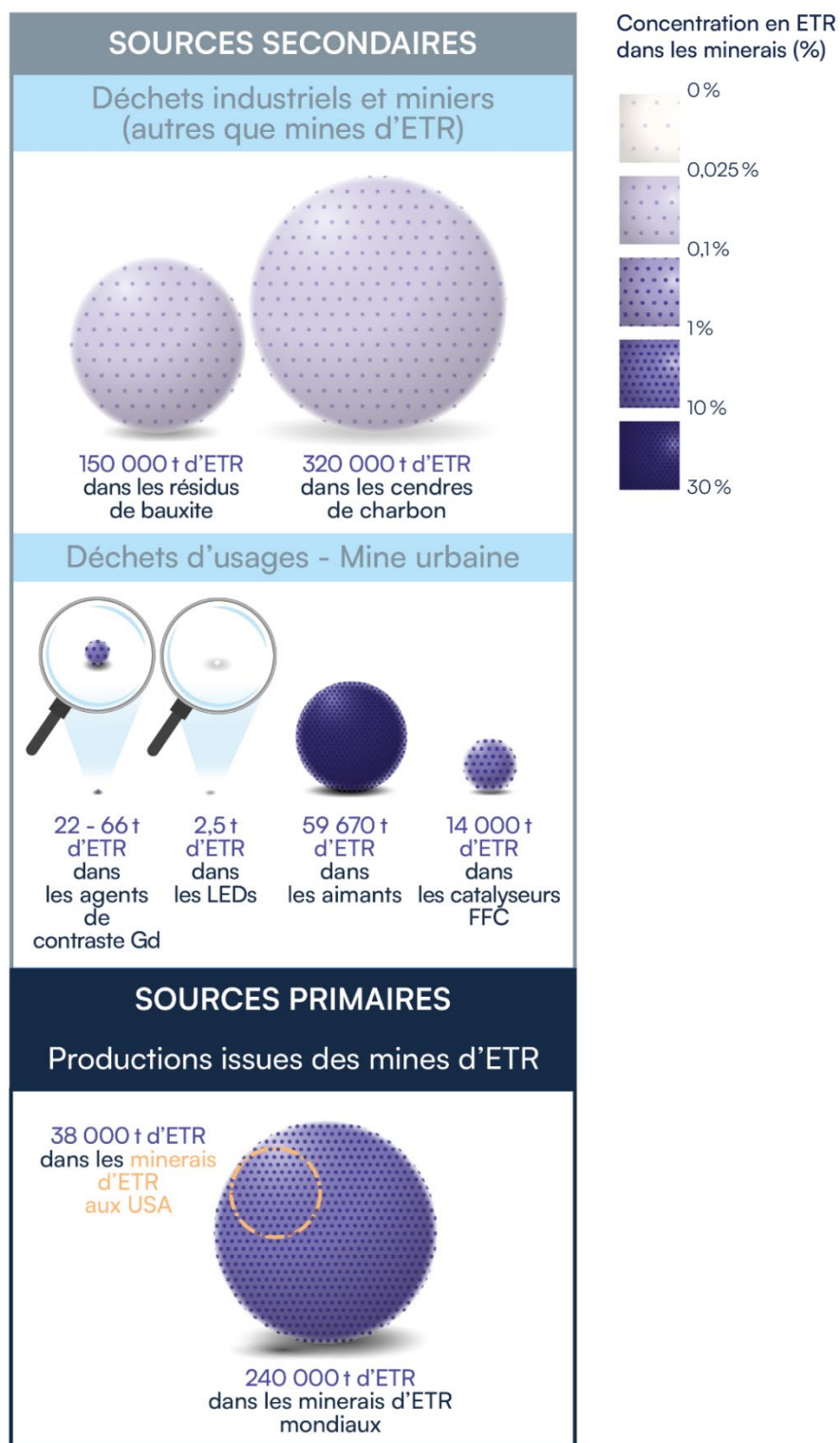


Figure 4.4 Comparaison de la quantité d'ETR présente dans des déchets miniers et industriels (résidus de bauxites et cendres de charbon) générés en 2020 dans le monde, avec celle présente dans les objets générés en 2020 pouvant être destinés à constituer des mines urbaines et celle dans les roches extraites 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%).

4.1.4.3.1 Résidus de bauxite

4.1.4.3.1.1 Définition et types

Les résidus de bauxite, également appelés boues rouges lorsqu'ils sont hydratés, sont les sous-produits générés lors du processus d'extraction de l'alumine à partir de la bauxite, principalement par le procédé Bayer qui consiste en une digestion alcaline de la bauxite dans une solution de soude concentrée à haute température et sous pression (entre 100 et 250°C et 1 à 40 atmosphères en fonction de l'origine du minerai) (Binnemans et al., 2015). Pour une tonne d'alumine produite, 1 à 1,5 tonne de résidus sont générés. La gestion de ces résidus pose des défis socio-environnementaux en raison de leur pH et alcalinité élevés ainsi que du volume important de résidus généré à travers le monde. Ces résidus sont majoritairement composés d'oxyhydroxydes de fer (d'où leur couleur rouge !) et d'aluminium résiduel, d'oxyde de titane, de silice et d'autres impuretés. La totalité des ETR présents dans le minerai de bauxite se concentrent d'un facteur d'environ 2 dans les résidus (Binnemans et al., 2015) atteignant ainsi des concentrations pouvant varier de 500 à 2500 mg·kg⁻¹ en fonction de l'origine du minerai de bauxite (Couturier et al., 2024).

En effet, il existe deux principaux types de résidus en fonction de l'origine géologique des bauxites dont ils proviennent : les résidus karstiques (issus de bauxites accumulées dans des karsts) les plus concentrés en ETR et les résidus latéritiques (issus de profils d'altération des roches), ces derniers étant les plus exploités aujourd'hui.

Les principaux gisements de bauxites karstiques (développées sur des substrats carbonatés) sont principalement situés en Europe, Jamaïque, Russie et Chine (12% des réserves) alors que les bauxites latéritiques se forment dans des zones tropicales et subtropicales, en raison de l'altération intense des roches mères riches en aluminium sous l'effet du climat chaud et humide. On les trouve en Australie, en Afrique de l'Ouest, au Brésil, et dans certaines régions de l'Inde (88% des réserves) (Binnemans et al., 2015).

4.1.4.3.1.2 Cartographie des dépôts de résidus de bauxite en Europe et en France

Même si quelques tentatives d'estimation des stocks de résidus de bauxite en Europe ont été réalisées pour quelques pays (Deady et al., 2016), la connaissance des stocks de résidus de bauxite en Europe est encore très parcellaire. De plus, les estimations de stock sont complexes, car une partie significative des résidus générés en Europe et en France notamment était relarguée en mer ((Power et al., 2011) (Part I)). Cependant il est possible d'estimer la quantité de résidus stockés de manière indirecte d'après les données du « British Geological Survey » qui a répertorié la production annuelle d'alumine de 1972 à 2013. En estimant un rapport d'alumine produite/résidus de bauxite générés variant de 0,7 à 2, Deady et al. ont estimé la quantité de résidus stockés accumulés dans des sites de stockage terrestre à 200-550 Mt sur cette période (DEADY et al., 2016). En prenant l'hypothèse d'une concentration moyenne de 1000 mg·kg⁻¹ d'ETR et 50% de récupération de ces éléments, les auteurs ont estimé la quantité d'ETR qu'il était possible de produire à partir de ces résidus soit 100 000 à 270 000 tonnes. Cette estimation représente la moitié de la production annuelle mondiale actuelle (390 000 t en 2025), mais pourrait répondre de manière significative à la demande européenne. Selon les auteurs, l'un des avantages de l'exploitation de ces résidus est que ces sources secondaires sont généralement situées dans des régions politiquement stables, avec une longue histoire minière et une opposition locale à l'exploitation moins marquée que pour de nouveaux sites. Au-delà de l'exploitation potentielle de ce stock accumulé ces dernières décennies, les auteurs soulignent que la co-extraction des ETR avec l'alumine dans le prolongement du procédé Bayer serait certainement plus viable d'un point de vue économique et pourrait représenter une production annuelle de l'ordre de 1500 tonnes à l'échelle européenne (Deady et al., 2016) ce qui reste assez marginal par rapport à la production mondiale actuelle (350 000t).

À l'échelle française, les stocks de résidus de bauxite et leurs concentrations en ETR ne sont pas ou peu documentés dans la littérature académique. De plus, le gisement potentiel de résidus de bauxite stockés sur le sol français est complexe de par l'histoire de l'exploitation de l'alumine en France et de l'évolution du mode de stockage des résidus (Couturier et al., 2024). Initialement exploitée dans le Var pour la grande majorité, la bauxite alors d'origine karstique a été substituée par de la bauxite latéritique provenant de Guinée à la fin du 20^e siècle.

Si la littérature scientifique ne permet pas d'estimer une cartographie et une estimation des stocks en France, d'autres rapports d'agences gouvernementales permettent un éclairage très partiel. Par exemple, entre 1885 et 1991 qui marquait la fin de l'exploitation de la bauxite sur le sol français, le BRGM estimait la production de bauxite à 101Mt cumulées en France au 20^e siècle (Les résidus miniers Français : typologie et principaux impacts environnementaux potentiels-1997).

Au-delà de l'estimation des stocks potentiels, la question de l'hétérogénéité du gisement se pose pour le développement des procédés d'extraction.

4.1.4.3.1.3 Composition minéralogique et spéciation des ETR

Les résidus de bauxite sont principalement composés d'oxyhydroxydes de fer (hématite et goethite), et d'aluminium résiduel (diaspore, boehmite et gibbsite), d'oxydes de titane (rutil et anatase), d'oxyde de silicium (quartz), de calcite et divers aluminosilicates (sodalite, cancrinite) à des proportions variables en fonction principalement du minerai d'origine (Binnemans et al., 2015).

Plus que la concentration en ETR qui permet d'estimer les stocks, leur forme chimique dans les résidus est importante à caractériser en vue de leur extraction. Celle-ci conditionne le comportement de dissolution de ces dernières et la connaissance de la spéciation peut permettre d'optimiser le rendement d'extraction et la sélectivité vis-à-vis des éléments majeurs (Fe, Al, Ti, Ca), mais aussi entre ETR. Du fait de la complexité des résidus de bauxite (granulométrie très fine, nombreuses phases minéralogiques) très peu d'études ont permis d'élucider la spéciation des ETR dans les résidus de bauxite. Une étude de référence a permis de caractériser la spéciation des ETR à l'échelle locale (par microscopie électronique et microsonde) sur un résidu de bauxite grec, un résidu complexe puisque des bauxites d'origine latéritique et karstique sont mélangées dans le procédé (Vind et al., 2018). Cette étude met en évidence que les ETR légers sont principalement incorporés dans des petites particules (<1µm) de type ferrotitanate formées pendant le procédé Bayer. Quelques particules de carbonates ou phosphates d'ETR légers ont également été observées. Les ETR lourds quant à eux sont essentiellement sous forme de phosphates d'ETR comme dans le minerai de bauxite. Cependant cette étude ne permet qu'une observation locale à l'échelle de la particule et n'est pas forcément représentative de l'échantillon global. De plus, ces observations ne sont pas nécessairement extrapolables à d'autres types de résidus de bauxite d'origines différentes.

En effet, dans la littérature dédiée à la récupération des ETR, les résidus de bauxite sont généralement considérés comme une boîte noire et l'hétérogénéité d'un résidu à l'autre en termes de spéciation des ETR n'est que rarement évoquée. Une étude récente a permis de mettre en évidence des différences de spéciation en fonction de l'origine de la bauxite (latéritique vs karstique) (Couturier et al., 2024). Contrairement à l'étude de Vind et al. (Vind et al., 2018), ils ont montré avec des techniques de caractérisation globale que la présence de phosphate d'yttrium et d'ETR lourds dans les résidus d'origine karstique n'était en fait que minoritaire. Une majorité de l'yttrium se trouve en fait dans d'autres phases non détectables par microscopie électronique (adsorbées en surface de minéraux par exemple). En revanche, dans les résidus de bauxite d'origine latéritique, l'yttrium et les ETR lourds sont uniquement sous forme de phosphates d'ETR, phase très peu soluble. De plus, les auteurs ont montré que pour une origine de résidus donnée, aucune différence de spéciation n'a été observée en fonction de l'âge et le mode de stockage des résidus (à l'air libre, sous forme de lagunage, avec une couche de fermeture

végétalisée) (Couturier et al., 2024). Bien que primordial, l'effet de la spéciation sur le comportement de dissolution (en termes de rendement et sélectivité) et les différences de spéciation observées en fonction de l'origine de la bauxite ne sont que très rarement abordés dans la littérature. Une meilleure caractérisation de la spéciation permettrait de mieux comprendre les mécanismes de dissolution et d'optimiser les protocoles en fonction de l'origine des résidus.

4.1.4.3.2 Cendres de charbon

Si la majorité des études sur le potentiel des cendres pour l'extraction d'ETR se sont focalisées sur les cendres de combustion de charbon, quelques études se sont concentrées sur les cendres d'incinération d'ordures ménagères (Allegrini et al., 2014; Ghani et al., 2023; Morf et al., 2013). Cependant les concentrations en ETR dans ces dernières sont faibles (généralement inférieures aux concentrations moyennes de la croûte terrestre) et le développement du tri, en particulier des objets contenant des ETR, va dans le futur entraîner une baisse encore plus importante des teneurs en ETR dans les cendres de combustion des ordures ménagères. Pour cette raison, seules les études sur les cendres de combustion de charbon sont citées ci-dessous.

4.1.4.3.2.1 Définition et types

Les cendres de charbon sont des sous-produits du processus de combustion du charbon et peuvent être valorisées dans diverses industries. On trouve principalement deux types de cendres :

Les cendres volantes (Fly Ash) : Ce sont des particules fines capturées par les systèmes de filtration des gaz d'échappement des centrales électriques alimentées au charbon. Évacuées avec les gaz de combustion, elles sont recueillies par des filtres. Elles sont souvent utilisées comme additif dans la fabrication du ciment et du béton pour améliorer la durabilité et la résistance du béton.

Les cendres résiduelles (Bottom Ash) : Ce sont les particules plus lourdes qui ne sont pas entraînées avec les gaz et qui se déposent au fond des chaudières. Elles ont une granulométrie plus grossière et sont souvent valorisées en sous-couche routière ou comme matière première pour certains matériaux de construction.

La littérature se concentre principalement sur les cendres volantes puisqu'elles concentrent 69 à 94% des ETR présents initialement dans le charbon (Fu et al., 2022).

4.1.4.3.2.2 Cartographie des gisements et estimation des stocks

Fu et al. ont compilé les données provenant de 581 échantillons à travers le monde (Fu et al., 2022). La concentration moyenne en ETR estimée est de $435,5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Cependant, comme l'a démontré l'étude de (Taggart et al., 2016) aux États-Unis, la teneur en ETR dans les cendres volantes de charbon varie significativement selon l'origine du charbon brûlé. Par exemple, les cendres issues de charbons du bassin des Appalaches présentent une concentration moyenne en ETR de $591 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, tandis que celles provenant des bassins de l'Illinois et de la Powder River affichent des concentrations plus faibles, respectivement de $403 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ et $337 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Ces différences soulignent l'influence majeure de la source géologique sur l'enrichissement en ETR dans les cendres volantes (Taggart et al., 2016). Il est estimé que la quantité d'ETR dans les cendres volantes non valorisées produites annuellement aux États-Unis dans 3 bassins miniers majeurs est équivalente à la production annuelle de la mine d'ETR de Mountain Pass en 2014 (8910 et 4769t respectivement) (Taggart et al., 2016). Reedy et al. montrent que les cendres de charbon accumulées aux États-Unis constituent une ressource secondaire importante en éléments de terres rares, environ 70 % de ces cendres étant potentiellement accessibles dans les décharges et les bassins de décantation (Reedy et al., 2024). L'étude estime que les éléments de terres

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

rares récupérables à partir de ces gisements pourraient représenter une valeur d'environ 8,4 milliards de dollars américains, compte tenu des rendements d'extraction actuels. Au-delà de l'approvisionnement en ressources, les auteurs soulignent que la récupération des éléments de terres rares à partir des cendres de charbon pourrait contribuer à compenser les coûts de remise en état de l'environnement liés aux anciens sites de stockage de cendres. En Chine, la production annuelle d'ETR à partir des cendres de charbon pourrait atteindre 59 909 tonnes soit près de la moitié de la production chinoise à partir de sources primaires en 2019 (Fu et al., 2022). La concentration moyenne en ETR pour les cendres de charbon européennes (6 pays considérés : Espagne, Angleterre, Pologne, Bulgarie, Roumanie et Finlande) est inférieure à celles produites en Chine ou aux États-Unis par exemple (278,7, 473 et 459,7 mg.kg⁻¹ respectivement) (Fu et al., 2022).

En plus de la concentration, l'enrichissement en ETR les plus critiques dans les cendres de charbon est un autre facteur à prendre en compte pour estimer la valeur du gisement. À l'échelle mondiale, la proportion d'ETR les plus critiques dans les cendres (Nd, Eu, Tb, Dy, Y and Er) est de 36% ce qui est supérieur à certains gisements primaires (Fu et al., 2022). Pour l'Europe, la proportion est de 34% sur les échantillons analysés avec une gamme variant de 24 à 48%, l'enrichissement pouvant aussi varier en fonction de l'origine géologique du charbon.

La production annuelle de produits de combustion de charbon dans l'UE-15 a été de 40Mt en 2016 dont 63,8% de fly ashes (<https://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html>). En revanche, très peu de données spatialisées en Europe sont disponibles dans la littérature académique. Une étude a estimé que les dépôts de cendres dans les Balkans renferment 97 000 tonnes d'ETR dans 490Mt de cendres (Sajn et al., 2024). À l'échelle mondiale, ce sont à peu près 800Mt de CFA qui sont produits annuellement (Belviso, 2018). De même que pour les résidus de bauxite, si la littérature scientifique ne permet pas d'estimer une cartographie et une estimation des stocks potentiels en France, d'autres rapports d'agences gouvernementales permettent un éclairage partiel :

Le rapport de 2009 de l'association Robin des bois commandé par l'ASN⁴ répertorie tous les sites de stockage des cendres de charbon en France avec pour chaque site une description du site de stockage (historique, superficie, propriétaire du site, estimation du tonnage de cendres quand disponible), la régulation mise en place pour le suivi du site et en particulier le suivi radiologique, les études d'impacts, les voies de valorisation, etc. Ce rapport estime en 2009 à 40Mt de cendres de charbon en France, mais avec des sites de stockage en cours d'exploitation pour valoriser les cendres dans diverses applications. Les tonnages sont donc certainement moins importants aujourd'hui.

⁴ Radioactivité Naturelle Technologiquement Renforcée, janvier 2009. https://robindesbois.org/wp-content/uploads/rad_nat techno.pdf

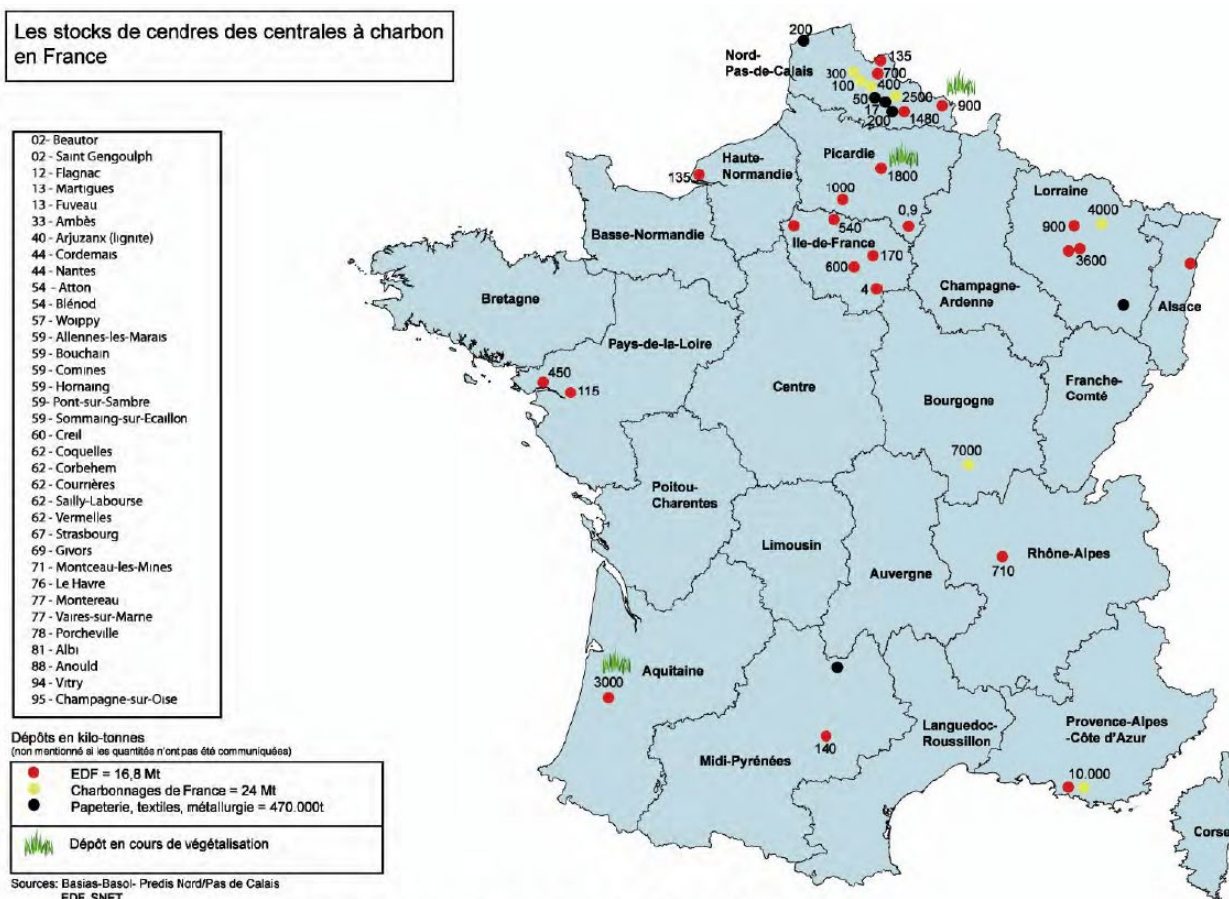


Figure 4.5 Sites et stocks de cendres des centrales à charbon en France © Robin des Bois 2009.

4.1.4.3.2.3 Composition minéralogique et spéciation des ETR

La spéciation des ETR dans les cendres est complexe et peut varier en fonction de l'origine du charbon, mais aussi des conditions de sa combustion (Fu et al., 2022). De manière générale, les ETR dans les cendres sont principalement liés à la phase vitreuse amorphe aluminosilicatée qui se forme lors de la combustion du charbon et qui est la phase dominante dans les cendres. Cette association a été observée sous 2 formes : (1) sous forme d'inclusion de minéraux riches en ETR (monazite, zircon et apatite) (Thompson et al., 2018) dans la matrice vitreuse ou bien (2) sous forme diffuse dans la matrice aluminosilicatée. D'autres spéciations ont également été décrites dans une moindre mesure telles que des particules composées majoritairement d'ETR (phosphates, oxides, silicates, sulfates, liés à des oxides de fer et carbonates), mais aussi des phases de carbone sous forme d'inclusions fines dans les structures graphitiques ou amorphes. Cette dernière observation pourrait être due à une combustion incomplète du charbon, mais des recherches supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ce type d'association.

4.1.4.3.3 Phosphogypse

4.1.4.3.3.1 Définition et types

Le **phosphogypse** est un sous-produit industriel généré lors de la production de phosphates (utilisés dans les engrais phosphatés). Lorsque le phosphate de calcium extrait de la roche phosphatée est traité avec de l'acide sulfurique, il se décompose en deux produits : l'acide phosphorique, utilisé pour la

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

production d'engrais, et le phosphogypse. Ce dernier est constitué principalement de gypse (sulfate de calcium dihydraté), mais il contient aussi divers éléments, comme des métaux lourds (Pb, Cd) et des radionucléides (Th, U) et des ETR. Le stockage de ces résidus pose certains risques environnementaux et sanitaires, en raison de leur toxicité. Ils sont généralement stockés en grandes quantités sous forme de terrils ou dans des bassins de décantation. Ce stockage peut entraîner des problématiques diverses telles que la contamination des sols et des eaux souterraines.

Les propriétés du phosphogypse dépendent de l'origine du minerai phosphaté qui peut être classé en deux grands types : les roches phosphatées sédimentaires et les roches phosphatées magmatiques. Les phosphogypses d'origine magmatique sont enrichies en ETR légers par rapport aux phosphogypses sédimentaires (Bilal et al., 2023).

Les roches sédimentaires appelées phosphorites représentent la grande majorité des réserves mondiales (85-90%) et sont composées d'apatite sous forme amorphe (Francolite). Les roches phosphatées magmatiques représentent 10 à 15% des réserves mondiales et sont composées d'une variété de fluorapatite. La concentration en ETR dépend de leur origine. La concentration dans les roches sédimentaires est de 0,01-0,1% avec une co-occurrence d'uranium (0,01%) alors que la concentration d'ETR peut atteindre 1-2% dans les phosphates magmatiques qui contiennent très peu d'uranium.

Le phosphogypse formé suite à la digestion du minerai par l'acide sulfurique consiste principalement en du sulfate de calcium dihydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou hémihydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) en fonction de la méthode de production (Binnemans et al., 2015). 4,5 à 5,5 tonnes de phosphogypse sont produites pour 1 tonne d'acide phosphorique formée. 70 à 85% des ETR présents initialement dans le minerai se concentrent dans le phosphogypse (Habashi, 1985). Le reste est dissous dans la solution d'acide phosphorique produite.

4.1.4.3.3.2 Cartographie des gisements et estimation des stocks

Les chiffres de la production mondiale annuelle ainsi que l'estimation du stock total de phosphogypse à l'échelle mondial varient selon les sources. Ainsi, considérant les principaux articles de revue sur le sujet qui citent diverses sources, il est estimé que la production annuelle est de 100 à 300 Mt/an alors que le stock s'élève entre 3 et 8 Gt (Bilal et al., 2023; Binnemans et al., 2015; Bouargane et al., 2023).

À l'échelle française et européenne, très peu de données permettent d'estimer les stocks. De même que pour les cendres de charbon, le rapport de 2009 de l'association Robin des bois commandé par l'ASN (Radioactivité Naturelle Technologiquement Renforcée, janvier 2009) répertorie tous les sites de stockage de phosphogypse en France, mais sans estimation des volumes stockés.

4.1.4.3.3.3 Composition minéralogique et Spéciation des ETR

Plusieurs études fondamentales (qui posent la question de la représentativité des phases synthétisées) décrivent une substitution isomorphique du Ca par les ETR pour laquelle deux ETR^{3+} remplacent trois Ca^{2+} laissant ainsi un site vacant avec une préférence pour les ETR légers dont le rayon ionique est plus proche de celui du Ca^{2+} que pour les ETR lourds (Dutrizac, 2017).

D'autres études affirment que la différence de charge ou de rayon ionique (pour certains ETR) entre Ca^{2+} et ETR^{3+} entraîne la formation de phases secondaires. À titre d'exemple, une étude réalisée sur des synthèses mimant le procédé industriel a montré que l'Eu dans le gypse/phosphogypse existe sous la forme de (nano-)phases secondaires mal cristallisées ou amorphes à la surface des grains plutôt que de faire partie de la structure du gypse (Shivaramaiah et al., 2016). La question de la représentativité d'un tel

système synthétique se pose, mais ce résultat suggère que l'extractibilité de ces phases métastables d'ETR devrait donc être élevée.

Au vu de la variabilité des résultats de caractérisation et de rendements de lixiviation observés dans la littérature, il a donc été suggéré que les deux formes peuvent exister, une fraction facilement lixiviable sous forme de phases d'ETR isolés du gypse ou incorporés dans la structure du gypse en substitution du calcium ce qui nécessite une solubilisation de la structure pour libérer les ETR (Rychkov et al., 2018). Cette double occurrence a été observée pour un échantillon de phosphogypse Canadien (S. Li et al., 2022).

Éléments de comparaison du potentiel des trois types de résidus (Résidus de bauxite, cendres de charbon et phosphogypse)

Si les propriétés chimiques de ces trois types de résidus varient toutes en fonction de l'origine géologique du matériau parental, de grandes tendances sont intéressantes à relever entre ces 3 familles dans une perspective de valorisation :

- À l'échelle européenne, les stocks de ces 3 résidus sont difficiles à estimer et il n'existe pas à notre connaissance d'études académiques répertoriant l'ensemble de ces stocks. De plus, concernant la France, les stocks peuvent être considérés comme des stocks finis puisque la production de phosphogypse en France s'est arrêtée en 2004, celle des résidus de bauxite en 2023 et la fin de la dernière centrale à charbon est programmée en 2026.
- D'après l'association « European Coal Combustion Products Association », en moyenne, environ 43 % des cendres volantes produites en Europe (contre 25% à l'échelle mondiale (X. Fan et al., 2022) sont valorisées (réutilisées plutôt que stockées) principalement dans les matériaux de construction (<https://www.ecoba.com/ecobaccputil.html>). Le rapport de 2009 de l'association Robin des bois commandé par l'ASN (Radioactivité Naturelle Technologiquement Renforcée, janvier 2009) rapporte également la valorisation des stocks de cendres en France sans idées précises des proportions valorisées. Une grosse incertitude existe donc sur le stock disponible pour une potentielle extraction des ETR. Contrairement aux cendres de charbon, le taux de valorisation des résidus de bauxite et de phosphogypse est plus faible (<15%) et s'explique par une radioactivité et la présence de contaminants plus importantes, mais aussi une forte alcalinité dans le cas des résidus de bauxite (Klauber et al., 2011; Tayibi et al., 2009).
- Ces trois résidus provenant de sources naturelles présentent une radioactivité supérieure à la normale en raison du processus industriel subit (extraction, combustion). Cette radioactivité est alors considérée comme radioactivité naturelle renforcée et est importante à prendre en compte lors de la valorisation des résidus afin de limiter les risques de radiation. Cette radioactivité dépend de l'origine du minerai. Les cendres de charbon sont décrites comme ayant l'indice de radioprotection (indice gamma) le plus faible avec des valeurs proches de 1 alors que cette valeur peut atteindre 3-4 pour les résidus de bauxite (Shahrokhi et al., 2023).
- Plus que la concentration totale en élément, la proportion d'ETR les plus critiques (Nd, Eu, Tb, Dy, Y and Er) dans les résidus peut être un indicateur intéressant de comparaison à considérer en fonction du type de résidu et de son origine géologique tel que calculé par Fu et al. pour les cendres de charbon (Fu et al., 2022).
- Bien que non abordé en détail dans cette expertise, il est important de noter que le scandium est plus concentré dans les résidus de bauxite (30-230 mg·kg⁻¹) (N. Zhang et al., 2016) que dans les cendres de charbon (15-50 mg·kg⁻¹ en moyenne (Chernoburova & Chagnes, 2021)) ou bien encore dans les phosphogypses (typiquement <10mg·kg⁻¹); étant donné le prix très élevé du Sc sur le marché (95% de la valeur économique des ETR dans les résidus de bauxite), son extraction

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

pourrait améliorer la rentabilité du procédé dans le cas des résidus de bauxite (Binnemans et al., 2015). La valeur économique du Sc semble orienter/influencer les études académiques sur son extraction par rapport aux autres ETR avec un nombre d'études recensées supérieures (102 contre 64 études recensées par une méta-analyse de la littérature scientifique anglophone pour le scandium et les autres ETR respectivement) (Niu et al., 2024).

4.1.4.3.4 Effluents miniers acides

Les effluents acides miniers (AMD) sont générés par l'altération des minéraux sulfurés présents dans les résidus d'extraction de charbon et de sulfures. Leur acidification a un impact négatif sur les réseaux hydrologiques en raison de la solubilisation accrue des métaux contaminants. Bien que les concentrations d'ETR dans les AMD soient inférieures à celles des sources primaires et secondaires solides, les méthodes d'extraction sur fluides peuvent être plus économiques et respectueuses de l'environnement. De plus, intégrer la récupération des ETR dans les coûts de gestion des AMD pourrait partiellement compenser les frais de remédiation (Hedin et al., 2019).

Par exemple, les eaux de la mine de Poderosa en Espagne contiennent en moyenne 8,2 mg/L d'ETR, 1,5 mg/L d'yttrium, ainsi que des concentrations notables de gallium (80 µg/L), scandium (53 µg/L) et thallium (42 µg/L) (Carlos Ruiz Canovas et al., 2020). À Minas Gerais (Brésil), les effluents d'une mine d'uranium atteignent jusqu'à 130 mg/L de RETR, principalement sous forme de lanthane et de cérium, avec un débit important de 150-300 m³/h et un pH acide de 3,4 (Gabriela Cordeiro Silva et al., 2022). Bien que les volumes d'ETR potentiellement exploitables restent limités face à la demande mondiale, les avancées en récupération, via la précipitation, l'échange d'ions et les membranes spécialisées, pourraient améliorer la viabilité de cette ressource. Toutefois, la rentabilité économique demeure un enjeu majeur en raison des coûts élevés de traitement et de séparation. Une intégration de l'extraction des ETR (et d'autres métaux) dans les stratégies de gestion des drainages miniers acides pourrait néanmoins contribuer à réduire leur impact environnemental tout en générant une valeur ajoutée.

4.1.4.3.5 Autres Déchets miniers

Au-delà de ces trois sources secondaires citées ci-dessus et largement identifiées dans la littérature comme étant des sources à fort potentiel, quelques études beaucoup plus marginales se concentrent sur d'autres types de déchets miniers. Les résidus miniers de carbonatites, les formations magmatiques les plus riches en ETR, peuvent contenir jusqu'à 9 % d'ETR après exploitation, incorporés dans des monazites et florencites (Shuronjit Kumar Sarker et al., 2023). Concernant le gisement de Kiruna, qui est exploité pour le fer, et avec des ressources primaires en ETR importantes pour l'Europe, une estimation des résidus miniers déjà produits atteint des teneurs autour de 5000 mg·kg⁻¹ d'ETR, contenus dans l'apatite et la monazite (Peelman et al., 2016). Concernant les gisements de métaux de base, des résidus de gisements hydrothermaux de fluorite-barite-galène, de Silius en Sardaigne, montrent des teneurs 951 mg·kg⁻¹ d'ETR, bien que leur extraction soit proposée comme limitée par l'incorporation des minéraux porteurs dans les carbonates (Balassone et al., 2021). L'analyse de porphyres de cuivre suggère également un potentiel pour une récupération multi-métallique des ETR, présents en micro-inclusions dans les pyrites au Chili (Velasquez et al., 2020). Néanmoins, une autre étude du potentiel de divers déchets miniers métalliques (Pb-Zn-Ag-Cu-Au) en Espagne pour la récupération de métaux critiques dont les ETR a montré que les teneurs étaient faibles pour ces derniers, proches des teneurs moyennes observées dans la croûte terrestre (Rosario-Beltre et al., 2023). Au-delà de l'analyse des teneurs d'ETR, des études de récupération sont aussi menées en Europe. Par exemple, le projet ENVIREE a montré des taux de récupération des ETR supérieurs à 70 % pour les résidus miniers du gisement de Covas

(Portugal), grâce à une concentration gravimétrique et une lixiviation sélective (Kozakiewicz & Grzesik, 2017).

4.1.4.3.6 Encadrement juridique de la valorisation des déchets miniers

La liste et la classification des déchets en différentes catégories conformément à la réglementation européenne (décision 2000/532/CE établissant la liste des déchets, modifiée par la décision 2014/955 — à laquelle renvoie l'article R541-7 du Code de l'environnement, classification présentée dans l'axe 2) **prennent en compte les déchets miniers** (code déchet 01 : « Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux », ce qui comprend notamment les stériles (roche excavée avant d'arriver au filon ou à la couche d'intérêt), la gangue (la roche ou le matériau sans valeur qui est étroitement mélangé avec le matériau précieux à traiter et qui peut contenir des traces du matériau d'intérêt) ou encore les boues rouges). En raison de la façon dont les minéraux sont traités, les résidus peuvent contenir des concentrations de produits chimiques de traitement). **Sont ainsi susceptibles d'entrer dans cette famille les résidus de bauxite, les cendres de charbon, les phosphogypse ou encore les drainages miniers acides. En effet, la qualification juridique de déchet** (« toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » (C. env., art. L.541-1-1)) **est subjective puisqu'elle dépend de l'intention de son détenteur.**

La gestion des déchets de l'industrie extractive est réglementée par la Directive 2006/21/CE du Parlement européen et du Conseil du 15 mars 2006 concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive et modifiant la directive 2004/35/CE. Cette législation s'inscrit dans une **logique prioritaire de gestion des risques**. En effet, selon le premier considérant de la directive, il est indiqué que « la réglementation de la gestion des déchets provenant de l'industrie extractive constitue **l'une des actions prioritaires prévues par la communication de la Commission intitulée « La sécurité des activités minières: étude de suivi des récents accidents miniers »**. Cette action vise à compléter les initiatives entreprises en vertu de la directive 2003/105/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2003 modifiant la directive 96/82/CE du Conseil concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses, ainsi que l'élaboration d'un document sur les meilleures techniques disponibles en matière de gestion des stériles et des résidus miniers élaboré en vertu de la directive 96/61/CE du Conseil du 24 septembre 1996 relative à la prévention et à la réduction intégrées de la pollution ». Pour autant, la question de leur recyclage est aussi une question prégnante puisqu'« il convient de réduire le niveau de danger des déchets encore produits et de veiller à ce qu'ils présentent des risques aussi faibles que possible, **d'accorder la priorité à la valorisation des déchets, et notamment à leur recyclage**, de réduire au minimum la quantité de déchets à éliminer, de les mettre en décharge en toute sécurité et de les traiter le plus près possible de leur site de production, pour autant que l'efficacité des opérations de traitement n'en soit pas diminuée » (Cons. n° 3). Certaines études scientifiques explorent ainsi le potentiel des déchets miniers dans différents sites d'extraction. Par exemple, Zglinicki et al. étudient la valorisation des déchets miniers dans l'île de Bangka (Indonésie) comme source alternative d'ETR lourds et d'uranium (Zglinicki et al., 2022).

La qualification juridique de déchets dangereux, le cas échéant, permet d'apporter une protection supplémentaire à leur gestion. Le traitement des déchets dangereux consiste généralement en la réduction de leur dangerosité. Cela ne prive pas de les utiliser s'ils sont utiles à la fabrication d'un autre produit. Une attention spécifique liée à leur gestion est prévue. Avant d'être un résidu, la bauxite est-elle dangereuse ? Si la réponse est positive, cela implique que des matières premières peuvent être dangereuses et utilisées. Cela peut être aussi le cas pour la réutilisation des déchets. Mais parce qu'ils

sont déchets, il y a un risque supplémentaire pour l'environnement et la santé humaine -parce que laissés sur le site d'extraction sans surveillance par exemple- une traçabilité est donc nécessaire.

Les résidus (c'est-à-dire les déchets solides ou boueux subsistant après le traitement des minéraux par divers procédés), **les stériles et les morts-terrains** (c'est-à-dire les roches déplacées pour atteindre le gisement de minerai ou de minéraux, y compris au stade de la préproduction) **et la couche arable** (c'est-à-dire la couche supérieure du sol) (cons. n°4 de la directive du 15 mars 2006 / déchets issus du processus extractif) entrent dans le champ d'application de la directive de 2006. Plus largement, est visée **la gestion des déchets "provenant des industries extractives implantées sur la terre ferme, c'est-à-dire des déchets résultant de la prospection, de l'extraction (y compris au stade de la préproduction), du traitement et du stockage de ressources minérales, ainsi que de l'exploitation de carrières"** (cons. 6 de la directive). Selon l'article 2.1 de ladite directive "Sous réserve des paragraphes 2 et 3, la présente directive s'applique à la **gestion des déchets résultant de la prospection, de l'extraction, du traitement et du stockage de ressources minérales, ainsi que de l'exploitation de carrières, ci-après dénommés « déchets d'extraction »**. Sont donc exclus :

- les déchets provenant de la prospection, de l'extraction, du traitement de ressources minérales et de l'exploitation de carrières, mais qui ne résultent pas directement de ces opérations;
- les déchets résultant de la prospection, de l'extraction et du traitement en mer de ressources minérales;
- l'injection d'eau et la réinjection d'eau souterraine pompée telles qu'elles sont définies à l'article 11, paragraphe 3, point j), premier et deuxième tirets, de la directive 2000/60/CE, dans la mesure où elles sont autorisées par ledit article ;
- Les déchets inertes et les terres non polluées provenant de la prospection, de l'extraction, du traitement et du stockage de ressources minérales et de l'exploitation de carrières, ainsi que les déchets provenant de l'extraction, du traitement et du stockage de tourbe ne sont pas soumis aux dispositions des articles 7 et 8, de l'article 11, paragraphes 1 et 3, de l'article 12, de l'article 13, paragraphe 6, et des articles 14 et 16, à moins qu'ils ne soient déposés dans une installation de gestion de déchets de catégorie A.

Conformément à la hiérarchie de gestion des déchets, "les États membres devraient 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. Ces plans devraient être structurés de manière à permettre une planification adéquate des options en matière de gestion des déchets, afin de réduire au minimum la production de déchets et leur nocivité, et à encourager leur valorisation. En outre, les déchets des industries extractives devraient être caractérisés en ce qui concerne leur composition afin de garantir, dans la mesure du possible, que leur comportement sera prévisible" (cons. 13).

ZOOM. Plans de gestion des déchets (art.5 de la directive)

Les objectifs du plan de gestion des déchets sont les suivants:

- 1) prévenir ou réduire la production de déchets et les effets nocifs qui en résultent, en particulier:
 - a) en tenant compte de la gestion des déchets dès la phase de conception et lors du choix de la méthode d'extraction et de traitement des minéraux;
 - b) en tenant compte des modifications que peuvent subir les déchets d'extraction du fait d'un accroissement de la superficie et de leur exposition aux conditions en surface;

- c) en envisageant de replacer les déchets d'extraction dans les trous d'excavation après l'extraction des minéraux, pour autant que cette opération soit techniquement et économiquement réalisable et écologiquement rationnelle conformément aux normes environnementales existant au niveau de la Communauté et, le cas échéant, aux exigences de la présente directive;
 - d) en envisageant de remettre la couche arable en place après la fermeture de l'installation de gestion de déchets ou, si cela n'est pas réalisable, de la réutiliser ailleurs;
 - e) en envisageant d'utiliser des substances moins dangereuses pour traiter les ressources minérales,
- 2) encourager la valorisation des déchets d'extraction en les recyclant, en les réutilisant ou en les valorisant, pour autant que ce soit écologiquement rationnel conformément aux normes environnementales existant au niveau de la Communauté et, le cas échéant, aux exigences de la présente directive;
- 3) assurer l'élimination sûre à court et à long terme des déchets d'extraction, en particulier en tenant compte, durant la phase de conception, de la gestion pendant l'exploitation et après la fermeture de l'installation de gestion de déchets, et en choisissant une conception qui:
- a) requière un minimum et, si possible, à terme, pas de surveillance, de contrôle ni de gestion de l'installation de gestion de déchets fermée;
 - b) prévenir ou tout au moins réduire au minimum tout effet négatif à long terme imputable, par exemple, à la migration de polluants aquatiques ou atmosphériques à partir de l'installation de gestion de déchets; et
 - c) assure la stabilité géotechnique à long terme des digues ou des terrils s'élevant au-dessus de la surface du sol préexistante.

En ce qui concerne le **recyclage**, dans son rapport sur la mise en œuvre de la Directive de 2006 sur les déchets de l'industrie extractive⁵, la Commission dédiée du Parlement Européen avait rappelé le contexte d'adoption de cette directive : « La directive 2006/21/CE concernant la gestion des déchets de l'industrie extractive (ci-après « la directive ») **a été adoptée dans la foulée de deux accidents majeurs** impliquant le déversement de déchets dangereux de l'industrie extractive suite à l'effondrement de digues ou de terrils, par exemple en 1998 à Aznalcóllar (Espagne) et Baia Mare et Baia Borsa en 2000 (Roumanie). La directive prévoit des mesures, des procédures et des orientations pour prévenir et réduire autant que possible les effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine résultant de la gestion de déchets d'extraction. Le texte impose des exigences plus strictes envers les installations de « catégorie A », dont la gestion incorrecte pourrait donner lieu à des « accidents majeurs », c'est-à-dire à des accidents présentant un danger grave pour la santé humaine et/ou l'environnement.

Ce même rapport sur la mise en œuvre de la directive de 2006 indique : « 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 volumes de déchets de l'industrie extractive ». De même, l'extraction de ressources primaires de la terre et la gestion des déchets qui en découlent s'intégreraient dans le contexte de l'« économie circulaire »; pourtant, le paquet « économie circulaire » de la Commission de 2015 ne prévoit pas non plus de révision de la directive. C'est pourquoi, selon le rapport de mise en œuvre de la directive, il est important

⁵ Rapport sur la mise en œuvre de la directive sur les déchets de l'industrie extractive (2006/21/CE) 23.3.2017 - (2015/2117(INI), A8-0071/2017)- Commission de l'environnement, de la santé publique et de la sécurité alimentaire Rapporteur: György Hölvényi, https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2017-0071_FR.html

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

d'inscrire la gestion des déchets de l'industrie extractive dans le contexte de l'« économie circulaire », car ce changement de politique pourrait se répercuter sur la façon dont les ressources minérales sont extraites et traitées et, dès lors, sur la façon dont les déchets de l'industrie extractive sont gérés; en d'autres termes, cela aurait un impact sur la mise en œuvre concrète de la directive.

Quant aux techniques d'extraction et de gestion des déchets mentionnées dans ce même rapport, il est précisé que « la majorité des processus pourraient être considérés comme bien développés et sûrs pour autant qu'ils soient mis en œuvre selon les exigences réglementaires ». Dans ce rapport, il est indiqué qu'il y a lieu de réexaminer le concept de meilleures techniques disponibles pour éviter que « meilleures » signifie simplement « pratiques habituelles », même lorsqu'il est avéré que celles-ci sont inadéquates. Lors de la définition des « meilleures pratiques », en particulier celles qui comportent des risques élevés sur le plan environnemental et sanitaire, le rapporteur préconise de recourir aux résultats d'activités de recherche antérieures et en cours, **à des innovations de pointe en matière de recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques et aux enseignements tirés des défaillances des bassins de retenue de déchets dans le monde, ainsi que de donner la priorité à des normes environnementales plus élevées et à l'utilisation efficace des ressources, même si les coûts sont plus élevés, de manière à éliminer les options technologiques présentant un coût minimum, mais les plus susceptibles de défaillir.**

Certains auteurs dénoncent par ailleurs, dans ce contexte, les difficultés de mise en œuvre du droit européen du fait de l'ambiguïté de certaines définitions : « According to EU law, landfill mining is not prohibited, although it is also not promoted or directly regulated. An important question is therefore how the operation should be assessed — is it mining, “ordinary” environmentally hazardous activity, waste management or a combination of these? » (Johansson & Pettersson, 2022).

Dans la proposition de résolution du Parlement européen sur la mise en œuvre de la directive sur les déchets de l'industrie extractive (2006/21/CE) **(2015/2117(INI))**, il est expressément demandé « à la Commission d'encourager la valorisation des matières premières critiques provenant également des déchets issus de l'industrie extractive au sens du plan d'action de l'Union européenne en faveur de l'économie circulaire » (pt 25). Par ailleurs, il « souligne qu'en vue de la transition de l'Union vers une économie circulaire, il est essentiel de diminuer l'utilisation des ressources et de favoriser la réutilisation et le recyclage; invite la Commission à envisager de fixer des objectifs à cette fin, fondés sur une analyse du cycle de vie (pt 27). De plus, il « souligne que l'« extraction globale » (« comprehensive extraction ») pourrait devenir le principe directeur, compte tenu, cependant, des contraintes techniques et commerciales, ainsi que des coûts indirects potentiels, tels que l'empreinte carbone; propose que les déchets de l'extraction et du concassage soient analysés et séparés pour l'élimination afin de faciliter leur recyclage ultérieur » (pt 28); dans la même veine, il « demande à la Commission et aux autorités compétentes des États membres d'investir davantage dans la recherche et le développement de processus de substitution viables afin de fournir l'Union en matières premières et secondaires et de prévenir la production de déchets de l'industrie extractive » (pt 29).

Il convient de noter, en outre, qu'il n'existe pas de dispositions spécifiques pour éviter la production de déchets issus de l'activité d'extraction (cela n'étant peut-être pas possible matériellement), la **prévention** intervient en réalité indirectement par la durabilité et l'écoconception. La notion de prévention, dans le Code minier français, renvoie uniquement à la prévention des risques technologiques. Quant au terme « déchet », il n'est employé que pour « l'exploitation des déchets de mines ».

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

Le Règlement européen sur les matières premières critiques a permis une actualisation de la réglementation sur la valorisation des déchets miniers en encourageant la circularité de l'utilisation des matériaux, y compris en ce qui concerne les déchets, ce qui ouvre de nouvelles perspectives pour la valorisation des déchets miniers et industriels. L'article 27 s'intitule en effet « Valorisation des matières premières critiques issues des déchets d'extraction » et prévoit que :

- 1) Les exploitants qui sont tenus d'établir des plans de gestion des déchets conformément à l'article 5 de la directive 2006/21/CE fournissent à l'autorité compétente telle que définie à l'article 3, point 27, de ladite directive, une étude d'évaluation économique préliminaire concernant les possibilités de valorisation des matières premières critiques issues:
 - a) des déchets d'extraction stockés dans l'installation; et
 - b) des déchets d'extraction produits ou, lorsque cela est jugé plus efficace, du volume extrait avant que les déchets ne soient produits. (...)
- 2) L'étude visée au paragraphe 1 comprend au minimum une estimation des quantités et des concentrations de matières premières critiques contenues dans les déchets d'extraction et dans le volume extrait, ainsi qu'une évaluation de leur valorisabilité technique et économique. Les exploitants précisent les méthodes utilisées pour estimer les quantités et les concentrations.
- 3) Au plus tard le 24 novembre 2026, les exploitants des installations de gestion de déchets d'extraction soumettent l'étude visée au paragraphe 1 du présent article à l'autorité compétente telle que définie à l'article 3, point 27, de la directive 2006/21/CE. Les exploitants de nouvelles installations de gestion de déchets d'extraction soumettent cette étude à l'autorité compétente, telle que définie à l'article 3, point 27, de la directive 2006/21/CE, lorsqu'ils présentent leurs plans de gestion des déchets conformément à l'article 7 de ladite directive.
- 4) Les États membres créent une base de données où sont recensées les installations de gestion des déchets d'extraction fermées se trouvant sur leur territoire, y compris les installations de gestion de déchets d'extraction abandonnées, à l'exception des installations de gestion des déchets d'extraction fermées, lorsque les caractéristiques particulières des sites de déchets ou les conditions géologiques rendent improbable la présence de quantités potentiellement valorisables sur le plan technique de matières premières critiques. Cette base de données contient des informations concernant:
 - a) l'emplacement, la superficie et le volume des déchets ou, s'il y a lieu, leur volume estimé de l'installation de gestion de déchets d'extraction;
 - b) l'exploitant ou l'ancien exploitant de l'installation de gestion de déchets d'extraction et, le cas échéant, son successeur légal;
 - c) les quantités et concentrations approximatives de toutes les matières premières contenues dans les déchets d'extraction et, si possible, dans le gisement d'origine, conformément au paragraphe
 - d) tout autre aspect jugé pertinent par l'État membre pour permettre la valorisation des matières premières critiques en provenance d'une installation de gestion de déchets d'extraction.
- 5) Au plus tard le 24 novembre 2027, les États membres adoptent et mettent en œuvre des mesures destinées à encourager la valorisation des matières premières critiques issues de déchets d'extraction, en particulier ceux des installations de gestion de déchets d'extraction fermées qui sont recensées dans la base de données visée au paragraphe 4 comme contenant des matières premières critiques potentiellement valorisables sur le plan économique.

Le Règlement européen sur les matières premières critiques intègre ainsi les déchets miniers comme une source stratégique pour réduire la dépendance de l'UE aux importations et renforcer sa résilience, tout en promouvant une économie circulaire et durable. Ce cadre général nécessite néanmoins d'être précisé et progressivement mis en œuvre en pratique à l'échelle des États pour produire ses effets.

4.1.5 Résumé et conclusion

En résumé, 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. 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. 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% (Deady et al., 2016).

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'euprécium, 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 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. Le Règlement européen sur les matières premières critiques a permis une première actualisation de la réglementation sur la valorisation des déchets miniers en encourageant la circularité de l'utilisation des matériaux, y compris en ce qui concerne les déchets, ce qui ouvre de nouvelles perspectives pour la valorisation des déchets miniers et industriels.

En conclusion, 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 générant une valeur ajoutée

4.1 La mise en valeur de ressources primaires et secondaires en France et en Europe: cartographie des ressources

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).

4.2 L'existence de procédés innovants, environnementalement plus 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 & 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 bastnäsité et la monazite sont particulièrement consommatrices en énergie et en réactifs, tandis que l'eudialyte 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 telles 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-déchets. 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.

4.2.1 Nouvelles pistes de techniques d'exploration

Les ressources en ETR extraits du sous-sol ou de sources secondaires ont en commun d'être issues d'un matériau brut solide, naturel et hétérogène. Cette complexité naturelle reflète une grande diversité de propriétés physiques (granulométrie, porosité, perméabilité), chimiques (teneurs en ETR, co-produits) et minéralogiques (notamment les minéraux porteurs des ETR). Cette hétérogénéité et complexité, de l'échelle du minéral à l'échelle régionale, explique pourquoi les études d'exploration (géochimiques, géophysiques) produisent des estimations de ressources (volumes, teneurs, tonnages) associées à des incertitudes élevées tant sur terre qu'au fond des océans. La complexité se répercute sur l'ensemble de la chaîne de traitement depuis les hétérogénéités des concentrations à l'échelle micrométrique, les fractions de certains ETR par rapport à d'autres, les estimations des volumes de minéraux porteurs d'ETR et leur potentiel et rendement d'extraction, et la grande variabilité sur les éléments compagnons valorisables ou bien possiblement toxiques. **En conséquence, les estimations des ressources et des réserves sont dépendantes des spécificités de chaque site exploré ou exploité.**

L'exploration pour identifier, caractériser et découvrir de nouvelles ressources en ETR repose sur un éventail de méthodes, intégrant :

- la géophysique (anomalies magnétiques, gravimétriques ou électromagnétiques, etc.),
- La géochimie (concentrations anormales d'éléments indicateurs des ETR),
- la géologie (structures tectoniques, présence de roches associées aux gisements ciblés),

- la minéralogie (identification des minéraux porteurs des métaux ciblés).

Le panel de méthodes les plus utilisées sont géophysiques (20%), géochimiques (70%), puis les autres méthodes (10%). Selon les méthodes employées (Balaram, 2021, 2022; Balaram & Sawant, 2022), celles-ci fournissent des informations pour explorer la concentration des métaux et leur localisation en surface (2D) et son extension géométrique en profondeur (3D).

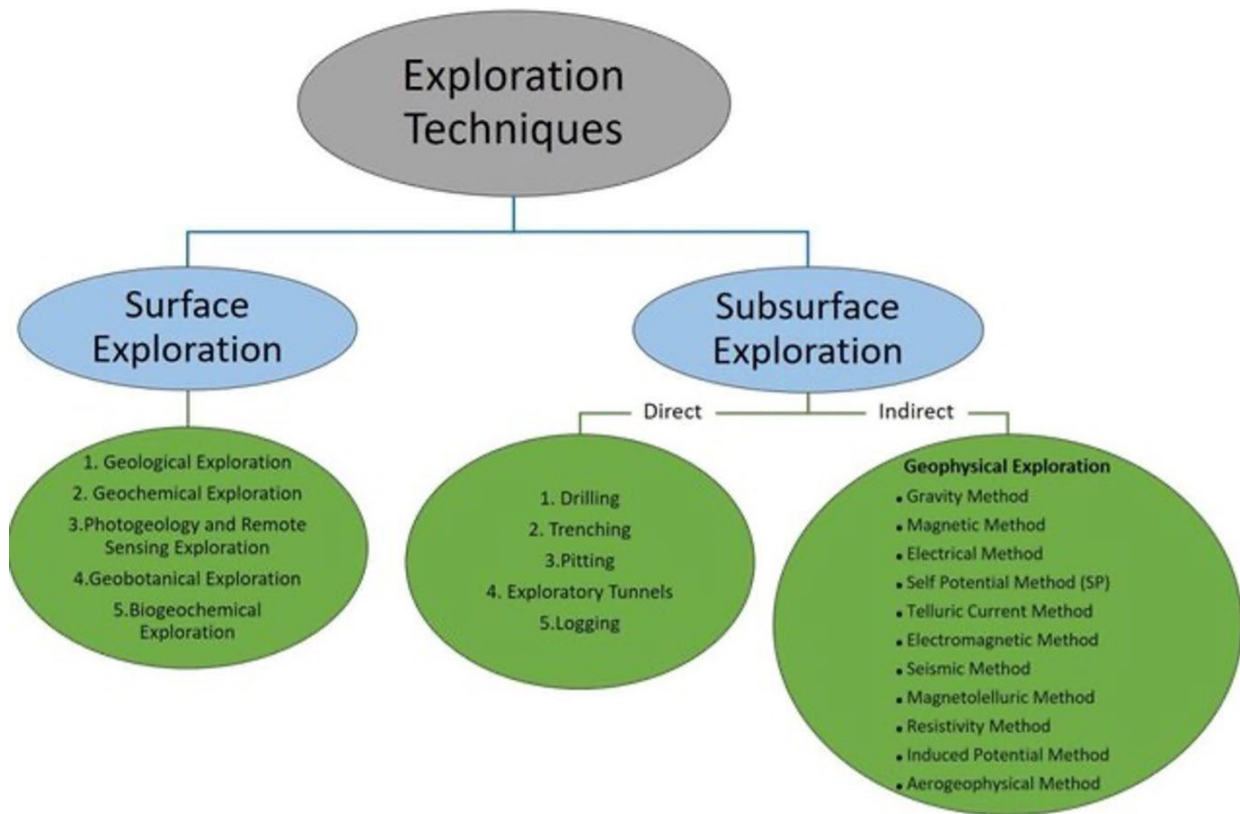


Figure 4.6 Méthodes d'exploration des gisements. Tirée de (Katiyar et al., 2024). Sous licence CC BY.

4.2.1.1 Exploration de nouveaux gisements

4.2.1.1.1 L'exploration géophysique

La Télédétection à haute résolution utilise les données satellites (par exemple Landsat 8 OLI, Terra ASTER, and Sentinel-2 MSI) pour cartographier les régions minières. Elle se base sur les signatures de réflectance et d'absorption caractéristiques dans la partie du spectre électromagnétique allant du visible à l'infrarouge à ondes courtes ; il s'agit de l'imagerie hyperstectrale (Mars, 2018). L'imagerie hyperspectrale offre des capacités avancées de détection en raison de l'utilisation de bandes spectrales étroites, ce qui permet de distinguer des minéraux spécifiques et de cartographier les concentrations d'ETR. Par exemple, un indice de bastnäsité a été développé pour détecter les ETR dans les carbonatites, démontrant une cartographie rapide et fiable des minerais (Kopackova-Strnadova et al., 2021). Il permet aussi de se concentrer sur des raies spécifiques comme celle du Nd, comme le montre une étude à partir du gisement de Fen en Norvège (Boesche et al., 2015). Cette méthodologie est aujourd'hui utilisée pour détecter de nouveaux gisements de carbonatite (Neave et al., 2016), des gisements phosphatés d'Iran (Karimzadeh & Tangestani, 2022) ou les gisements de type adsorption ionique (H. Li et al., 2021).

Une autre méthode d'imagerie se base sur la géophysique aéroportée qui permet la mise en œuvre simultanée de plusieurs méthodes d'acquisition de données géophysiques dans des zones d'accès difficile (forêts, montagnes) ou couvertes par une activité économique, à l'exception des zones densément urbanisées. Les mesures sont réalisées à l'aide d'instruments géophysiques embarqués le plus souvent à bord d'un avion ou suspendus sous un hélicoptère. Après traitement et modélisation/inversion, elles restituent une image homogène, continue et localisée (précision du GPS) du milieu géologique souterrain, en 2D et en 3D. Associées aux méthodes magnétotelluriques, la géophysique aéroportée permet d'explorer les provinces métallogéniques grâce à des mesures de champs magnétiques et électriques naturels. Cela améliore la détection de structures géologiques profondes souvent associées aux minéraux critiques. Pour les méthodes géophysiques, la miniaturisation représente également une voie d'innovation, avec des drones qui permettent d'équiper plusieurs capteurs pour les mesures électriques ou radiométriques (Martin et al., 2020).

4.2.1.1.2 L'exploration géochimique

L'analyse des échantillons solides et fluides prélevés sur le terrain afin de déterminer les teneurs en ETR a traditionnellement impliqué des techniques en laboratoire, telles que la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS), la spectrométrie de masse à haute résolution-ICP-MS (HR-ICP-MS), la spectroscopie d'émission optique à plasma à couplage inductif (ICP-OES), l'analyse par activation neutronique (NAA), la fluorescence X (XRF), la spectrométrie de rupture induite par laser (LIBS) et la spectrométrie d'émission atomique à plasma micro-ondes (MP-AES).

Ceux-ci concernent des pistolets XRF, des scanners de carottes [12], des spectromètres UV-Vis infrarouges et l'infrarouge à ondes courtes (pNIR-SWIR ; (Percival et al., 2018)), Raman, le diffractomètre portable de rayons X (pXRD) et le spectromètre portable de rupture induite par laser (pLIBS), (Balaram, 2021, 2022, 2023; Balaram & Sawant, 2022). Cette miniaturisation permet aujourd'hui de les amener sur le terrain permettant un gain de temps d'analyse et de moyens financiers comparés à l'échantillonnage traditionnel sur le terrain et la mesure postérieure en laboratoire. La miniaturisation permet d'aller plus vite en se concentrant notamment sur les métaux indicateurs des différents types de gisement de terres rares (cf. Figure 4.7). Leurs applications peuvent ainsi se généraliser à de très grandes régions, comme pour l'étude des teneurs d'ETR des sols autour de Freiberg en Allemagne, qui montrent des teneurs élémentaires plus importantes dans les sols acides riches en matière organique (Wiche et al., 2017).

REE	Carbonatite rocks	Bastnäsite group, ancylite, monazite, (fluor)apatite, pyrochlore, xenotime, florencite.	Na, Mg, Fe, P, Ba, F, S, Sr, Ca, Nb, Th, U, Zr, Cu, Ta, Ti, V, Mn, Pb.
	Igneous rocks (including hydrothermal upgrade)	Bastnäsite group, aegirine, eudialyte, loparite, allanite, monazite, fergusonite, zircon, xenotime, fluorapatite, ancylite, gadolinite, euxenite, mosandrite.	Na, K, Fe, Al, Zr, Ti, Nb, Ta, Li, F, Cl, Si, Th, U, P, Cs, Rb, Sn, W, Mo, Be, Ga, Hf, Mn, B.
	Placers and palaeoplacers	Monazite, xenotime, allanite, euxenite.	Ti, Nb, Zr, Au, Sn, Th, U, Pb, F.
	Laterites	Monazite, apatite, pyrochlore, crandallite group, bastnäsite group, churchite, rhabdophane, plumbogummite, zircon, florencite, xenotime, cerianite.	Fe, Al, Nb, Zr, Ti, Sn, Mn, P, low Si, negative Ce anomaly.
	Ion-adsorption	Clay minerals (mainly kaolinite and halloysite).	High Si (>75%), low P.
	Iron oxide-associated (including IOCG) deposits	Bastnäsite, synchysite, monazite, xenotime, florencite, britholite.	Fe, Cu, U, Au, Ag, Ba, F, P, S.
	Seafloor deposits, such as manganese nodules, ferromanganese crust, phosphorite.	Vernadite, todorokite, Fe-oxyhydroxide, carbonate fluorapatite, francolite.	Mn, Fe, P, Cu, Ni, Co.

Figure 4.7 Les métaux indicateurs des différents types de gisement de terres rares. Tirée de (Balaram & Sawant, 2022). Sous licence CC BY.

4.2.1.1.3 L'exploration biogéochimique

Des méthodes moins conventionnelles peuvent se baser sur l'exploration biogéochimique. En utilisant la composition chimique de la végétation, il est possible de repérer des anomalies géochimiques liées à des dépôts d'ETR sous-jacents, comme démontré par des études sur des arbustes en Laponie finlandaise (Middleton et al., 2018). Dans les climats chauds, une autre approche de prospection utilisant le vivant consiste à exploiter les matériaux remontés dans les monticules de termites, comme reflétant la géologie sous-jacente (Horiuchi et al., 2014).

4.2.1.2 Exploration du minerai

4.2.1.2.1 Exploration géophysique

La télédétection peut également être mobilisée dans la gestion minière pour modéliser la topographie et quantifier les volumes de déchets, afin d'évaluer leur potentiel d'exploitation (Saratsis et al., 2023).

Afin d'optimiser la gestion de l'exploitation, la télédétection est aussi utilisée pour détecter les variations topographiques dues à l'extraction des terres rares, comme dans le cas des sites de Jiangxi en Chine. La télédétection fournit alors une vue d'ensemble des activités minières, permettant de surveiller l'impact environnemental et d'améliorer la gestion et la restauration des zones minières. La télédétection peut également servir à suivre les teneurs en ETR des effluents contaminés (Dai et al., 2013).

4.2.1.2.2 Exploration minéralogique

La caractérisation du minerai et plus spécifiquement de l'environnement minéralogique, ou spéciation, des ETR dans les gisements miniers est cruciale pour optimiser les étapes de minéralurgie, où les minéraux sont d'abord extraits puis de métallurgie, pour leur traitement de séparation. En effet, les ETR se trouvent dans une grande variété de phases minérales, qui réagissent différemment selon les procédés de séparation et extraction employés. Le déportement élémentaire consiste à évaluer quantitativement la distribution des ETR entre les différents minéraux hôtes (REF). L'assignation des compositions moyennes des ETR à leurs phases minérales permet ainsi de prédire les taux de récupération et les méthodes de traitement optimales. Ces minéraux peuvent présenter des zonages chimiques complexes liés à des phénomènes géologiques, influençant alors ce déportement élémentaire. Enfin une identification précise des phases d'ETR présentes, ainsi que de leur association avec d'autres minéraux, leur taille de grain et leurs caractéristiques de libération, permet de concevoir des programmes de traitement de séparation adaptés et d'améliorer les rendements.

Le déportement élémentaire nécessite une analyse quantitative des teneurs en ETR des minéraux, pour lesquelles les techniques analytiques ont considérablement évolué. Aujourd'hui, les équipements de laboratoire permettent de mesurer rapidement (quelques secondes à minutes) et précisément la composition minérale des échantillons à la microsonde électronique ou par LA-ICP-MS (Janots et al., 2008). Pour les minéraux d'ETR qui sont souvent de tailles micrométriques, le recours au couplage de la microscopie électronique et à l'imagerie en cathodoluminescence contribue à distinguer avec succès certains minéraux d'ETR, en quelques secondes, ce qui représente un gain de temps considérable pour les études minières. L'imagerie s'est beaucoup développée pour pouvoir repérer des enrichissements en ETR et les minéraux qui les contiennent. Les minéraux peuvent être cartographiés à l'échelle d'un échantillon par microscopie électronique à balayage, LIBS, micro-XRF (Barbosa et al., 2022; Mueller et al., 2021) ou par d'autres techniques avancées de spectroscopie (Jiao et al., 2020). Particulièrement, la routine QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy) est une technique d'analyse automatisée par microscopie électronique à balayage (SEM) couplée à une spectrométrie à dispersion d'énergie (SEM-EDS). Elle permet de caractériser la composition et la texture des minéraux d'ETR sur des lames polies d'échantillons (Mackay et al., 2016). Autrement, les cartographies en micro-fluorescence X (μ -EDXRF) permettent d'obtenir des cartographies pour détecter les métaux critiques avec un pas d'analyse de taille autour de 10 μm en laboratoire ou sub-micrométrique sur synchrotron. Toutefois, ces cartographies sont le plus souvent qualitatives que quantitatives pour les ETR et nécessitent ensuite d'être complétées par des analyses quantitatives par microsonde électronique (Mueller et al., 2021) par LA-ICP-MS.

4.2.1.3 Intelligence artificielle au service de l'exploration

L'intelligence artificielle offre des opportunités majeures pour accélérer l'exploration des ressources d'ETR, et affiner la précision des cartographies prospectives minérales en vue d'évaluer leur potentiel et de participer à la décision sur sa future exploitation (Corrigan & Ikonnikova, 2024; Noriega & Pourrahimian, 2022).

Elle optimise l'analyse des données en traitant de vastes ensembles d'informations issues de la géophysique (Shirmard et al., 2022), géochimie et des bases de données minéralogiques (Gomez-Flores et al., 2022) et en intégrant ces données avec la géologie pour mieux cibler les gisements dans des systèmes d'information géographique (Katiyar et al., 2024). L'IA joue ainsi un rôle clé dans la création des cartes de prospection des gisements en analysant de grandes quantités de données et en identifiant des schémas complexes qui pourraient échapper aux méthodes classiques. L'essor de l'intelligence artificielle pour explorer les gisements d'ETR est encore récent, mais elle a déjà été appliquée avec succès

à l'exploration de gisements de carbonatites (Parsa et al., 2024), sédimentaire (Bishop & Robbins, 2024), gisements d'absorption ionique (G. Cheng et al., 2023), aux charbons (Chatterjee et al., 2024).

Ensuite, l'IA pourrait permettre de révéler de nouveaux types de gisements (Presley, 2024). En effet, elle permet de mieux comprendre les processus de formation des gisements complexes en se basant notamment sur les cartographies géochimiques à l'échelle microscopique comme celles obtenues en utilisant le LA-ICP-MS sur des gisements d'uraninite enrichis en ETR (Acosta-Gongora et al., 2022). Ainsi, elle révèle de nouveaux critères d'exploration pour la découverte de nouveaux gisements et d'optimiser les stratégies d'extraction.

4.2.1.4 Résumé

Les technologies d'exploration pour **découvrir et caractériser de nouveaux gisements** en ETR reposent sur un éventail de méthodes géologiques, géophysiques, géochimiques et minéralogiques. 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 télédétection ou aux mesures aéroportées, mais aussi cibler la localisation des métaux à l'échelle microscopique d'un minéral. Les **méthodes géophysiques** sont essentielles 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 (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 & 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 (V. 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 bastnäsite 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 attendants, 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).

4.2.2 Procédés techniques d'extraction des ETR

4.2.2.1 Sources primaires

Les ETR sont dispersés et rarement présents sous forme de gisements riches et exploitables, ce qui rend leur extraction complexe. Ils ont une forte affinité avec l'oxygène et leurs ressources sont donc principalement présentes sous forme de minerais oxydés (carbonates, phosphates, silicates). Le traitement complexe de ces minerais d'ETR pour former des produits utilisables varie fréquemment d'un gisement

à l'autre. Les principaux facteurs influençant la sélection des procédés de traitement sont ainsi le type et la nature du gisement, sa complexité ainsi que la présence d'autres composants (boues, argile, gangue soluble...) (Ferron et al., 1991b). L'extraction des ETR impose d'importantes contraintes environnementales et logistiques, dues notamment à la complexité des procédés de traitement chimique (broyage, flottation, lixiviation acide, échange d'ions, etc.) qui génèrent des volumes de résidus miniers importants, souvent radioactifs ou toxiques, tandis que les réglementations européennes exigeantes freinent l'ouverture de nouveaux sites d'exploitation. Sur le plan stratégique, l'Union Européenne, qui s'efforce de réduire sa dépendance vis-à-vis des importations, soutient des projets d'exploration et de recherche visant à identifier et évaluer des gisements locaux. Parallèlement il s'agit d'encourager des innovations technologiques tenant compte notamment des concepts de l'hydrométallurgie circulaire (Binnemans & Jones, 2023), pour l'extraction et la séparation des métaux en permettant la valorisation de dépôts plus ou moins riches. Les ETR sont principalement associés à des gisements de roches carbonatitiques (où se rencontrent notamment la bastnäsité et la monazite) et de roches alcalines ou syénitiques/peralcalines (eudialyte, loparite), mais peuvent également se concentrer dans certains placers, gisements alluvionnaires (monazite, xénotime) ou dans des argiles ioniques riches en ETR lourds. Ces argiles iono-adsorbées (Z. Wu et al., 2023), riches en ETR lourds (jusqu'à 60 % des ETR), se prêtent directement à un traitement hydrométallurgique sans réel enrichissement physique (Kanazawa & Kamitani, 2006).

La littérature aborde l'extraction et la récupération des ETR en Europe à partir de gisements primaires en intégrant diverses approches hydrométallurgiques, pyrométallurgiques et de séparation physique. L'étape initiale du traitement du minerai comprend généralement un processus d'enrichissement qui ne modifie pas la composition chimique du minerai, mais qui aide à libérer le minerai du matériau hôte (minéralurgie). Les différences de propriétés physiques telles que la gravité, la magnétisabilité et le potentiel d'ionisation de surface permettent la séparation par gravité, flottation, séparation électrostatique et magnétique avec une augmentation spectaculaire du pourcentage d'ETR dans le matériau récupéré. Les étapes suivantes visent à transformer le minéral concentré en formes chimiques valorisables par le biais de diverses réactions thermiques et chimiques, en utilisant principalement des techniques hydrométallurgiques pour purifier le minerai d'ETR (métallurgie) (S. Cheng et al., 2024).

Zoom. Minéralurgie et métallurgie.

La minéralurgie concerne le traitement des minerais juste après leur extraction afin de séparer les minéraux utiles (contenant les métaux) de la gangue. On obtient un concentré minéral enrichi en éléments d'intérêt.

La métallurgie intervient après la minéralurgie : extraire le métal à partir du concentré, puis le purifier et le transformer. On obtient un métal pur ou alliage utilisable industriellement.

4.2.2.1.1 Minéralurgie pour la production de concentrés d'ETR

4.2.2.1.1.1 Séparation gravimétrique

Les minéraux d'ETR affichent généralement une densité élevée (de 4 à 7), supérieure à celle de la gangue (principalement silicatée), justifiant l'emploi de méthodes gravimétriques (Ferron et al., 1991a). L'une des applications les plus fréquentes concerne l'enrichissement de la monazite à partir de sables lourds côtiers. Dans un premier temps, la fraction lourde est concentrée (20—30 % de minéraux lourds) au moyen d'un concentrateur à cône, puis une séparation par spirale est appliquée pour obtenir un concentré renfermant 80—90 % de minéraux lourds (C. K. Gupta & Krishnamurthy, 1992; C. Gupta & Krishnamurthy, 2005). Des opérations magnétiques, électrostatiques ou gravimétriques complémentaires interviennent ensuite, en fonction de la minéralogie propre au gisement (Ferron et al., 1991a). Un exemple de schéma de traitement appliqué aux sables lourds égyptiens (contenant environ

30 % de minéraux lourds valorisables) est illustré par Moustafa et Abdelfattah (Moustafa & Abdelfattah, 2010). Après l'élimination de la gangue silicatée via la concentration gravimétrique humide en utilisant une table à secousses type Wilfley, un séparateur magnétique de faible intensité supprime les minéraux ferromagnétiques sans éliminer la monazite paramagnétique. On retrouve ainsi un flux non magnétique riche en monazite, zircon et rutile. Des séparations gravimétriques, magnétiques et électrostatiques ultérieures tirent profit des différences de propriétés de ces minéraux pour aboutir à des concentrés séparés. Le rutile, par exemple, est éliminé car il rejoint la fraction conductrice par séparation électrostatique, alors que monazite et zircon sont non conducteurs (Moustafa & Abdelfattah, 2010). En plus des sables lourds, la gravimétrie (tables à secousses, spirales, séparateurs coniques) est associée à la flottation dans divers sites chinois. À Bayan Obo, elle intervient entre les étapes de flottation grossière et de nettoyage, afin de séparer efficacement la monazite et la bastnäsité de la gangue ferrifère et silicatée (Jordens et al., 2013). Toutefois, certaines difficultés peuvent survenir lorsque des minéraux de densité proche des ETR (p. ex. la barytine) aboutissent dans le concentré, et la ségrégation de particules ultra-fines demeure moins efficace, entraînant des pertes non négligeables. L'ajout de concentrateurs centrifuges (Knelson, Falcon, Mozley MultiGravity Separator) peut pallier partiellement ces problèmes (Falconer, 2003). Néanmoins, ces appareils sont souvent exploités en mode semi-continu et conviennent plutôt aux très faibles teneurs en métaux (<0,1 %), ce qui peut limiter leur emploi pour les ETR. Le développement de séparateurs centrifuges en continu (p. ex. Knelson CVD) lève cette contrainte, car les fabricants annoncent la capacité de traiter des flux allant jusqu'à 50 % de minéraux lourds (Q. Chen et al., 2020).

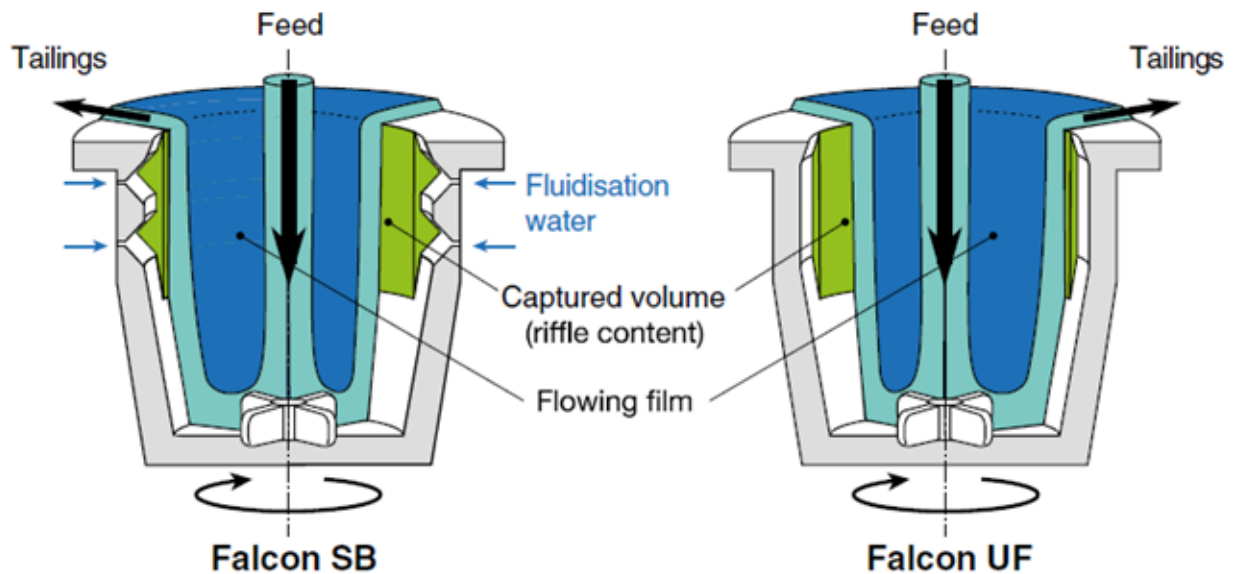


Figure 4.8 Falcon L40 SB (gauche) et Falcon UF (droite) (Filippov et al., 2016)

Des essais en laboratoire ont aussi confirmé l'efficacité de la gravimétrie pour de gisements turcs à minéralisations très fines (Özbayoğlu and Ümit Atalay, 2000). Dans ces travaux, les ETR se concentrent majoritairement en dessous de 5 µm. Pour y remédier, le broyage est ajusté afin de limiter cette génération de fines, par l'utilisation d'un séparateur Multi-Gravity adapté aux particules ultrafines (Özbayoğlu and Ümit Atalay, 2000). Les mêmes conclusions se vérifient sur le gisement de la mine de Maoniuping en Chine, par l'emploi d'un criblage et d'un broyage secondaire après gravimétrie et séparation magnétique, permettant d'obtenir un concentré flotté de bastnäsité titrant à 62 % d'ETR avec

un taux de récupération de 80—85 % (Jordens et al., 2013)⁶. Une piste intéressante consiste enfin à réaliser une opération de grillage avant la séparation gravimétrique. Le traitement thermique à plus de 1000°C transforme les carbonates en oxydes, augmentant la densité minérale et la ségrégation. Par ailleurs, le refroidissement rapide (trempe) après grillage peut diminuer l'énergie nécessaire au broyage (Fitzgibbon & Veasey, 1990), mais aucun essai industriel ou pilote n'a à ce jour confirmé l'intérêt pratique de ce procédé.

4.2.2.1.1.2 Déschlammage

Le déschlammage consiste à retirer les particules fines (schlamms) d'un liquide ou d'une suspension. La formation de fines (<5 µm) lors du broyage peut engendrer d'importantes pertes d'ETR dans les rejets de déschlammage. Pour y remédier, Chistov et al. (Chistov et al., 1995) ont adopté un traitement micro-ondes à 2,45 GHz et 5 kW pour chauffer un minerai complexe d'ETR du site de Tomtor en Russie à environ 540°C (pendant 600 s), réduisant la proportion de fines de 43,0% à 18,9%. Ils attribuent ce comportement à des modifications structurales des minéraux ferrifères (magnétite, hématite) sous l'effet d'un échauffement non linéaire. D'autres recherches explorent les avantages d'une libération assistée par micro-ondes pour divers minéraux (Can & Bayraktar, 2007; D. A. Jones et al., 2005; Kingman, 2006; Kumar et al., 2010), ouvrant la voie à de possibles applications industrielles.

4.2.2.1.1.3 Séparation magnétique

Tirant profit de l'existence d'électrons non appariés dans la sous-couche 4f des terres rares, les techniques de séparation magnétique sont explorées pour éliminer la gangue magnétique et concentrer les minéraux paramagnétiques (monazite, xénotime) (Hou et al., 2024). Couplés à la gravimétrie, les séparateurs magnétiques sont essentiels pour valoriser la monazite à partir de sables côtiers, en éliminant les minéraux ferromagnétiques (ex. magnétite) et distinguant la monazite paramagnétique du zircon ou du rutile diamagnétiques (Ferron et al., 1991a; K. Kim & Jeong, 2019). Sur le deuxième plus grand gisement d'ETR du pays (Maoniuping, province du Sichuan), la combinaison gravimétrie—séparation magnétique aboutit à une récupération de bastnäsite supérieure à 55 %, sans nécessité de flottation. Dans le cadre de la valorisation du gisement de Nechalacho au Canada, c'est en combinant un procédé prévoyant l'utilisation d'un concentrateur en spirale pour préconcentrer le minerai à une granulométrie relativement grossière (d80 = 120 µm), avant une réduction de taille supplémentaire (d100 = 53 µm) suivie d'une séparation à l'aide d'une table à secousses, que deux étapes de séparation magnétique à faible puis à forte intensité permettent une libération très efficace d'une phase riche en ETR (Marion et al., 2023).

⁶ D'après l'article qu'ils citent : Fangji et al., 2002, Chinese Rare Earths 23, 1—5 (en chinois)

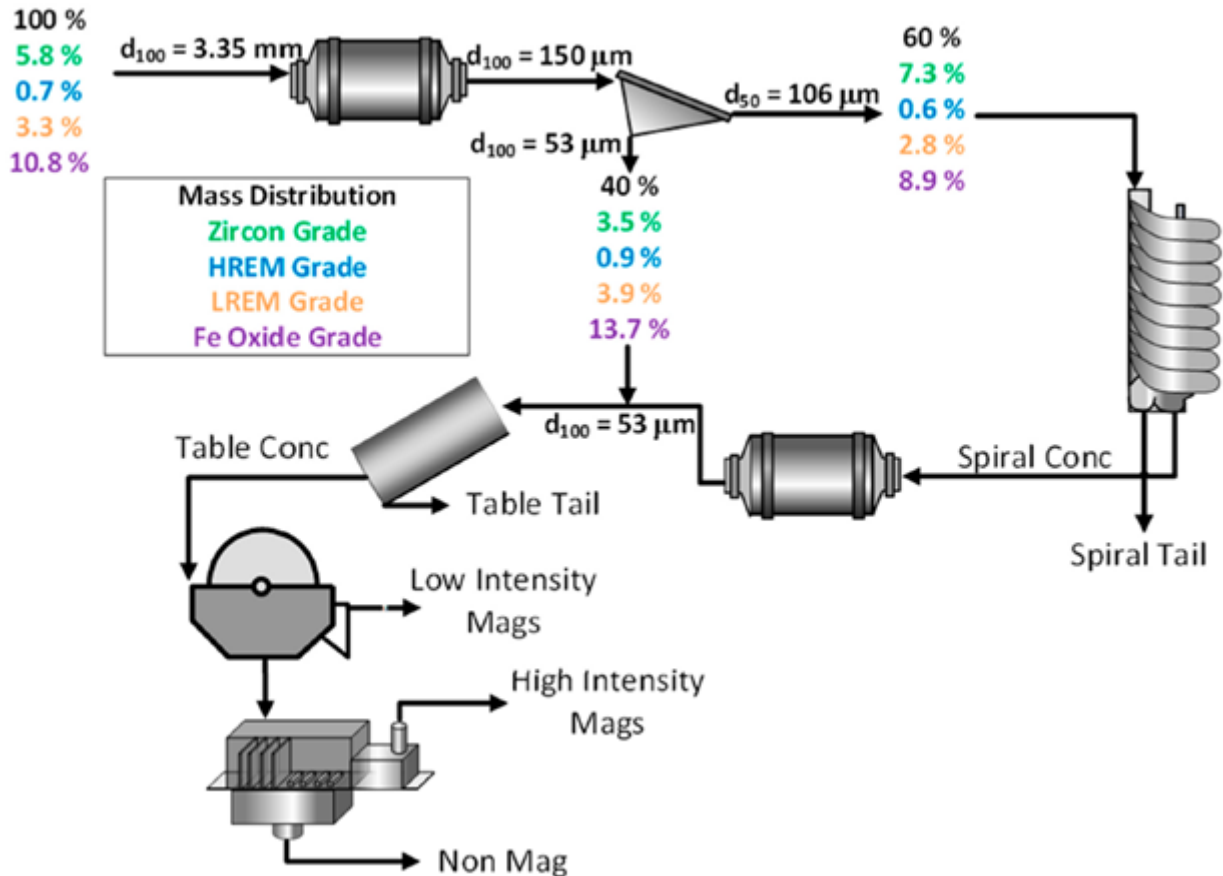


Figure 4.9 Séparation magnétique. Tirée de (Marion et al., 2023). Sous licence CC BY.

Pour le xénotime, qui se révèle plus paramagnétique que la monazite, la séparation magnétique est possible, mais l'usage de la flottation reste préférable pour des particules en dessous de $100 \mu\text{m}$ ⁷. En Chine, la séparation magnétique est systématiquement utilisée, notamment sur le site de Dalucao (province du Sichuan) pour les minerais de bastnäsité, d'abord pour écarter la gangue ferrifère, facilitant le nettoyage du concentré obtenu par étape de flottation (Xiong et al., 2018).

4.2.2.1.1.4 Séparation électrostatique

La séparation électrostatique repose sur la différence de conductivité des espèces minérales (Higashiyama & Asano, 1998). Elle est surtout employée lorsque d'autres voies ne permettent pas de distinguer des phases trop similaires en densité ou susceptibilité magnétique (Ferron et al., 1991a). Par exemple, le xénotime paramagnétique peut être isolée de l'ilménite également paramagnétique via une séparation électrostatique. L'ilménite est conductrice, alors que la xénotime ne l'est pas (C. K. Gupta & Krishnamurthy, 1992). La principale limite de la séparation électrostatique réside dans la nécessité d'opérer sur un matériau totalement sec (Higashiyama & Asano, 1998), entraînant des coûts énergétiques élevés si le minerai est préalablement broyé en voie humide. Sauf exception (argiles iono-adsorbées), la plupart des gisements d'ETR hors sables lourds exigent un broyage en milieu aqueux, ce qui rend le séchage complet techniquement et économiquement contraignant.

⁷ <https://pubs.usgs.gov/of/1999/0529/report.pdf>

4.2.2.1.1.5 Flottation par mousse

La flottation est sans doute la méthode la plus couramment utilisée pour concentrer les ETR (Anderson et al., 2017; Chelgani et al., 2015). Elle prend en compte une large gamme de granulométries fines et s'adapte à la minéralogie spécifique du gisement. Cette technique est largement déployée comme étape de concentration des ETR, en raison de son efficacité à séparer des particules présentant des propriétés de surface hydrophiles et hydrophobes. Son application s'avère avantageuse pour isoler les ETR de la gangue minérale associée, méthode notamment adaptée à des seuils de libération plus fine. Les études récentes pointent une attention particulière à l'égard du choix des réactifs, incluant collecteurs, agents moussants et dépresseurs impliqués dans les mécanismes de séparation et de transport par chimisorption et/ou physisorption (Espirito et al., 2018, 2019; H. Zhou et al., 2023). Parmi les collecteurs les plus fréquemment utilisés, on distingue les carboxylates (Abaka-Wood et al., 2024; Espirito et al., 2019; Z. Wang, Wu, Xu, Shu, Fang, et al., 2020; Z. Wang, Wu, Xu, Shu, Yang, et al., 2020; X. Yang et al., 2015), les hydroxamates (W. Cao et al., 2018; Chapleski et al., 2020; Duan et al., 2020, 2021; Z. Guo, Sultan Ahmed Khoso, et al., 2022; Z. Guo, Tian, et al., 2022; Jiao et al., 2020; Q. Liu et al., 2025; Qi et al., 2020; Sarvaramini et al., 2016; X. Wu et al., 2023; Xiong et al., 2022; X. Yang et al., 2015; Z. Yang et al., 2017; Q. Zheng et al., 2021), et les acides organo-phosphoriques (Azizi et al., 2016; Z. Cao, Wu, et al., 2022; Espirito et al., 2018; H. Fan, Tan, et al., 2021; H. Fan, Yang, et al., 2021; Z. Guo, Tian, et al., 2022; P. Liu et al., 2024; W. Liu et al., 2016, 2018). Les hydroxamates et les acides organo-phosphoriques présentent des affinités plus élevées pour les ETR que les carboxylates. Toutefois, ces hydroxamates sont aussi plus coûteux (Liu et al., 2016), alors que les acides organo-phosphoriques se montrent plus sensibles aux conditions de flottation et ne sont efficaces qu'en milieu acide. Sur le plan économique, les carboxylates constituent donc la meilleure option, grâce à leur coût inférieur. Ces dix dernières années, de nombreux travaux ont porté sur les effets bénéfiques des collecteurs hydroxamates. Par ailleurs, plusieurs solutions alternatives ont été introduites pour accroître l'efficacité de la flottation, notamment l'utilisation des liquides ioniques (Azizi et al., 2016, 2017; Azizi & Larachi, 2018; R. Li et al., 2021), du dodécylsulfate de sodium (Abaka-Wood et al., 2017), du flotigam EDA, du R845N (Kursun et al., 2019), de combinaisons kérosène-acides gras (F. Zhou, Wang, Xu, Liu, & Chi, 2014; F. Zhou, Wang, Xu, Liu, Deng, et al., 2014) ou encore de la combinaison acide octanohydroxamique-oléate de sodium (Y. Xu, Xu, Wu, Tian, et al., 2020; Y. Xu, Xu, Wu, Wang, et al., 2020). La littérature s'accorde sur l'idée que l'approche la plus efficace pour améliorer la récupération et augmenter la teneur en ETR consiste à associer à la collecte une dépression des gangues associées. À cet égard, divers dépresseurs ont été employés parmi lesquels le silicate de sodium (Boulanger et al., 2019; W. Zhang & Honaker, 2017), l'hexafluorosilicate de sodium (Duan et al., 2020), le lignosulfonate (Satur et al., 2016) et le carbonate de sodium (X. Zhang et al., 2013). Par exemple, l'association silicate de sodium-amidon (Abaka-Wood et al., 2018) se révèle efficace pour déprimer la plupart des minéraux de gangue, notamment ceux de type silicate, tandis que le lignosulfonate d'ammonium convient à l'inhibition des minéraux ferrières. Les ions dissous exercent également une influence notable sur la flottation des ETR. Il a été établi que la présence de minéraux de gangue semi-solubles (p. ex. calcite, fluorine, dolomite et barytine) dans la pulpe peut accroître la consommation en collecteurs. La présence inévitable d'ions de métaux alcalino-terreux (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+}) solubles sous forme d'hydroxydes ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 ...) réduit l'adsorption des collecteurs sur la surface des ETR (Z. Cao et al., 2019; Z. Cao, Cheng, et al., 2022; Espirito et al., 2018; Z. Wang, Wu, Xu, Shu, Fang, et al., 2020; Z. Wang, Wu, Yang, Tang, Luo, et al., 2020; X. Zhang et al., 2013), entraînant ainsi une flottabilité moindre. À l'inverse, certains cations métalliques comme Pb^{2+} , La^{3+} , Fe^{3+} et Al^{3+} peuvent améliorer cette flottabilité en favorisant l'activation de surface, créant ainsi plus de sites actifs pour l'adsorption des collecteurs (Geneyton et al., 2020, 2021; Jordens et al., 2016; Q. Zheng et al., 2021). Il convient toutefois ici de souligner que la séparation sélective des ETR par flottation reste peu étudiée. Ce sujet constitue un axe de recherche important pour optimiser les procédés de flottation, en examinant notamment l'influence du choix des tensioactifs, du pH de la solution et des conditions électrolytiques. La littérature est ainsi très riche notamment autour de traitements par flottation de la bastnäsité, de la monazite, et du xénotime.

4.2.2.1.1.5.1 Flottation de la bastnäsité

La bastnäsité, minéral fluorocarbonaté $[\text{ETR}(\text{CO}_3)]\text{F}$, se compose principalement de Ce, La, Pr et Nd (C. K. Gupta & Krishnamurthy, 1992) (Liu et al., 2023). Elle appartient à la catégorie « cérium sélectif », bien que la substitution entre lanthanides rende cette classification imparfaite (Ferron et al., 1991). Au cours des cinquante dernières années, elle s'est imposée comme la principale source d'ETR, surpassant la monazite, surtout grâce aux vastes dépôts de Bayan Obo (Chine) et de Mountain Pass (États-Unis) (C. K. Gupta & Krishnamurthy, 1992). Il est notable que le site de Bayan Obo, développé d'abord comme mine de fer, ne se soit orienté vers la production d'ETR que beaucoup plus tard, les minéraux d'ETR provenant en réalité des résidus du traitement du minerai de fer (C. Wu, 2008). L'enrichissement de la bastnäsité inclut parfois la gravimétrie et la séparation magnétique, mais repose principalement sur la flottation avec des collecteurs spécifiques d'acides carboxyliques, d'acides phosphoriques ou d'hydroxamates (C. Liu et al., 2023; C. Wu, 2008), ainsi que de leurs combinaisons (Y. Xu, Xu, Wu, Tian, et al., 2020; Y. Xu, Xu, Wu, Wang, et al., 2020).

Les acides gras ont longtemps été privilégiés pour la flottation de la bastnäsité à cause de leur disponibilité et de leur usage répandu dans l'industrie minière. Toutefois, ils manquent de sélectivité, exigent une température élevée (souvent $>75^\circ\text{C}$) et nécessitent l'ajout massif de dépresseurs pour obtenir une séparation satisfaisante (Jianzhong et al., 2007). Leur adsorption sur la surface de la bastnäsité est généralement décrite comme une chimisorption, mais uniquement à des pH où la charge de surface du minéral est négative (Pavez et al., 1996). Les hydroxamates, au contraire, forment des complexes chélatés plus stables avec les ETR en surface de la bastnäsité (Pavez et al., 1996; H. Zhou et al., 2023). Cette plus grande stabilité explique, en partie, la meilleure sélectivité de ces collecteurs. Les hydroxamates existant sous deux formes, hydroxyamide ou hydroxyoxime, sachant que seule la forme hydroxyamide interagit solidement avec les cations métalliques (Fuerstenau, 1983). Des études suggèrent aussi que les hydroxamates peuvent former, en solution, des ions métalliques hydroxylés qui se réadsorbent sur la surface de la bastnäsité, créant des sites d'activation supplémentaires. D'une façon générale, les alkyles hydroxamates montrent de meilleures performances que les acides gras vis-à-vis de la bastnäsité, les cations compétiteurs Ca^{2+} et Ba^{2+} présents ne formant pas de complexes aussi stables que les ETR (Espiritu et al., 2018; Pavez et al., 1996).

Concernant le gisement de Mountain Pass, la flottation à température élevée est historiquement utilisée pour accroître la solubilité des acides gras et favoriser l'adsorption sélective du collecteur sur la bastnäsité (Pradip, 1991). Des études portées également sur le gisement de Bayan Obo ont mis en évidence que l'augmentation de la température intensifie le taux d'adsorption du collecteur sur la bastnäsité par rapport à la gangue (calcite, barytine), améliorant la sélectivité (M. Li et al., 2018; Pavez et al., 1996). Cependant, au-delà d'une température optimale (environ 75°C), la quantité de collecteurs adsorbés sur les minéraux de gangue peut également augmenter, ce qui fait baisser la teneur du concentré (Fuerstenau, 1985). La thermodynamique d'adsorption d'hydroxamate sur la bastnäsité, la calcite et la barytine, a été étudiée montrant que la bastnäsité est favorisée quelle que soit la température.

Le silicate de sodium est considéré comme le principal agent dépresseur pour de nombreux minerais, silicatés, minéraux salins (fluorite, calcite, barytine, dolomite) et minerais de fer (Satur et al., 2016; Wen Qi, 1993) (Y. Zhang & Anderson, 2017). Existant sous forme de métasilicate (NaSiO_3 ou $\text{NaSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) et de disilicate ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$), son adsorption sur les complexes hydroxylés de calcium et de baryum (fluorite, barytine, calcite) forme des couches hydrophiles qui favorisent leur précipitation et empêchent la consommation du collecteur par les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} (Chelgani et al., 2015; Marion et al., 2020; J. Wang et al., 2021). De plus, la combinaison d'ions calcium et de silicate de sodium peut générer sur la bastnäsité des complexes hydrophiles Ca-SiO_3 , améliorant l'adsorption de ce dépresseur et masquant les sites actifs

(Z. Cao, Cheng, et al., 2022). Les anions libérés par les gangues renforcent cet effet, tandis que le pH et la concentration de silicate de sodium influencent la nature des complexes (W. Yang, 2008). Par ailleurs, les acides carboxyliques (chaîne <8 carbones) se lient sélectivement aux ions Ca^{2+} et conservent une bonne hydrophilie, notamment les composés de type EDTA, agent complexant puissant, qui forme des complexes Ca-EDTA déprimant efficacement les minéraux alcalino-terreux (ex. fluorite) (Z. Cao et al., 2019). Des réactifs «verts» comme le PESA (acide polyépoxy succinique) ou des mélanges d'acides (oxalique, phtalique, citrique) offrent aussi une sélectivité accrue envers les minéraux de calcium et améliorent la pureté du concentré ((Y. Xu, Xu, Wu, Wang, et al., 2020). Les dépresseurs mixtes créent des effets synergiques comme par exemple le mélange silicate de sodium-fluorosilicate ou le mélange EDTA-silicate de sodium se révèle plus sélectif qu'un seul agent pour la flottation préférentielle des ETR (X. Wu et al., 2023). Des tests comparatifs de différents mélanges EDTA-silicate de sodium, EDTA-acide citrique, EDTA-acide oxalique indiquent que le couple EDTA-silicate de sodium (1:3) est le meilleur compromis entre teneur en ETR (67,4%), récupération (98,27%) et facteur de séparation (23,04) (J. Wang et al., 2021). D'autres dépresseurs incluent la gomme xanthane, sélective pour la calcite (Z. Wang, Wu, Yang, Tang, Luo, et al., 2020), le condensat β -naphthyl sulfonate-formaldéhyde, efficace pour la dolomite (S. Liu et al., 2022), et l'amidon de manioc, favorisant la flottation inversée de la fluorite (D. Shi et al., 2023). Plusieurs études suggèrent que l'optimisation des conditions de pH, de dosage et de combinaison de réactifs permet d'atteindre des taux de récupération et une grande sélectivité, réduisant l'impact environnemental et améliorant la rentabilité. Ces recherches soulignent l'importance de solutions écologiques et de stratégies synergiques pour optimiser la séparation entre gangue et minerais de terres rares.

Même si la flottation s'avère très efficace pour séparer la bastnäsite, elle est souvent intégrée à un schéma plus vaste associant des étapes de pré-concentration (tamisage, gravimétrie, séparation magnétique). En résumé, la flottation de la bastnäsite s'articule autour de plusieurs leviers : le choix du type de collecteur (acides gras, hydroxamates, collecteurs mixtes), la gestion de la température, l'emploi de dépresseurs sélectifs, et l'intégration judicieuse d'opérations unitaires complémentaires. Les recherches actuelles poursuivent l'objectif de réduire les coûts, de limiter l'impact environnemental (en diminuant ou éliminant certains réactifs comme l'hexafluorosilicate de sodium, polluant majeur) tout en améliorant la sélectivité.

4.2.2.1.1.5.2 Flottation de la monazite et du xénotime

La monazite, minéral de phosphate $(\text{REE})\text{PO}_4$, renferme aussi 4—12 % de thorium et une fraction variable d'uranium (Chong et al., 2024). Présente dans de nombreux sables côtiers et placers, elle est extraite *via* des étapes successives de séparation gravimétrique, magnétique, électrostatique et, dans certains cas, par flottation (Ferron et al., 1991a). La xénotime, phosphate d'yttrium YPO_4 , renferme nettement moins de Ce, La, Pr et Nd (Hetherington et al., 2008) (Hetherington et al., 2008). Malgré sa rareté (généralement 0,5—5,0 % de la quantité de monazite), elle fournit d'importants ETR lourds, à l'instar des argiles iono-adsorbées chinoises. Traitée souvent en sous-produit de la monazite, sa valorisation repose sur des techniques analogues (Ferron et al., 1991a).

Ces phosphates de type $(\text{ETR})\text{PO}_4$ se présentent sous forme de grains extrêmement fins, ce qui entrave l'efficacité des techniques de séparation physiques classiques. Dans bien des gisements, environ 60% de la monazite et du xénotime libérés sont inférieurs à 10 μm (seuls quelques gisements, dont les placers, exhibent parfois une fraction plus grossière), ce qui complique significativement leur récupération lors du processus de concentration (T.-W. Cheng et al., 1993). En conséquence, pour des raisons à la fois techniques et économiques, la flottation reste une méthode de choix pour séparer la monazite et le xénotime (T. W. Cheng, 2000). Un des paramètres majeurs qui renseigne sur les mécanismes susceptibles d'influencer la sélectivité lors de la flottation de minéraux présentant des propriétés surfaciques voisines concerne la détermination de la charge de surface des minéraux en fonction du pH. Le point de charge nulle (PZC) et le point isoélectrique (IEP) sont ainsi des paramètres fondamentaux pour éclairer le comportement de la surface dans différents environnements chimiques (X. Zhang et al.,

2013). Dans la littérature, les valeurs d'IEP de la monazite et du xénotime varient sensiblement, en raison de la présence d'impuretés, de la structure cristalline et des conditions expérimentales de préparation des échantillons. La flottation de la monazite a été mise en œuvre à une échelle industrielle depuis 1948 pour en obtenir des concentrés (Chan, 1992). La monazite partage cependant des propriétés de surface très similaires avec d'autres minéraux comme le zircon ou le rutile (Abeidu, 1972), rendant la séparation sélective difficile et nécessitant l'addition de couples collecteurs—dépresseurs appropriés (Pavez & Peres, 1994). Plusieurs travaux rapportent l'emploi de l'oléate de sodium comme collecteur anionique pour flotter la monazite (Z. Chen, 2011; Pavez et al., 1996). Comme dans le cas de la bastnäsité, des analyses par spectroscopie infrarouge ont apporté la preuve d'une chimisorption de ces collecteurs sur les surfaces minérales (Espiritu et al., 2019; Pavez et al., 1996). L'efficacité de l'oléate de sodium dépend étroitement du pH. Au-dessus du PZC de la monazite, la surface se trouve chargée négativement et la chimisorption du collecteur est supposée défavorisée. Alors qu'en milieu alcalin (pH 8,5–9), des espèces cationiques du type $\text{Ce}(\text{OH})^{2+}$ et $\text{La}(\text{OH})^{2+}$ sur la surface favorisent l'interaction avec l'oléate anionique (T.-W. Cheng et al., 1993). Des mesures de force adhésive corroborent ces constats, montrant qu'autour de pH 8, la liaison entre l'oléate et la surface monazitique est suffisamment forte pour surpasser la répulsion électrostatique (Abaka-Wood et al., 2024; Q. Liu et al., 2025).

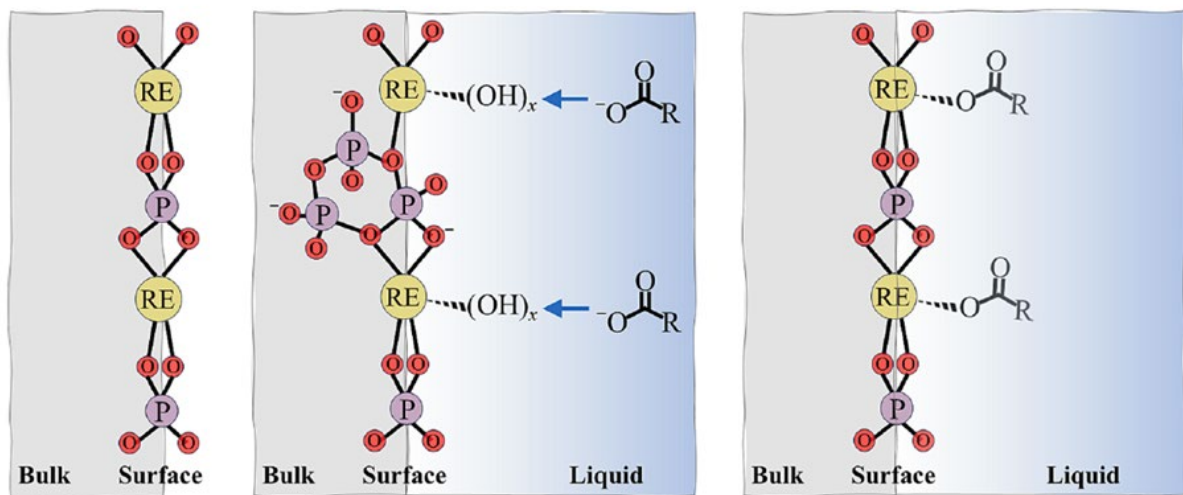


Figure 4.10 Représentation schématique de l'interaction oléate de sodium — monazite. Tirée de (Abaka-Wood et al., 2024). Sous licence CC BY.

Par ailleurs, en deçà du PZC, lorsque le collecteur n'est pas ionisé, un mécanisme d'adsorption plus physique, quoique moins efficace, est susceptible de jouer un rôle. Parallèlement, plusieurs études ont évalué d'autres collecteurs anioniques comme les acintols (Acintol FA1, FA2, FAX), le néofat 140, etc., en constatant que les acintols pouvaient offrir un certain gain sélectif avec des teneurs légèrement supérieures pour un taux de récupération comparable (Chelgani et al., 2015). Des collecteurs cationiques (amines telles que Armac T) ont aussi été utilisés sur des sables noirs de Rosetta (Égypte), mais sans succès.

En raison du faible caractère sélectif des acides gras, différentes équipes se sont penchées sur l'usage d'hydroxamates, démontrant que ces derniers s'avèrent capables d'adsorber fortement les cations d'ETR en surface des minéraux par la formation de complexes métalliques associés (Fuerstenau & Pradip, 2019). Plusieurs travaux ont ainsi souligné l'efficacité supérieure des hydroxamates pour la flottation de la monazite dans une gamme de pH plus large, apportant souvent un meilleur compromis récupération/sélectivité que les acides gras conventionnels, bien que ces derniers puissent conduire à des taux de récupération un peu plus élevés. Les données globales indiquent qu'au-dessus du PZC de la monazite, l'adsorption de l'oléate et celle des hydroxamates adoptent un mécanisme de chimisorption, mais que le premier permet parfois une récupération plus élevée, tandis que les seconds offrent une

meilleure sélectivité (Q. Liu et al., 2025). Outre les collecteurs, le recours à des déprimeurs est souvent impératif pour défavoriser la flottation de minéraux compétiteurs associés présentant des caractéristiques de surface voisines de celles de la monazite. Parmi ces déprimeurs, le metasilicate de sodium (Na_2SiO_3), le sulfure de sodium (Na_2S) et l'oxalate de sodium ont été testés (Pavez & Peres, 1993, Pavez & Peres, 1994, N. Luo et al., 2024). Le Na_2S joue un rôle sélectif pour déprimer le pyrochlore ou le zircon en présence d'acides gras, via l'hydrolyse et la libération d'ions hydrosulfures capables de se lier sélectivement sur ces gangues, sans trop affecter la monazite. De son côté, le silicate de sodium agit couramment comme déprimeur des minéraux non sulfatés (oxydes, silicates), ses produits d'hydrolyse se déposant sur les surfaces de la gangue pour la rendre hydrophile. Dans certaines expérimentations, on a observé que le silicate de sodium pouvait même activer marginalement la surface de la monazite, mais la tendance majeure rapportée par nombre d'auteurs est qu'il ne diminue que peu la flottabilité de la monazite, tout en déprimant fortement zircon, rutile, ilménite et autres phases associées. Pavez & Peres, 1993 ont toutefois constaté dans certaines conditions que la silice en solution ou le Na_2S pouvaient aussi affecter la monazite de manière variable, d'où l'importance de doser finement ces réactifs. Dans l'ensemble, les résultats confirment l'efficacité du silicate de sodium en tant que déprimeur de la gangue dans des systèmes monazite—rutile—zircon—ilménite, surtout couplée à des collecteurs comme l'oléate ou l'hydroxamate (Pavez & Peres, 1994; Wen Qi, 1993). Des essais ont aussi été conduits avec la potasse alum ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) pour déprimer la monazite dans le but de la séparer de la bastnäsité. À pH 5, cette espèce hydrolyse préférentiellement la monazite, la rendant hydrophile, tandis que la bastnäsité conserve une bonne flottabilité (Ren et al., 2000). Au total, l'effet des déprimants classiques (silicate de sodium, sulfure de sodium) apparaît assez limité sur la monazite, mais efficace sur d'autres minéraux, améliorant donc la sélectivité globale de la flottation. La température, lors du conditionnement de la pulpe, peut également influencer sur le comportement de la monazite, bien que la plupart des études se concentrent davantage sur la séparation bastnäsité—monazite. Néanmoins, l'accroissement de température améliore légèrement la cinétique d'interaction bulle-minéral et accroît la récupération de la monazite, quoique des résultats différents aient été rapportés lorsqu'il s'agit de modifications de spéciation du collecteur (à l'exemple de l'acide oléique, moins soluble à plus haute température). En résumé, la température exerce un rôle non négligeable, mais sa contribution demeure parfois complexe à isoler de celle de la concentration en collecteur et du pH (T.-W. Cheng et al., 1994).

Concernant le xénotime, ce minéral apparaît dans un large éventail de formations géologiques (magmatiques, sédimentaires et métamorphiques), et se retrouve souvent en association solide-solide avec la monazite, formant des phases riches en ETR lourds (T.-W. Cheng et al., 1994). La flottation du xénotime s'effectue fréquemment en deux étapes, la première consistant à flotter (ou au contraire à rejeter) la gangue (ilménite, zircon, silicates), permettant d'enrichir en xénotime et monazite, puis la deuxième à séparer spécifiquement le xénotime de la monazite. Les collecteurs anioniques tels que l'oléate de sodium peuvent être utilisés, sachant que le PZC du xénotime se situe vers pH 4 et que la surface devient nettement négative au-delà de pH 3, favorisant ainsi l'attraction chimique avec les espèces oléates (T.-W. Cheng et al., 1994). Fait remarquable, le xénotime a tendance à mieux flotter que la monazite. L'usage d'hydroxamates (ex. Flotinator V3759) a été proposé pour une meilleure sélectivité, puisqu'ils confèrent une charge négative résiduelle plus importante autour du pH du PZC, favorisant une chimisorption (Pereira & Peres, 1997). Pour la séparation spécifique xénotime—monazite, plusieurs collecteurs (par exemple F74286, ou encore des mélanges d'alcools éthoxylés C13—C14) ont démontré une capacité à discriminer l'un de l'autre en jouant sur le pH. À pH 7,5, la monazite est préférentiellement flottée tandis que le xénotime reste dans le résidu. Les collecteurs cationiques (chlorure de dodecylammonium) et anioniques (sodium dodecyl sulfate) ont aussi été comparés pour le xénotime et la monazite, mettant en évidence des fenêtres de pH plus larges pour l'adsorption du collecteur cationique (Chelgani et al., 2015). Par ailleurs, le rôle de déprimeur (silicate de sodium, fluorosilicate de sodium, lignine sulfonate, amidon) a été étudié afin de discriminer des phases comme le zircon ou le rutile tout en préservant le xénotime. Là encore, le silicate de sodium se montre relativement efficace pour déprimer la gangue tout en perturbant peu la récupération du xénotime, contrairement à d'autres déprimants plus agressifs (Pereira & Peres, 1997). Enfin, la température a un effet parfois paradoxal sur

le xénotime. D'une part, la cinétique d'interaction peut diminuer avec la hausse de la température, mais, d'autre part, la spéciation du collecteur se modifie, et sa solubilité peut chuter, impliquant parfois une baisse effective de la récupération globale.

En conclusion, la séparation par flottation d'ETR comme la monazite et le xénotime est un procédé extrêmement complexe, dépendant à la fois de la chimie de surface, des interactions électrostatiques ou chimiques avec le collecteur, de la présence de dépresseurs, de la température et de la granulométrie (seuil de libération). La bibliographie existante indique que la compréhension fine du point de charge nulle (PZC) est cruciale pour optimiser la sélectivité. Dans le cas de la monazite, le PZC se situe autour de pH 5,5, tandis que celui du xénotime peut être légèrement plus acide (vers pH 4–5). Les collecteurs anioniques tels que l'oléate de sodium sont généralement très efficaces en milieu légèrement alcalin (pH 7–9) pour flotter la monazite et le xénotime, avec une adsorption de nature chimique. Les hydroxamates, quant à eux, offrent souvent une meilleure sélectivité, bien qu'ils puissent être un peu moins performants pour la récupération maximale. Le silicate de sodium et le sulfure de sodium figurent parmi les déprimants clés utilisés pour rendre hydrophiles divers minéraux accessoires (zircon, rutile, ilménite), sans trop affecter les ETR. Enfin, la température et la granulométrie, qui conditionne la libération, viennent s'ajouter comme paramètres à fort impact sur l'efficacité du procédé. La séparation sélective du xénotime et de la monazite, particulièrement importante pour valoriser les ETR lourds, peut être réalisée en jouant sur leurs différences de PZC et en contrôlant l'interaction électrostatique collecteur-surface : ainsi, à pH 7,5–8, la monazite aurait tendance à flotter plus aisément, laissant le xénotime dans le concentré final ou dans le résidu selon l'approche recherchée. Dans la pratique, une ingénierie du schéma de flottation s'avère essentielle pour assurer la sélectivité, la pureté et la rentabilité du procédé, compte tenu des multiples variables influençant le comportement de ces minéraux en pulpe. La littérature compilée souligne l'importance de poursuivre les recherches, en particulier sur la flottation de la monazite et du xénotime, afin de mieux maîtriser les mécanismes d'adsorption des collecteurs, d'identifier de nouveaux réactifs plus sélectifs et moins sensibles aux variations de température ou de conditions de pH, et de définir des stratégies complètes de séparation capables de s'adapter aux minéralisations complexes typiques des gisements d'ETR, car ces derniers sont souvent associés à de fines granulométries et à des assemblages minéralogiques variés.

4.2.2.1.1.6 Résumé et conclusion

En résumé, les ETR, métaux critiques disséminés dans des minerais complexes (carbonates, phosphates, silicates), exigent des schémas de prétraitement combinant enrichissement physique, pyrométallurgie et hydrométallurgie. Dix-sept articles de rang 1 publiés depuis 2015, dont trois articles de revues (S. Cheng et al., 2024, Chelgani et al., 2015 ; Cen et al., 2021), mettent en évidence que la nature du gisement pilote la sélection des procédés (roches carbonatitiques (bastnäsite, monazite) et alcalines (eudialyte, loparite)), tandis que placers et argiles iono-adsorbées, pouvant atteindre 60 % d'oxydes d'ETR lourds, sont directement lixiviables, et une quinzaine d'études régionales (Goodenough et al., 2016; Marion et al., 2023) citent la péninsule Scandinave, Kola, le sud du Groenland et les massifs alcalins d'Europe centrale comme secteurs européens prometteurs. L'enchaînement « pré-concentration, séparation physique, flottation » demeure la voie industrielle de référence, mais chaque étape présente des verrous. La gravimétrie, selon six articles (Falconer, 2003; Ferron et al., 1991a; C. Gupta & Krishnamurthy, 2005), exploite la densité élevée des minéraux d'ETR ($\rho = 4\text{--}7$) pour atteindre 80–90 % de minéraux lourds dans les sables côtiers, bien que barytine ou ultrafines $< 5\text{ }\mu\text{m}$ puissent provoquer jusqu'à 15 % de pertes, lesquelles tombent à $< 5\text{ }\%$ grâce aux concentrateurs centrifuges continus Knelson CVD sur des flux à 50 % de lourds (Q. Chen et al., 2020). Le déschlammage, d'après cinq publications clés, recourt à un traitement micro-ondes 5 kW/540 °C qui réduit la fraction $< 5\text{ }\mu\text{m}$ de 43 % à 19 % et améliore la récupération de 10 points (Chistov et al., 1995). La séparation magnétique, documentée par onze travaux (2018-2024), montre qu'un couplage gravité + LIMS/HIMS récupère 55–85 % de bastnäsite à Maoniuping ou Nechalacho (Hou et al., 2024; Marion et al., 2023). L'électrostatique, selon trois études

de référence (dont Higashiyama & Asano, 1998), distingue le xénotime non conducteur de l'ilménite conductrice mais implique un séchage coûteux (> 90 % d'eau retirée). Enfin, la flottation par mousse constitue le goulet d'étranglement technologique, trente-deux études (2020-2024) montrant qu'elle porte la teneur en ETR au-delà de 60 % avec des récupérations de 80—98 %, les carboxylates restant les collecteurs économiquement les plus concurrentiels tandis que dix-huit publications démontrent la supériorité sélective des hydroxamates et acides organo-phosphoriques (C. Liu et al., 2023), les premiers gagnant 3 à 5 points de teneur mais coûtant 2 à 3 fois plus, les seconds exigeant de contrôler un pH < 4. L'expérience de Mountain Pass (Pradip & Fuerstenau, 1991) et cinq études récentes confirment qu'un conditionnement à 75 °C maximise l'adsorption sélective des acides gras, la sélectivité décroissant au-delà. Douze travaux (2019-2024) dont J. Wang et al., (2021) identifient le couple silicate de sodium-EDTA comme optimum (teneur 67 %, récupération 98 %, facteur de séparation 23), tandis que des dépresseurs « verts » (PESA, acides citriques/oxaliques) offrent des performances similaires avec 30 % de toxicité en moins. Quatre revues (dont Chelgani et al., 2015) rappellent que le point de charge nulle gouverne la sélectivité bastnäsite-monazite-xénotime (PZC $\approx$ 5,5 pour la monazite, 4,5 pour le xénotime), la monazite flottant préférentiellement à pH 7,5, l'inverse se produisant à pH 4 avec des hydroxamate (Pereira & Peres, 1997). Côté performances globales, un schéma « gravité + HIMS + flottation hydroxamate » donne des concentrés à 62 % d'équivalent oxydes d'ETR avec 85 % de récupération sur la bastnäsite de Bayan Obo (Fangji, L., Xinglan, Z., 2003, *Journal of Shanghai Polytechnic University* 1, 10—16 (en chinois), cité par Jordens et al., 2013) et des collecteurs mixtes alkyle-hydroxamate/oléate atteignent 98 % de récupération en laboratoire (Y. Xu, Xu, Wu, Wang, et al., 2020).

En conclusion, la littérature scientifique converge pour indiquer que l'extraction des ETR repose sur un ajustement fin entre la minéralogie du gisement (carbonatites, roches alcalines, placers ou argiles iono-adsorbées) et une séquence de procédés qui combine enrichissement physique (gravité, magnétique, électrostatique, flottation). Ainsi, les études fondatrices sur la séparation gravimétrique (Ferron et al., 1991a) et les travaux de référence récents sur l'hydrométallurgie (S. Cheng et al., 2024) confirment qu'aucune opération unique ne suffit à garantir à la fois rendement métallurgique et maîtrise des résidus radioactifs ou fluorés. Les articles de synthèse identifient en outre un frein réglementaire majeur en Europe, où la péninsule Scandinave, la Kola, le sud du Groenland et plusieurs massifs alcalins restent sous-exploités malgré leur potentiel (Goodenough et al., 2016). Les approches classiques, telles que la flottation couplée à la gravité, démontrent leur robustesse, mais une douzaine de travaux publiés entre 2020 et 2023 montrent que l'ajout de prétraitements micro-ondes, l'emploi de collecteurs et de dépresseurs « verts » ou la récupération de sous-produits (CaF_2 , Na_3PO_4) peut réduire de 20 à 40 % la charge réactive et les émissions associées. Finalement, l'ensemble des données apporte des arguments en faveur d'une optimisation intégrée « ressource—procédé—environnement », fondée sur l'hydrométallurgie circulaire (Binnemans & Jones, 2023) et le recyclage interne des réactifs, afin de concilier sécurisation stratégique de l'approvisionnement en ETR et exigences sociétales de durabilité.

4.2.2.1.2 Métallurgie pour l'extraction et la purification des ETR

4.2.2.1.2.1 Techniques métallurgiques selon le minéral

Cette section présente les principales approches métallurgiques développées pour les minerais majeurs de terres rares, notamment la bastnäsite, le xénotime, la monazite et les argiles ioniques. Quelques travaux existent également sur des gisements moins conventionnels tels que des nodules polymétalliques (Mohwinkel et al., 2014 ; Parhi et al., 2015 ; Marino et al., 2019) ou même sur l'extraction d'ETR directement à partir d'eau de mer (Diallo et al., 2015), mais ils ne seront pas abordés en détail dans ce rapport du fait des nombreuses incertitudes autour de tels gisements.

4.2.2.1.2.1.1 Techniques métallurgiques pour la bastnäsité

Le procédé classique pour traiter un concentré pur de bastnäsité combine classiquement au départ une étape de grillage oxydant, suivie d'une lixiviation acide à l'HCl et d'une conversion caustique (X.-W. Huang et al., 2015; L. Wang et al., 2017). Plus précisément, des études de référence décrivent que vers 700 °C, la bastnäsité se décompose et génère notamment du CeO_2 et du CeF_3 (L. Zhao et al., 2018). Après grillage, une lixiviation à HCl dilué libère les ETR sous forme de chlorures d'ETR non cériques ETRCl_3 , tandis que les composés peu solubles (CeO_2 et ETRF_3) restent dans le résidu. Une conversion caustique (NaOH) transforme CeO_2 et ETRF_3 en hydroxydes RE(OH)_3 , suivie de l'addition d'HCl et d'un agent réducteur qui produit une solution de ETRCl_3 plus riche en cérium. Finalement, on obtient des oxydes d'ETR de grande pureté par neutralisation, extraction par solvant, précipitation et calcination. Bien qu'industrialisé, ce procédé, coûteux en acides et en bases, génère d'importants rejets aqueux et gazeux fluorés toxiques. Pour renforcer l'efficacité et la durabilité du procédé, plusieurs voies alternatives ont été abordées. Chi et al. (R Chi et al., 2006) ont par exemple développé un procédé de double lixiviation à HCl après un grillage en présence de Na_2CO_3 , favorisant la conversion de la bastnäsité en CeO_2 . Une première lixiviation à l'HCl dilué permet d'obtenir un résidu riche en CeO_2 , puis une seconde lixiviation (HCl concentré + H_2O_2) conduit à une solution de CeCl_3 . Parallèlement, un procédé combinant valorisation et métallurgie *via* une calcination avec Ca(OH)_2 , formant à la fois des oxydes d'ETR et du CaF_2 , permet de réduire les émissions fluorées pouvant être récupérées comme fluorine (Cen et al., 2020). Par ailleurs, un grillage au chlorure d'ammonium NH_4Cl suivi d'une lixiviation à l'eau chaude se heurte néanmoins à la présence de fluorures ETRF_3 insolubles, responsable d'importantes pertes d'ETR (G. Zhu et al., 2003). Pour remédier à cet inconvénient, Chi et al. (Chi et al., 2004) proposent d'ajouter du MgO avant le grillage chloré, puis d'effectuer un second grillage au NH_4Cl . Cette approche « désactive » le fluor et augmente notablement la récupération et la pureté des oxydes $(\text{ETR})_2\text{O}_3$.

4.2.2.1.2.1.2 Techniques métallurgiques pour la monazite

Deux grandes filières de traitement de la monazite existent, la voie acide (attaque par H_2SO_4) et la voie alcaline (NaOH).

Dans le procédé traditionnel, la monazite est grillée dans l'acide sulfurique concentré, puis lixiviée à l'eau pure (E. Kim & Osseo-Asare, 2012). Cela entraîne la formation de sulfates d'ETR $((\text{ETR})_2(\text{SO}_4)_3)$ et de sulfate de thorium $(\text{Th}(\text{SO}_4)_2)$, séparés par précipitation à l'aide de différents réactifs NaOH, acide oxalique, carbonate de sodium, ammoniac (Kumari et al., 2015) et éventuellement purifiés par extraction par solvant ou échange d'ions pour isoler le thorium. Demol et al. (Demol et al., 2022) (Demol et al., 2019) ont mis en évidence qu'un grillage à 250 °C permettait une dissolution presque complètement des ETR et de Th, tandis que l'apparition de pyrophosphate de thorium à 300 °C réduisait fortement la récupération du Th. Kim et al. (W. Kim et al., 2009) ont, quant à eux, démontré l'utilité d'un prétraitement mécano-chimique (mélange monazite-NaOH broyé), facilitant la dissolution dans H_2SO_4 . Néanmoins, la corrosion des installations et l'absence de valorisation du phosphore demeurent des freins.

La décomposition à la soude caustique, de son côté, permet de récupérer le phosphore comme sous-produit valorisable (Kumari et al., 2015; R. Panda et al., 2014). En chauffant la monazite à 140-160 °C dans une solution de NaOH, Na_3PO_4 , ETR(OH)_3 et Th(OH)_4 sont produits. Le solide filtré et lavé est ensuite traité par HCl, produisant une solution de chlorures ETRCl_3 et ThCl_4 (Sadri et al., 2017). En ajustant le pH à 4-5, le thorium précipite sous forme d'hydroxyde, laissant les ETR dans la solution, qui sont ensuite récupérées par extraction pour former des oxydes. Les résidus radioactifs posent néanmoins des problèmes, et l'absence de marché significatif pour le Thorium complique sa valorisation. Abdel Rehim (Abdel-Rehim, 2002) a intensifié le procédé en broyant simultanément la monazite et la soude dans un autoclave, améliorant la lixiviation. Galvin et Safarzadeh (Galvin & Safarzadeh, 2018) ont remplacé NaOH par KOH pour produire un triphosphate de potassium, plus rentable, mais la température de grillage optimale (210 °C) est plus élevée.

4.2.2.1.2.1.3 Techniques métallurgiques pour les concentrés mixtes de bastnäsité et de monazite

Dans certains dépôts, comme celui de Bayan Obo, le concentré d'ETR contient à la fois de la bastnäsité et de la monazite. Historiquement, un grillage à l'acide sulfurique (en dessous de 300 °C) était appliqué suivi d'une lixiviation à l'eau, de précipitations par formation de sels doubles, d'une transformation alcaline et d'une lixiviation sélective à l'HCl. Ce schéma, conçu dans les années 1970, présente toutefois l'inconvénient d'un faible rendement en ETR, de multiples opérations solide-liquide et de rejets liquides conséquents (Demol et al., 2019). Aujourd'hui, la majorité (90%) des concentrés de Bayan Obo sont traités par un grillage sulfurique à plus haute température (> 300 °C). Après grillage, la lixiviation à l'eau et la neutralisation donnent une solution de $(\text{ETR})_2(\text{SO}_4)_3$, à partir de laquelle on peut isoler les ETR par extraction ou précipitation (Demol et al., 2019; X.-W. Huang et al., 2015; Cen, Bian, Liu, et al., 2021). Ce procédé, bien établi, offre une bonne récupération et laisse le thorium dans les résidus, préservant la qualité des produits. Il n'en demeure pas moins qu'il faut gérer les gaz libérés (SO_2 , H_2) et stocker des déchets radioactifs. Certaines recherches se penchent sur la possibilité d'un grillage à moins de 300 °C pour solubiliser le thorium et le séparer des ETR par extraction. Par exemple, Lu et al. ont mis au point un extractant (2-ethylhexyl phosphorodiamidate) pour isoler efficacement le Th en milieu nitrique (Y. Lu et al., 2016), tandis que Dong et al. explorent des extractants organophosphorés neutres comme le n-octyl phosphate diphenyl (Dong et al., 2017).

D'autres approches misent sur la décomposition caustique suivie d'une lixiviation à l'HCl. Dans ce scénario, NaOH convertit la bastnäsité et la monazite en hydroxydes $\text{ETR}(\text{OH})_3$, offrant une voie de traitement plus « propre ». Cependant, la faible teneur en ETR du concentré, le prix élevé de la soude caustique et les volumes d'effluents limitent son adoption à grande échelle. Li et al. suggèrent de recourir à un grillage au NaOH solide à 550 °C, tirant profit du carbonate de sodium Na_2CO_3 produit pour accroître la formation d'oxydes $(\text{ETR})_2\text{O}_3$ (M. Li et al., 2020). De même, mélanger NaOH et $\text{Al}(\text{OH})_3$ lors du grillage génère de la cryolithe (Na_3AlF_6), exploitable pour la production d'aluminium (J. Li et al., 2020).

4.2.2.1.2.1.4 Techniques métallurgiques pour les minerais argileux

Il existe enfin un autre type de dépôt, dit adsorption ionique, où les ETR sont adsorbés sur des argiles. Découverts en 1969, ces gisements sont inadaptés aux méthodes de séparation classiques. Différents procédés de lixiviation ont donc été développés, en bassins, en tas, puis *in situ*. Grâce à sa simplicité opérationnelle et à l'absence de travaux d'excavation, la lixiviation *in situ* (ISL) est devenue la méthode prédominante pour l'extraction des ETR dans ces gisements. Cette technique, similaire à la lixiviation en tas et en bassin, consiste à extraire le minerai et à le disposer de manière à permettre la circulation des solutions de lixiviation. Ces gisements sont exploités à ciel ouvert, éliminant le besoin de concentration préalable du minerai, car les régolithes sont en surface et la lixiviation se fait sur place. Historiquement, NaCl était utilisé comme agent de lixiviation suivi d'une précipitation à l'acide oxalique, mais les eaux de rejet saturées en sel provoquaient une salinisation des sols importante. L'industrie privilégie à présent une lixiviation *in situ* par des solutions de sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, suivi d'une précipitation au carbonate d'ammonium NH_4HCO_3 pour obtenir un concentré titrant plus de 90% en équivalent oxydes (X. Luo et al., 2022). Or, la lixiviation *in situ* peut entraîner des fuites et une pollution notable en ammonium (Moldoveanu & Papangelakis, 2013). Dans le but de réduire cette pollution, des solutions alternatives ont été étudiées. Le MgSO_4 peut remplacer $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ avec un rendement similaire, tout en limitant la lixiviation de l'aluminium (Xiao et al., 2015). Toutefois, un excès de magnésium échangeable pouvant nuire à l'environnement, diverses combinaisons (MgSO_4 , NH_4Cl , CaCl_2) ont été examinées (Yanfei et al., 2016), relevant qu'un ratio (15:25:60) offrait plus de 94% de récupération d'ETR sans compromettre la flore environnante. Fuguo et al. (Fuguo et al., 2018) ont testé un mélange MgSO_4 -acide ascorbique renforçant l'efficacité de lixiviation des complexes formés et réduisant la consommation de MgSO_4 . Après cette étape de lixiviation, les impuretés (Al^{3+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , Si^{4+}) présentes dans le lixiviat sont éliminées par neutralisation et précipitation au bicarbonate de sodium ou au carbonate d'ammonium à pH 4-5. La récupération des ETR en solution par addition d'acide oxalique et précipitation était autrefois la norme,

mais l'usage du bicarbonate d'ammonium (NH_4HCO_3) s'est ensuite imposé pour son faible coût et son efficacité. Néanmoins, il engendre une pollution azotée notable en cas d'utilisation massive. Des procédés dépourvus d'ammonium suscitent donc l'intérêt, tels que la précipitation au MgO (L. Huang et al., 2019) avec un rendement supérieur à 99%, mais une pureté moyenne d'environ 86%, ou encore la voie $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, permettant de réutiliser la solution filtrée pour régénérer du bicarbonate de magnésium (Z. Yu et al., 2020).

Des préoccupations subsistent cependant quant à l'intégrité mécanique des sols après lixiviation intensive (H. Wang et al., 2023). L'exploitation minière entraîne des dommages directs au sol et à la végétation, rendant nécessaire la remise en état. Le suivi de l'évolution de ces terrains est souvent obtenu par imagerie satellite (Hengkai et al., 2020) et des modèles numériques sont développés (F. Wu et al., 2023), pour mieux comprendre et anticiper les changements physicochimiques au sein des gisements lors de la lixiviation *in situ*.

4.2.2.1.2.1.5 Résumé et conclusion

En résumé, les procédés métallurgiques actuels pour extraire les ETR couvrent principalement quatre familles de gisements, la bastnäsité fluorocarbonatée, la monazite phosphate, les concentrés mixtes bastnäsité-monazite et les minerais argileux. Pour la bastnäsité, six publications de rang 1 montrent qu'un schéma classique « grillage oxydant à 700 °C, lixiviation HCl , et conversion caustique NaOH » libère d'abord un mélange $\text{CeO}_2/\text{CeF}_3$, converti en hydroxydes $\text{ETR}(\text{OH})_3$, et produit in fine des chlorures d'ETR (ETRCl_3) ultérieurement traités pour l'obtention d'oxydes de bonne pureté (X.-W. Huang et al., 2015 ; Cen, Bian, Wu, et al., 2021; Cen, Bian, Liu, et al., 2021). Des approches alternatives par double lixiviation à HCl après grillage avec Na_2CO_3 , ou grillage $\text{NH}_4\text{Cl}+\text{MgO}$, réduisent jusqu'à 30 % les pertes d'ETR et la toxicité des rejets fluorée (Chi et al., 2004). Pour la monazite, huit études identifient deux filières, la voie acide à H_2SO_4 (grillage 250 °C, dissolution complète des ETR et du Th, mais corrosion élevée) et voie alcaline par NaOH à 160 °C, qui récupère en plus le phosphore sous forme de Na_3PO_4 (Kumari et al., 2015). La mécano-chimie ou l'usage de KOH améliorent la cinétique de dissolution mais nécessite une température plus élevée 20 (Galvin et al., 2018). Les concentrés mixtes de Bayan Obo, sont désormais traités à des températures > 300 °C par grillage sulfurique. Une dizaine de travaux montrent des récupérations > 90 % tout en laissant le thorium dans les résidus solides (Cen, Bian, Liu, et al., 2021). Enfin, pour les argiles ioniques, une douzaine de travaux entre 2013 et 2023 révèlent que la lixiviation *in situ* au $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ en solution dans l'eau suivi d'une précipitation par NH_4HCO_3 atteint 90 % d'oxydes, mais la pollution en sulfate d'ammonium incite à tester d'autres réactifs comme MgSO_4 ou des cocktails $\text{MgSO}_4\text{—NH}_4\text{Cl—CaCl}_2$ (récupération ≥ 94 %) et même un procédé MgO qui porte la pureté à 86 % avec un rendement de 99 % (X. Luo et al., 2022). La littérature converge donc sur la nécessité d'optimiser les séquences de grillage et de lixiviation pour réduire les réactifs, recycler les fluorures et limiter les rejets radioactifs, un sujet encore très prospectif malgré ces avancées.

En conclusion, les travaux dédiés aux procédés métallurgiques des concentrés d'ETR montrent qu'au-delà des variantes (grillage oxydant ou chloré, voies acide ou alcaline, lixiviation *in situ* des argiles...), le choix de la séquence optimale dépend avant tout de la minéralogie initiale et des contraintes environnementales. Les articles de référence sur la bastnäsité et la monazite (Cen, Bian, Liu, et al., 2021; Demol et al., 2019) soulignent qu'un compromis doit être trouvé entre rendement métallurgique, consommation de réactifs et gestion des effluents fluorés ou radioactifs, tandis qu'une douzaine de travaux centrés sur les argiles iono-adsorbées depuis 2013 indiquent que les solutions classiques à base de sulfate d'ammonium, bien que performantes, nécessitent aujourd'hui des alternatives à plus faible impact environnemental (X. Luo et al., 2022), comme l'utilisation de sulfate de magnésium (Xiao et al., 2015) ou de ses combinaisons avec de l'acide ascorbique ou un mélange de Chlorure d'ammonium et de chlorure de calcium. Les approches classiques comme le grillage sulfurique haute température

restent robustes, mais les études récentes montrent qu'une intégration de collectes de sous-produits (CaF_2 , Na_3PO_4 , cryolithe...) et le recyclage en boucle des acides ou des bases peuvent réduire de 20 à 40 % la charge chimique globale. Finalement, l'ensemble des données apporte des arguments en faveur d'une optimisation systémique « mine-procédé-environnement », combinant valorisation des co-produits et hydrométallurgie circulaire, afin d'assurer la durabilité économique et écologique de l'approvisionnement européen en ETR.

4.2.2.1.2.2 Extraction par des procédés classiques

Actuellement, les méthodes de séparation et de purification des ETR comprennent principalement la cristallisation et la précipitation fractionnées, l'échange d'ions, la chromatographie sur résine extractante, l'extraction par solvant, les membranes liquides et les procédés redox (voir par exemple Alemrajabi et al., 2022; Masmoudi-Soussi et al., 2020; İnan et al., 2018; X. He et al., 2014)

Jusqu'aux années 1960, la séparation des ETR et de leurs oxydes aux États-Unis, au Royaume-Uni, en URSS et en France privilégiait l'échange d'ions par colonne suivi d'une élution chromatographique. Ces installations répondaient à la demande alors faible en ETR et assuraient une pureté convenable pour des usages tels que les pierres à briquet, le polissage du verre ou encore la catalyse. Toutefois, à partir des années 1960, cette approche a cédé la place à l'extraction liquide-liquide (ELL), pour satisfaire notamment la demande croissante en Y et Eu (employés dans les luminophores rouges des tubes cathodiques) et en Sm, Nd, Dy, Tb et Pr (nécessaires aux aimants permanents de haute performance). L'extraction par solvant, plus simple et plus efficace, s'est alors imposée mondialement, sachant par ailleurs qu'une usine de production d'ETR par ELL peut comporter plus de 1500 étages (extraction, lavage, re-extraction). Industriellement, la phase organique doit répondre à des exigences strictes, notamment en termes d'immiscibilité avec l'eau, de faible tension de vapeur, d'inflammabilité réduite (point d'éclair élevé), de toxicité minimale et de coût raisonnable. Elle se compose majoritairement d'un distillat pétrolier (type kérosène), et d'agent extractant, par exemple un acide phosphonique (tel que le P 507, $(\text{C}_8\text{H}_{17})_2\text{PO}_3\text{H}$ largement utilisé), qui représente 3 à 10 % du volume. Cet agent extractant, onéreux, fonctionne comme un échangeur cationique. Les schémas de séparation à base de P 507 exigent habituellement de dissoudre le concentré mixte d'ETR dans de l'acide chlorhydrique (HCl), qui est également utilisé pour l'étape de réextraction et de lavage. L'ajustement de l'acidité s'effectue via une base (soude), formant une saumure de NaCl, principal effluent de raffinerie. Le chlorure de sodium étant très difficile à éliminer des eaux souterraines, divers couples agents extractants/réactifs de réextraction font constamment l'objet d'études pour atténuer les problèmes de gestion des effluents. Après extraction par solvant, le mélange semi-purifié d'ETR peut être précipité sous forme de carbonates ou d'oxalates. La pratique dominante consiste à précipiter les ETR par l'acide oxalique ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$), générant des oxalates d'ETR qui, calcinés vers 900 °C, donnent les oxydes mixtes d'ETR. Si la séparation métallurgique est rendue complexe par la similarité chimique des ETR, le raffinage ultérieur bénéficie au contraire de la diversité de leurs propriétés physiques. Les terres rares réduites en métaux par électrolyse en milieu sels fondus ou par voie électrothermique (> 1000 °C) n'atteignent initialement que 98—99 % de pureté. Dans des applications critiques, on peut rechercher une pureté supérieure, jusqu'à 99,99 % de pureté. Pour les productions industrielles, le raffinage doit concilier la forme du produit, le rendement métallique, la taille des lots, la simplicité opérationnelle et la rentabilité. En recherche-développement, on recherche une pureté encore plus élevée via des traitements sous vide, la distillation ou sublimation sous vide et l'électro-transport. Ces méthodes, connues de longue date, continuent d'évoluer pour répondre à la forte demande d'ETR ultra-purs, impliquant une automatisation accrue et une sélectivité améliorée.

Les opérations actuelles d'extraction et de raffinage affichent des rendements entre 50 et 80 % du minerai jusqu'aux composés d'ETR de haute pureté. Ces résultats reflètent un compromis entre la valeur intrinsèque plutôt faible de la ressource géologique et les coûts de transformation. L'histoire du traitement des minerais d'ETR se caractérise par quelques percées majeures comme l'ELL et des perfectionnements

progressifs. Aujourd'hui, de nouvelles pistes se dessinent avec des réactifs plus sélectifs, des dispositifs de concentration plus efficaces et l'intégration globale des schémas de traitement. Les progrès récents se limitent souvent à des améliorations marginales issues de réactifs ou d'extractants plus performants, mais de nouvelles voies d'optimisation émergent grâce à la séparation ionique ou moléculaire par membranes, via des contacteurs à fibres creuses, des membranes liquides en émulsion ou des technologies de reconnaissance moléculaire (MRT). Parmi d'autres exemples figurent l'extraction assistée électriquement (Maes et al., 2017), l'extraction par transition de phase ou via des solvants « modulables » (Sinclair et al., 2017), les liquides ioniques (K. Wang & Luo, 2017), les solvants eutectiques profonds (W. Chen et al., 2019; Entezari-Zarandi & Larachi, 2019) et l'extraction miniaturisée (K. Wang & Luo, 2017).

Afin de développer des procédés d'extraction liquide/liquide économiquement viables et industrialisables, de nombreuses études de R&D ont été menées pour l'extraction des ETR à partir de lixiviats, en utilisant diverses formulations d'extractants purs ou solubilisés dans différents diluants définis en fonction de la nature du milieu d'extraction et de sa composition.

Il existe trois principales catégories d'extractants utilisés (Merroune et al., 2024) :

1. les extractants acides, qui comprennent des composés tels que les acides carboxyliques et les acides organophosphorés, ainsi que des acides chélatants tels que les hydroxyoximes, la 8-hydroxyquinoléine et les β -dicétones ;
2. les extractants basiques, composés d'espèces alkylammonium ;
3. les extractants solvatant, composés neutres comme les malonamides, ou dicétones ou les oxides d'alkylphosphines disposant d'hétéroatomes pour le transfert d'espèces cationique par interaction ion-dipole.

Les extractants organiques idéaux doivent maintenir un pH constant, être chimiquement stables, sélectifs pour les métaux ciblés, économiques et éco-compatibles. Ces extractants sont en outre classés en quatre sous-catégories : échangeurs cationiques, échangeurs anioniques, agents chélatants, et extractants solvants (neutres).

Dans le procédé ELL, la séparation et la purification des ETR sont très souvent abordées à partir de solutions synthétiques acides ou alcalines contenant des ions compétiteurs telles que Ca^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} ou Pb^{2+} . Les ETR sont généralement séparés par extractions multi-étages en mode contre-courant dans des mélangeurs-décanteurs, procédé souvent long et fastidieux. Si la littérature parue ces dernières années se concentre sur la recherche d'extractants toujours plus affins et sélectifs afin de réduire ce nombre d'étages, les extractants les plus étudiés tels que l'acide naphtéinique, l'acide phosphorique di-(2-éthylhexyle) (D2EHPA), l'acide phosphonique 2-éthylhexyle monoester de 2-éthylhexyle (PC 88A, Ionquest 801), l'acide versatique, le chlorure d'ammonium méthyle trialkyle (Aliquat 336), l'acide phosphinique bis(2,4,4-triméthylpentyle) (Cyanex 272), le phosphate de tributyle (TBP), etc., sont utilisés seuls ou plus efficacement en mélange (S. Ilyas et al., 2024) pour l'extraction des ETR dans diverses industries (cf. Figure 4.11).

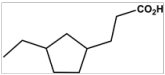
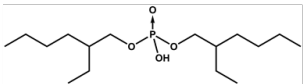
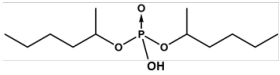
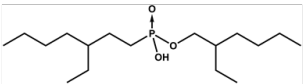
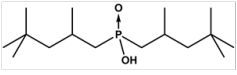
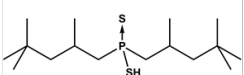
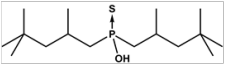
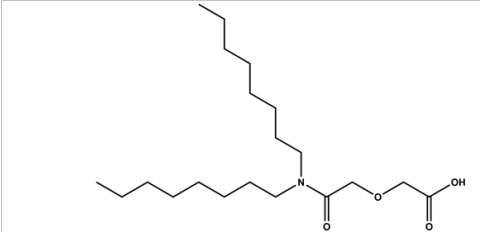
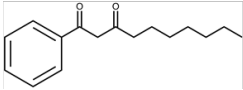
D'après un grand nombre de publications parues dans diverses revues et actes de conférences (Manis Kumar Jha et al., 2016; Merroune et al., 2024; Thakur, 2000b), les propriétés d'extraction et de séparation, le facteur de séparation, la sélectivité, la cinétique mais aussi l'influence du diluent de la température, des concentrations en éléments ou en ligand sont autant de paramètres influençant l'extraction qui sont abordés par les différentes études, avec des approches basées initialement sur la nature des milieux de dissolution.

4.2.2.1.2.2.1 Les extractants cationiques

Les extractants cationiques contiennent des atomes d'hydrogène ionisables pouvant être remplacés par des ions d'ETR, formant ainsi des espèces neutres (T. Liu & Chen, 2021). Les extractants acides, tels que

4.2 L'existence de procédés innovants, environnementalement plus respectueux

les acides organophosphorés, les acides glycolamides ou les acides carboxyliques, sont efficaces pour extraire les cations en les échangeant contre des protons. Ces extractants présentent une efficacité d'extraction supérieure à celle des extractants anioniques et solvantant (F. Xie et al., 2014) au pH peu acide.

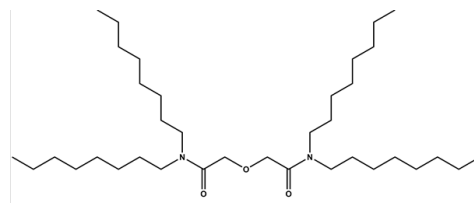
Classe d'extractant	Type d'extractant	Nom	Structure
Échangeur cationique	Acides carboxylique	Naphthénique	
		Versatique	
	Acide organophosphorique	Phosphorique : (D2EHPA ou HDEHP)	
		P350	
		Phosphonique (P507 ou PC88A)	
		Phosphinique (Cyanex 272)	
		Dithiophosphonique (Cyanex 302)	
		monothioPposphinique (Cyanex 301)	
	Acide glycolamique	DODGAA	
Agent chélatant	β-dicétone	LIX-54	

4.2 L'existence de procédés innovants, environnementalement plus respectueux

extractant solvantant

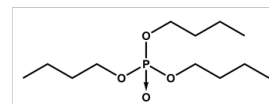
Diamide

TODGA

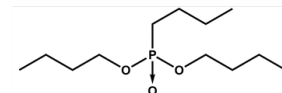


Ester phosphorique

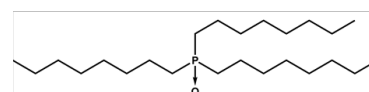
TBP



DBBP



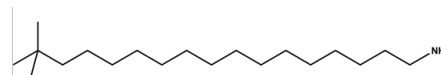
TOPO



Échangeur anionique

Amine primaire

Primène JMT



Ammonium quaternaire

Aliquot 336

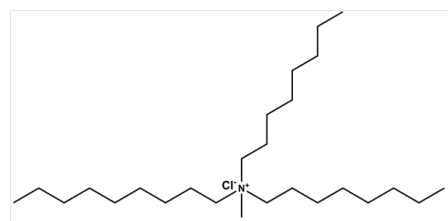
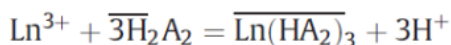


Figure 4.11 Ligands industriels utilisés pour l'extraction et la séparation des ETR contenus dans les concentrés d'ETR.

Dans la séparation des ETR, deux grandes catégories d'extractants cationiques sont utilisées : les acides carboxyliques et les acides organophosphorés. Les acides carboxyliques, tels que l'acide versatique, l'acide acétique et l'acide naphthénique, sont particulièrement efficaces pour l'extraction des ETR dans une gamme de pH allant de 6 à 7,5 (Hidayah & Abidin, 2018). Cette efficacité provient de leur faible dissociation à pH acide. Ces acides sont privilégiés pour l'extraction des ETR en raison de leur capacité élevée d'extraction. Ils sont classés en fonction de leurs constituants principaux et sont souvent commercialisés sous différents noms commerciaux.

Les composés organophosphorés constituent une large gamme d'extractants parmi les plus utilisés à l'échelle industrielle. Ils se caractérisent par un centre actif formé d'un atome de phosphore entouré soit d'un atome d'oxygène, soit de groupes organiques ramifiés avec des groupes alkyles. Les extractants organophosphorés agissent soit par échange cationique (cas des extractants acides), soit par solvation (cas des extractants neutres), soit par chélation (cas des mélanges de sites acides et neutres au sein de la molécule) avec les métaux présents en solution. Parmi les ligands organophosphorés, le di-(2-éthylhexyl)phosphate (D2EHPA) et le monoester phosphonique 2-éthylhexyle de 2-éthylhexanol (HEHEHP ou PC 88A) sont considérés comme des molécules de choix pour l'extraction des ETR (Nash, 1993). Le mécanisme d'extraction des ETR avec ce type d'extractants acides est basé sur la déprotonation de 3 ligands par échange avec le cation métallique :



parallèlement à l'augmentation de la concentration en HCl, atteignant une valeur minimale à forte acidité. Sato a étudié l'extraction de tous les ETR par le D2EHPA dans le kérosène (Sato, 1989). L'efficacité d'extraction augmente avec le numéro atomique selon l'ordre suivant : La < Ce < Pr < Nd < Sm < Eu < Gd < Tb < Dy (~ Y) < Ho < Er < Tm < Yb < Lu. Les coefficients de distribution des ETR diminuent avec l'augmentation de la température, cet effet étant plus marqué pour les ETR lourds que pour les ETR légers. Les facteurs de séparation des ETR dans une solution de HCl à 0,1 mol·dm⁻³ avec 0,05 mol·dm⁻³ de D2EHPA dans le kérosène sont présentés dans le tableau ci-dessous (Bautista, 1995).

α	β												
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
Ce	2.14												
Pr	2.28	1.07											
Nd	2.43	1.14	1.06										
Sm	11.8	5.2	5.16	4.8 6									
Eu	26.3	12.3	11.5	10.8	2.23								
Gd	44. 6	20. 9	19.5	18.3	3.75	1.69							
Tb	71.1	33.3	31.1	29.2	6.0 2	2.70	1.60						
Dy	101	47.2	41.1	41.5	8.55	3.83	2.26	1.42					
Ho	125	58. 4	54.7	51.3	10.6	4.74	2.8 0	1.76	1.24				
Er	212	99.1	92.7	87.1	17.9	8.0 4	4.75	2.98	2.10	1.70			
Tm	319	149	139	131	27.0	12.0	7.15	4.4 8	3.16	2.55	1.50		
Yb	414	193	181	170	35.1	15.7	9.3 0	5.83	4.11	3.31	1.90	1.30	
Lu	425	199	186	175	36. 0	16.2	9.55	5.9 0	4.22	3.41	2.01	1.34	1.03

Figure 4.12 $F_s = D_\alpha / D_\beta$ pour l'extraction sélective des ETR dans HCl (0,1 mol.L⁻¹) par D2EHPA (0,2 mol.L⁻¹) dans le kérosène. D'après les données de (Bautista, 1995).

La sélectivité du D2EHPA est optimale pour la séparation des ETR légers des lourds. Dans le toluène, l'extraction des ETR avec le D2EHPA montre un comportement similaire en milieu chlorhydrique et perchlorique, qui est plus faible en milieu nitrique (M. L. P. Reddy et al., 1993). Les coefficients de distribution des ETR entre le D2EHPA dans le toluène et la solution chlorhydrique ont montré une dépendance inverse d'un ordre trois par rapport à la concentration en HCl dans la phase aqueuse, et une dépendance en puissance trois par rapport à la concentration en D2EHPA dans la phase organique, indiquant qu'un seul des groupes acides du dimère de D2EHPA se dissocie et participe à l'extraction (Xie et al., 2014). Le coefficient de partage des ETR augmente généralement avec le numéro atomique, mais les facteurs de séparation et l'efficacité d'extraction dépendent à la fois de l'acidité de la solution (les extractants étant des échangeurs cationiques) et de la nature de l'anion. L'ordre de sélectivité pour l'extraction est analysé comme étant Lu > Yb > Tm > Tb > Eu > Pm > Pr > Ce > La, en utilisant 0,75 M de D2EHPA dans le toluène à partir d'une solution de HCl à 0,5 M, avec un facteur de séparation moyen de 2,5 entre deux ETR adjacentes (Bautista, 1995).

Le D2EHPA a été utilisé à grande échelle chez Molycorp pour concentrer l'euporium jusqu'à 15 % à partir d'un flux chloré issu de la bastnäsite contenant environ 0,1 % de Eu_2O_3 (voir « procédés industriels » ci-après). Une solution à 1 M de D2EHPA permet également de séparer un produit contenant 99,8 % de La_2O_3 à partir d'un flux contenant 45 % de La_2O_3 , 35 % de Nd_2O_3 , 10 % de Pr_6O_{11} et 5 % de Sm_2O_3 . Le Sm, l'Eu et le Gd peuvent également être extraits des autres lanthanides dans une liqueur mixte nitrate-chlorure issue de la lixiviation de la monazite, à l'aide de D2EHPA (Rabie, 2007). Des modèles mathématiques du comportement d'extraction des ETR ont été formulés pour calculer les concentrations dans les phases organique et aqueuse dans n'importe quel compartiment du circuit. Les schémas de procédé développés pour la purification de l'yttrium à partir du concentré à l'aide de D2EHPA et de PC 88A dans des extracteurs-mélangeurs miniatures (capacité de 100 mL) sont respectivement décrit par Thakur et al. (Thakur, 2000a). Les compositions des fractions obtenues dans les deux systèmes y sont identiques, mais les paramètres opératoires optimaux diffèrent.

À l'échelle pilote, le D2EHPA assure la séparation des ETR légers de solutions chlorhydriques de monazite. Le PC 88A, acide plus faible, facilite quant à lui une réextraction plus simple et de meilleurs facteurs de séparation. Dans une cascade continue de mélangeurs-décanteurs, les chlorures d'ETR sont ainsi fractionnés en trois flux (La—Ce—Pr—Nd, Sm—Gd—Eu et Y + HREE) au moyen de PC 88A 30% saponifié. Un Sm de pureté > 95 % est récupéré, tandis que le Ce est oxydé puis isolé à 99,99 % sous forme de CeO_2 . Le raffinat contient 99,9 % de La après élimination des ETR lourds.

Le PC88A (autrement nommé HEHEHP, Ionquest 80, P-507, SME 418) se sature à des charges métalliques plus élevées que le D2EHPA, permettant une production supérieure (M. L. P. Reddy et al., 1993). Il est exploité à Baotou (Chine). Singh et al. ont obtenu du Dy_2O_3 de grande pureté à partir d'un concentré complexe en recourant au PC88A : le premier cycle écarte l'Y et les ETR lourds, le second concentre le Dy à > 99,5 % (Singh et al., 2008). Le rendement global dépasse 98 %, avec une valorisation des sous-produits Y et Tb. Lorsque les facteurs de séparation Dy/Y sont insuffisants, la synergie D2EHPA + PC 88A fournit du Dy_2O_3 97 % et du Y_2O_3 93 % (Thakur, 2000a). Des distributions de Dy dépendant des concentrations en HCl et Dy révèlent des facteurs de séparation Tb/Gd de 14,1, Dy/Tb de 2,7, Ho/Dy de 1,80, Y/Dy de 3,20 et Er/Dy de 4,16 (S. L. Mishra et al., 2000). Enfin Batchu et Binnemans ont montré une influence notable du diluent sur l'affinité et la sélectivité du D2EHPA (Batchu & Binnemans, 2018). Les diluants aliphatiques ont permis d'obtenir de meilleures efficacités d'extraction, tandis que les diluants aromatiques peuvent inhiber la formation d'émulsions ou de gels. Une bonne séparation du Dy(III) par rapport au Nd(III) a été observée à 0,5 mol/L de D2EHPA dans tous les diluants. Le diluant aromatique A150 s'est révélé être le plus performant pour la séparation du Dy(III) du Nd(III). Cette étude souligne que l'effet du diluant sur le comportement d'extraction du système est principalement déterminé par la teneur aliphatique/aromatique du diluant. Les diluants présentant une même concentration en composés aromatiques affichent un comportement très similaire.

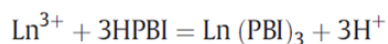
4.2.2.1.2.2 Les acides carboxyliques

Les acides naphthéniques et versatiques représentent les principaux extractants carboxyliques historiquement étudiés pour les ETR (Preez & S Preston, 1992; K. Liu et al., 2023). Le comportement des ETR vis-à-vis de ces ligands dépend de la force de l'acide et de l'encombrement stérique (Preez & S Preston, 1992; D. Zheng et al., 1991). Bien que l'acide Versatique 10 et l'acide naphthénique restent usuels, la forte solubilité de ce dernier augmente les pertes de réactif. Pour réduire la solubilité aqueuse, deux acides phénoxyacétiques (CA-100 et CA-12) ont été mis au point. CA-100 extrait les ETR à pH plus faible que le Versatique 10 (Y. G. Wang et al., 2002; W. Li et al., 2007). D'autres ligands hydrophobes (acides cécanoïque, néo-heptanoïque, 2-bromo-alcanoïques) ont été explorés (Preston, 1994; Singh et al., 2006).

4.2.2.1.2.2.3 Les extractants chélatants

Les extractants chélatants ont la capacité de former des chélates avec les ions métalliques, permettant leur transfert dans la phase organique. Ils se caractérisent par la présence d'un groupe fonctionnel acide et d'un groupe fonctionnel coordonnant. Ils sont considérés comme des extractants métalliques bien plus efficaces et sélectifs que les ligands monodentés. Ces extractants réagissent selon un mécanisme d'échange ionique cationique mais les complexes organométalliques formés sont stabilisés par la partie anionique qui coordonne le cation sur au moins deux positions. Ce type d'extractant donne de meilleurs résultats lorsqu'il est utilisé en synergie avec des extractants cationiques.

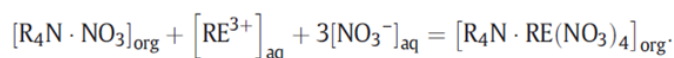
Largement étudiés dans les années 80, les ligands chélatants fonctionnent selon un mécanisme d'échange cationique mais offrent en général une capacité inférieure à celle des extractants acides (Arichi et al., 2006; Urbanski et al., 1996). La présence concomitante de Th et U dans les gisements d'ETR a motivé des études d'extraction utilisant ces composés. Jyothi et Rao ont montré que le 3-phényl-4-acétyl-5-isoxazolone (HPAI) dans MIBK extrayait le La, Ce, Eu, Th et U plus efficacement que HPMBP ou HTTA (Jyothi & Rao, 1989). Le HPBI, isoxazolone fusionnée (3-phenyl-4-benzoyl-5-isoxazolone), a confirmé cette tendance (Jyothi & Rao, 1990).



Des mélanges de ligands chélatants et d'éthers couronnes améliorent l'extraction par synergisme, l'adéquation cavité/ion régissant la stabilité. Mathur et Khopkar ont souligné le rôle du DCH18C6 par la formation de complexes $\text{ETR}(\text{PMTFP})_3 \cdot \text{HPMTFP} \cdot \text{DCH18C6}$ ou $(\text{PMTFP})_3 \cdot \text{DCH18C6}$ (Mathur & Khopkar, 1988). Avec le B15C5, des adduits $\text{M}(\text{PMTFP})_3 \cdot n\text{B15C5}$ ($n = 1-2$) se forment préférentiellement. Pavithran et al., (2003) ont confirmé l'effet bénéfique d'adjonction d'éther couronne qui accroît l'extraction et la sélectivité Nd/Eu. Dans le même registre, Santhi et al. ont démontré une synergie HPMBP + B2EHSO ou CMPO. HPMBP extrait les ETR sous forme de complexes $\text{REE}(\text{PMBP})_3 \cdot \text{HPMBP}$, tandis que les mélanges donnent des complexes $\text{ETR}(\text{PMBP})_3 \cdot \text{B2EHSO}$ ou $\text{REE}(\text{PMBP})_3 \cdot \text{CMPO}$, les constantes augmentant à mesure que diminue le rayon ionique des ETR (Santhi et al., 1994).

4.2.2.1.2.2.4 Les extractants anioniques

Les échangeurs d'anions sont des ligands basiques forts. Ces extractants se caractérisent par leur poids moléculaire élevé, dû à la présence de chaînes aliphatiques grasses portées par des amines primaires (RNH_2), secondaires (R_2NH) et tertiaires (R_3N). Ils agissent selon un mécanisme d'échange d'ions pour former des paires d'ions avec les espèces anioniques, réduisant ainsi la charge ionique effective globale.

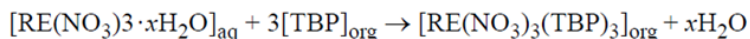


Orabi et al. ont utilisé la N-propylpropan-1-amine pour l'extraction et la séparation des ETR à partir de l'acide phosphorique issu du procédé humide (WPPA). L'efficacité d'extraction des ETR a atteint 98,7 % en utilisant une solution de 1 M de N-propylpropan-1-amine dans du kérosène (A. H. Orabi et al., 2021). En milieu chlorhydrique, les facteurs de séparation entre les ETR adjacents restent modestes avec des amines primaires ou tertiaires alors qu'en milieu sulfurique, la sélectivité s'améliore.

4.2.2.1.2.2.5 Les extractants solvatant

Les extractants solvatant sont des composés neutres connus pour leur alcalinité, qui induit une compétition entre l'extraction des cations et celle des protons (Batchu et al., 2021). La récupération des ETR^{3+} à partir de solutions chlorhydriques et nitriques à l'aide de TBP (tributylphosphate) a été étudiée. L'efficacité d'extraction des ETR avec le TBP augmente parallèlement à la contraction lanthanidique. Il a

été observé que les milieux nitriques concentrés permettent une grande sélectivité du TBP en faveur des ETR légers.



4.2.2.1.2.2.6 Extraction en milieu chlorhydrique

L'acide chlorhydrique (HCl) est largement utilisé comme agent de lixiviation privilégié pour les ETR à partir de diverses matrices, incluant les minerais naturels. Les ETR présentent généralement une meilleure solubilité dans les solutions chlorées comparativement aux milieux acides alternatifs sulfuriques et nitriques. À ce titre, Wang et al. ont examiné l'extraction des ETR lourds provenant de gisements d'ETR adsorbés sur les argiles ioniques en utilisant du Cyanex 572 dilué dans le n-heptane (Y. Wang et al., 2015). Il a été démontré que le taux d'extraction augmente avec l'augmentation du pH à l'équilibre, avec une concentration d'environ 11% de Cyanex 572. Concernant la réextraction, 99 % des ETR lourds concentrés ont été récupérés de la solution de Cyanex 572 par lavage avec une solution de HCl à 3,5 M. Les mêmes auteurs ont également étudié la récupération des ETR lourds à partir de solutions chlorhydriques issues de résidus de déchets miniers radioactifs en utilisant le même ligand. Le taux d'extraction diminue avec l'augmentation de la concentration en HCl, trois molécules d'extractant étant impliquées dans l'extraction d'un seul ion Lu. Il a été constaté que les taux de réextraction des ETR atteignaient 99 % à 5M HCl (Y. Wang et al., 2017).

El-Hefny et al. ont travaillé sur la séparation du Y et du Dy à partir d'une solution de HCl en utilisant le Cyanex 572 comme extractant (El-Hefny et al., 2018). Les résultats ont indiqué que le Cyanex 572 dilué dans des diluants aliphatiques (tels que le kérosène, le chloroforme et le cyclohexane) extrait le Y et le Dy de manière beaucoup plus efficace que lorsqu'il est dilué dans des diluants aromatiques (comme le benzène, le toluène ou l'o-xylène), en raison de la densité spécifique plus élevée de ces derniers. Le taux d'extraction du Y et du Dy à partir d'un milieu HCl (0,1 M) atteint respectivement 90 % et 85 %.

Par ailleurs, Padhan et al. ont étudié l'extraction du Pr en utilisant différents agents extractants. L'extraction du Pr augmente progressivement avec le pH et la concentration de l'extractant (Padhan et al., 2017).

Kim et al. ont étudié le comportement d'extraction et la possibilité de séparer des ETR en utilisant 1 M de TOPS 99 (l'acide di-2-ethylhexyl phosphorique) (J. S. Kim et al., 2012). 100% d'ETR présents dans une solution synthétique représentative d'un lixiviat chlorhydrique de minerai coréen sont extraits.

Par ailleurs, l'extraction du Nd en présence d'un agent complexant aqueux, l'acide lactique (HLac), utilisant le D2EHPA, a été rapportée par Yin et al. (2015). Cette extraction se fait par solvation du métal avec le D2EHPA selon un mécanisme de coordination entre le Nd et le Lac déprotoné sous forme de pont carboxylate bidentate oxygéné, tel que $\text{Nd}(\text{Lac})^{2+}$ et $\text{Nd}(\text{Lac})^+_{\text{2}}$. Les facteurs de séparation La/Ce, Ce/Pr et Pr/Nd sont respectivement de 3,24, 2,04 et 1,58, indiquant que le système est une option prometteuse pour la séparation industrielle des ETR légers.

Kumari et al. ont développé et validé un procédé ELL pour récupérer les ETR à partir de lixiviats de monazite (Kumari et al., 2018). À un pH d'équilibre de 3,5, plus 99 % de La, de Ce, de Nd et de Pr sont extraits en 5 minutes en présence d'une formulation de PC88A à 5%. Une solution de H_2SO_4 à 10 % permet de réextraire efficacement les ETR de la phase organique chargée. En un temps de mélange de 10 minutes, avec un rapport organique/aqueux (O/A) de 1:1, 80 % de La, 88 % de Ce, 83 % de Nd et 65 % de Pr sont réextraits en quatre contacts. (Voir la figure 6 de (Kumari et al., 2018) illustrant le *flowsheet* d'extraction d'ETR d'un lixiviat de monazite.)

Les solutions chlorhydriques présentent une capacité à minimiser la co-extraction d'autres impuretés par rapport aux milieux sulfuriques et nitriques. La gestion du pH de la solution de lixiviation est cruciale pour

obtenir une extraction sélective des ETR tout en minimisant l'extraction d'autres métaux. Malgré ces avantages, l'identification de l'extractant le plus efficace pour l'extraction des ETR reste un défi, d'autant plus que l'acide chlorhydrique peut accélérer la dégradation des extractants organiques par rapport aux autres milieux acides, réduisant ainsi leur efficacité au fil du temps. Cette situation nécessite un remplacement ou une régénération plus fréquente des réactifs extractants afin de maintenir une performance optimale.

4.2.2.1.2.2.7 Extraction en milieu sulfurique

De nombreux travaux de recherche se sont concentrés sur l'extraction des ETR à partir de solutions de lixiviation sulfurique, en raison de leur rentabilité et de leur disponibilité. Divers agents extractants ont été étudiés pour la récupération des ETR. Dans ces solutions, les ETR se trouvent généralement sous forme complexée par les anions sulfates. Cette complexation joue un rôle crucial dans la solubilité et la séparation ultérieure des ETR à partir des solutions de lixiviation.

L'extraction des ETR à partir de H_2SO_4 1 M, issues de la lixiviation de la bastnäsité, a été étudiée par (Y. Lu et al., 2017) en utilisant le phosphonate de di(2-éthylhexyl) [N-(2-éthylhexyl)aminométhyl] (Cextrant 230) pour l'extraction du Ce(IV). Concernant l'étude de réextraction, le Ce(IV) a pu être éliminé en le réduisant en Ce(III) à l'aide de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). L'efficacité de ce stripping atteint 90 % avec une solution de H_2SO_4 à 3 M. Dans une autre étude, Yuan et al. ont étudié l'extraction et la réextraction des ETR à partir de solutions d'acide sulfurique en utilisant le N,N,N',N'-tétraoctyl diglycolamide (TODGA) comme extractant (Yuan et al., 2018). La formulation du stripping est alors constituée d'un mélange acide d'HCl et de HNO_3 . Parhi et al. ont quant à eux étudié l'extraction des ETR à partir de nodules polymétalliques prélevés en eaux profondes dans l'océan Pacifique (Parhi et al., 2015). Le stripping des ETR totaux à partir de la phase organique chargée a été réalisé par une solution de HCl (4 M) en trois étapes. Le D2EHPA, le PC88A et le Cyanex 272 ont été utilisés pour évaluer leur efficacité et leur sélectivité vis-à-vis des ETR en présence d'autres éléments tels que le Cu, le Co et le Ni. Les performances des trois agents extractants ont été établies dans l'ordre suivant : D2EHPA > PC88A > Cyanex 272.

En résumé, l'acide sulfurique présente plusieurs avantages pour l'extraction des ETR, notamment un faible coût et une solubilité élevée des ETR. Cependant, il présente également des inconvénients majeurs, notamment une forte corrosivité, une chimie de solution complexe et le risque de dégradation des solvants.

4.2.2.1.2.2.8 Extraction en milieu nitrique

L'acide nitrique est un choix privilégié pour la lixiviation des minéraux contenant des ETR en raison de la forte solubilité de ces éléments et de sa sélectivité dans le processus de lixiviation. À ce titre, plusieurs études ont été menées sur l'extraction des ETR à partir de milieux nitriques. Xu et al. ont étudié l'extraction des ETR à partir d'une solution de lixiviation nitrique en utilisant le TODGA (D. Xu et al., 2018). Lorsque la concentration de l'extractant est portée à 0,1 M, les taux d'extraction du La, Ce, Pr et Nd ont été déterminés comme étant >98%. L'efficacité d'extraction augmente avec la concentration en HNO_3 . Particularité des extrants solvatants, la réextraction de la phase organique chargée a été réalisée par lavage à l'eau à température ambiante, avec une efficacité située entre 86% et 99,9% en fonction des éléments considérés. Stepanov et al. ont étudié l'extraction d'ETR tels que le La, Ce, Pr et Nd à partir de solutions nitriques acides en utilisant un mélange de TBP et de nitrate de méthyltriocetylammmonium (TOMANO_3) (Stepanov et al., 2022).

Dans l'ensemble, le milieu à base d'acide nitrique présente de nombreux avantages pour l'extraction des ETR, notamment en termes de sélectivité, de résistance à la corrosion, de contrôle du pH et de

compatibilité avec les procédés en aval, comparativement aux milieux chlorhydrique et sulfurique. Cependant, il présente également plusieurs désavantages, notamment la formation de complexes nitrates, des coûts d'exploitation plus élevés, et une compatibilité limitée avec certains extractants organiques.

4.2.2.1.2.2.9 Extraction en milieu phosphorique

La solution d'acide phosphorique (H_3PO_4) est l'une des solutions les plus largement produites industriellement à partir de roches phosphatées, en tant que produit intermédiaire dans la fabrication des engrais. Elle présente plusieurs avantages en termes de sélectivité, de compatibilité avec les extractants organiques, et de formation de complexes stables pour l'extraction des ETR. Radhika et al. ont exploré l'extraction des ETR en utilisant des réactifs organophosphorés acides à différentes concentrations, tels que le TOPS 99, le PC-88A et le Cyanex 272 (Radhika et al., 2010). L'objectif de l'étude était d'évaluer l'efficacité de l'extraction et la possibilité de séparer les ETR légers et lourds dans une plage de concentration acide de 3 à 5 M. Le taux de récupération des ETR diminue avec l'augmentation de la concentration en acide et augmente avec l'élévation de la concentration de l'extractant.

Selon Wu et al., l'augmentation de la concentration en D2EHPA conduit à une amélioration de l'efficacité d'extraction des ETR, et une forte concentration de D2EHPA permet d'extraire efficacement les ETR lourds (S. Wu et al., 2018). Une solution de HCl concentrée (6 M) a été utilisée pour la réextraction sélective des ETR lourds à partir du D2EHPA chargé. De plus, les auteurs affirment que le D2EHPA est l'extractant le plus efficace pour les ETR dissouts dans H_3PO_4 .

L'effet de différents mélanges de D2EHPA avec le TBP, le TOA et le Cyanex 923 sur la récupération des ETR a été étudié, et il a été constaté que le taux de récupération était inférieur à celui obtenu avec le D2EHPA seul, indiquant un effet antisynergique entre les extractants organophosphorés neutres et le D2EHPA (L. Wang et al., 2010). À l'inverse, Rey et al. démontrent qu'après avoir extrait spécifiquement l'uranium présent dans un lixiviat phosphorique par un amidophosphonate (DECHNPB), associée à l'AOT (Bis(2-ethylhexyl) sulfosuccinate de sodium), cette même molécule extrait les ETR présents en solution (Rey et al., 2017). Une large gamme de concentrations totales d'extractant a été étudiée, et une concentration de 0,1 M à 60% de DECHNPB et 40% AOT a été retenue comme le meilleur compromis entre la quantité d'extractant utilisée et son efficacité. Le système mixte AOT/DECHNPB a également été testé sur une large gamme d'acidités, en augmentant la concentration en acide phosphorique de 2 à 9 M, et il a été observé qu'il reste efficace même à forte acidité, ce qui est souvent le cas dans les procédés industriels.

L'extraction du Dy a été rapportée par Surampally et al. à l'aide de PC-88A dilué dans du kérosène. Les études de pH à l'équilibre indiquent que le processus d'extraction implique la libération de trois protons via un mécanisme d'échange cationique (Surampally et al., 2012). De plus, le pourcentage d'extraction du Dy augmente significativement, passant de 30 à 94 %, dans la plage de pH à l'équilibre de 1,18 à 1,70, en utilisant une concentration de 0,07 M de PC-88A. Divers agents extractants, tels que le TOPS99, le Cyanex 272 et le PC88A dilués dans du kérosène, ont également été évalués. Il a été démontré que le TOPS99 offre les meilleures propriétés d'extraction parmi les extractants acides étudiés (B. R. Reddy & Kumar, 2016). Selon une étude antérieure menée par les mêmes auteurs (B. R. Reddy et al., 2010), l'efficacité d'extraction des ETR à l'aide de PC88A dilué dans le kérosène, en fonction de la concentration de H_3PO_4 , suit l'ordre suivant : $\text{Lu} > \text{Yb} > \text{Er} > \text{Y} > \text{Dy} > \text{Tb}$. L'extraction sélective des ETR à partir d'une solution d'acide phosphorique issue du gisement d'Abu-Tartour a été étudiée en utilisant un salicylaldéhyde salifié (A. Orabi et al., 2018). Il a été démontré que le taux de récupération augmente avec l'augmentation de la concentration de l'extractant.

4.2.2.1.2.2.10 Quelques procédés industriels

4.2.2.1.2.2.10.1 Procédé Molycorp

Développé par la société américaine Molycorp en 1965, ce procédé permet principalement la production des oxydes de cérium CeO_2 (et d'euprimum Eu_2O_3) très purs à partir de la bastnäsité de Mountain Pass. Un schéma détaillé de ce procédé (cf. Figure 4.13 ci-dessous) montre également la production des oxydes de Gadolinium Gd_2O_3 et de Samarium Sm_2O_3 . Pour ces fins, le minerai après broyage est concentré à 60 % par flottation puis calciné à 650°C pour oxyder le Ce^{3+} en CeO_2 insoluble en milieu chlorhydrique. La lixiviation du concentré calciné par HCl dissout tous les ETR trivalents. Le CeO_2 non dissous reste dans les résidus de lixiviation où il est récupéré séparément. Cependant, le HCl favorise la réduction du Ce^{4+} en Ce^{3+} ce qui rend difficile sa séparation des autres TR^{3+} . Une alternative à cela est l'oxydation du Ce^{3+} par le carbonate d'ammonium ou le persulfate d'ammonium pour le précipiter en $\text{Ce}(\text{OH})_4$ et le récupérer par filtration.

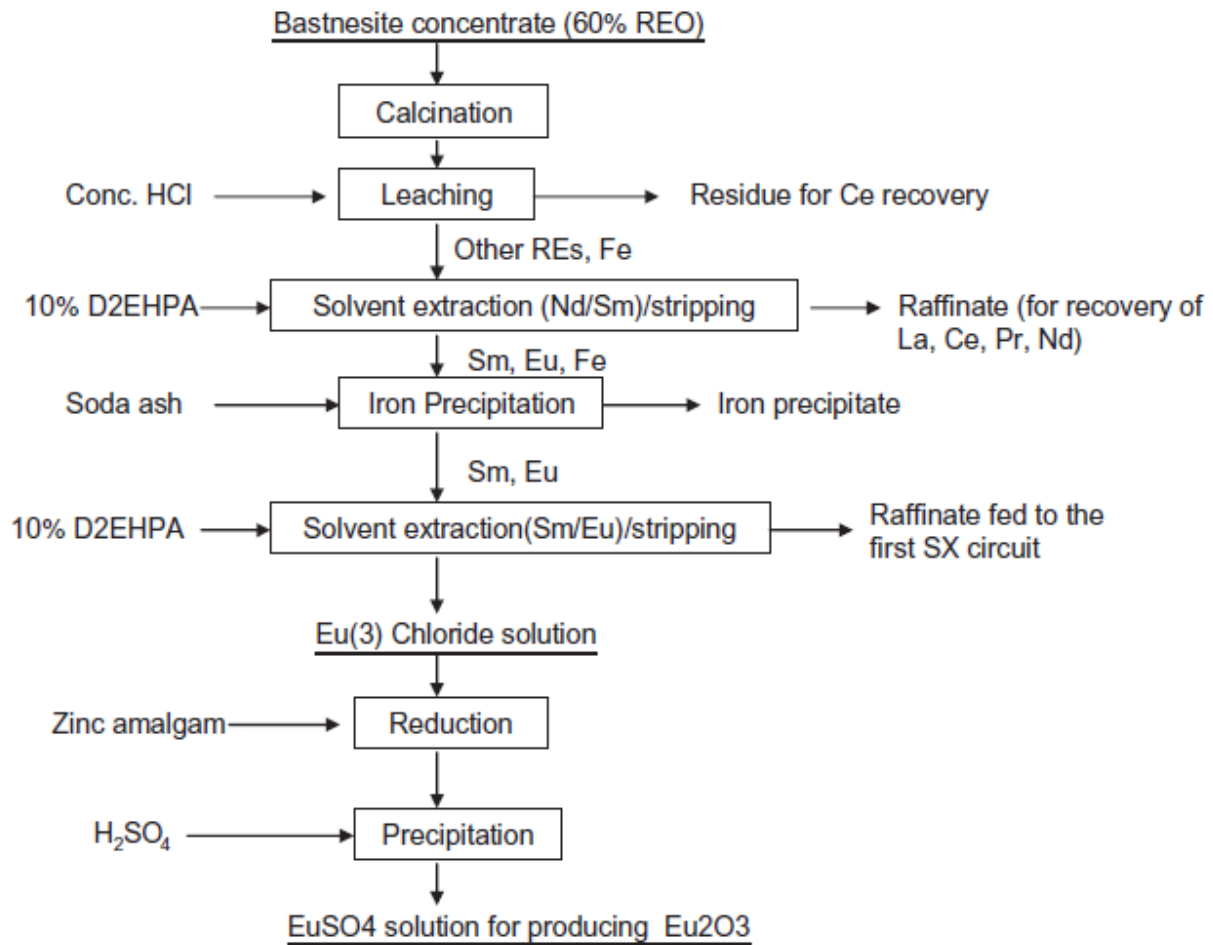


Figure 4.13 Procédé Molycorp pour la production d'ETR à partir de la bastnäsité (C. K. Gupta & Krishnamurthy, 1992).

Le lixiviat des autres ETR alimente un premier banc de 5 étages de mélangeurs-décanteurs où le Sm et tous les ETR lourds sont extraits par le solvant et le Nd et tous les ETR légers restent dans le raffinat. Plus de 98% d'Eu initialement présent dans le lixiviat sont extraits par le solvant et la réextraction s'effectue par lavage avec une solution de de HCl 4M. Le fer contenu dans la solution de réextraction est précipité par neutralisation à $\text{pH}=3,5$ et la solution de réextraction riche en Eu est envoyée dans un second circuit d'extraction liquide-liquide à 5 étages de mélangeurs-décanteurs en utilisant le même solvant. L'Eu et

d'autres ETR lourds sont transférés dans le solvant et les ETR légers restent dans le raffinat qui retourne dans le circuit primaire d'extraction liquide-liquide. L'Eu et les autres ETR lourds sont réextraits du solvant par HCl 5M. La solution de réextraction passe ensuite dans une colonne d'amalgame de zinc (colonne Jones) pour réduire l'Eu³⁺ en l'Eu²⁺. L'ajout d'acide sulfurique précipite l'Eu²⁺ en EuSO₄ qui est calciné pour produire l'Eu pur à 99,99%. Le Gd est extrait par le solvant puis transformé en Gd₂O₃ dans un circuit d'extraction de 10 étages de mélangeurs-décanteurs suivis par 5 étages de lavage. Le raffinat est neutralisé avec du carbonate de sodium pour précipiter le Sm et produire le Sm₂O₃.

Dans ce procédé, plusieurs solvants sont utilisés tels que l'acide dicyclohexylphosphinique (DCHPA) (F. Xie et al., 2014) , le Cyanex 272 (acide 2,4,4-triméthyl pentyl phosphinique) (Banda et al., 2012) , le Cyanex 301 (acide 2,4,4-triméthyl pentyl dithiophosphinique), le Cyanex 302 (acide 2,4,4-triméthyl pentyl thiophosphinique) (Batchu et al., 2015; X. He et al., 2014 ; Tian et al., 2013), les acides versatiques 911 et 10 (Brown & Sherrington, 1979), l'acide bis (2-éthylhexyl) phosphorique (HDEHP ou D2EHPA) et l'acide 2-éthylhexyl phosphonique mono-2-éthylhexyl (HEHEHP ou EHEHPA) (Brown & Sherrington, 1979). Cependant, de tous ces solvants, le HDEHP est le plus utilisé dans le procédé Molycorp.

4.2.2.1.2.2.10.2 Procédé Rhône-Poulenc

Ce procédé a été mis en place par la société Rhône Poulenc (l'actuel groupe Syensqo) pour la production de tous les ETR d'une pureté de 99,999 % à partir de la monazite. Après l'étape de broyage, le minerai est concentré puis soumis à une attaque sodique (NaOH) à 180°C en autoclave pendant 3h pour éliminer les phosphates trisodiques solubles. Les hydroxydes d'ETR sont séparés du Thorium et d'autres éléments radioactifs par filtration et dissolution en milieu nitrique et chlorhydrique. Les lixiviats Na₃PO₄ d'ETR suivent ensuite un des deux circuits d'extraction liquide-liquide présentés sur la Figure 4.14 (ci-dessous) pour produire des oxydes purs d'ETR.

Le milieu HCl est préféré pour produire un mélange de chlorures d'ETR anhydres destinés à la production électrolytique du mischmétal (alliage de différents ETR).

Le milieu nitrique est choisi pour produire les oxydes d'ETR purs. Dans un premier temps, le La (pour 99,9995% de La₂O₃) reste en phase aqueuse quand le mélange de Ce, Pr, Nd, Sm... Lu est chargé dans le solvant. De la même façon, le Ce (pour 99,5% de CeO₂) est ensuite séparé du Pr, Nd, Sm...Lu puis le didymium (mélange de Nd et de Pr pour produire 96 % de Nd₂O₃ et de Pr₂O₃ séparément); ainsi de suite jusqu'à l'Y qui est obtenu en fin d'extraction pour produire 99,99 % de Y₂O₃. La production de chaque ETR mobilise au moins une batterie de 50 étages de mélangeurs-décanteurs.

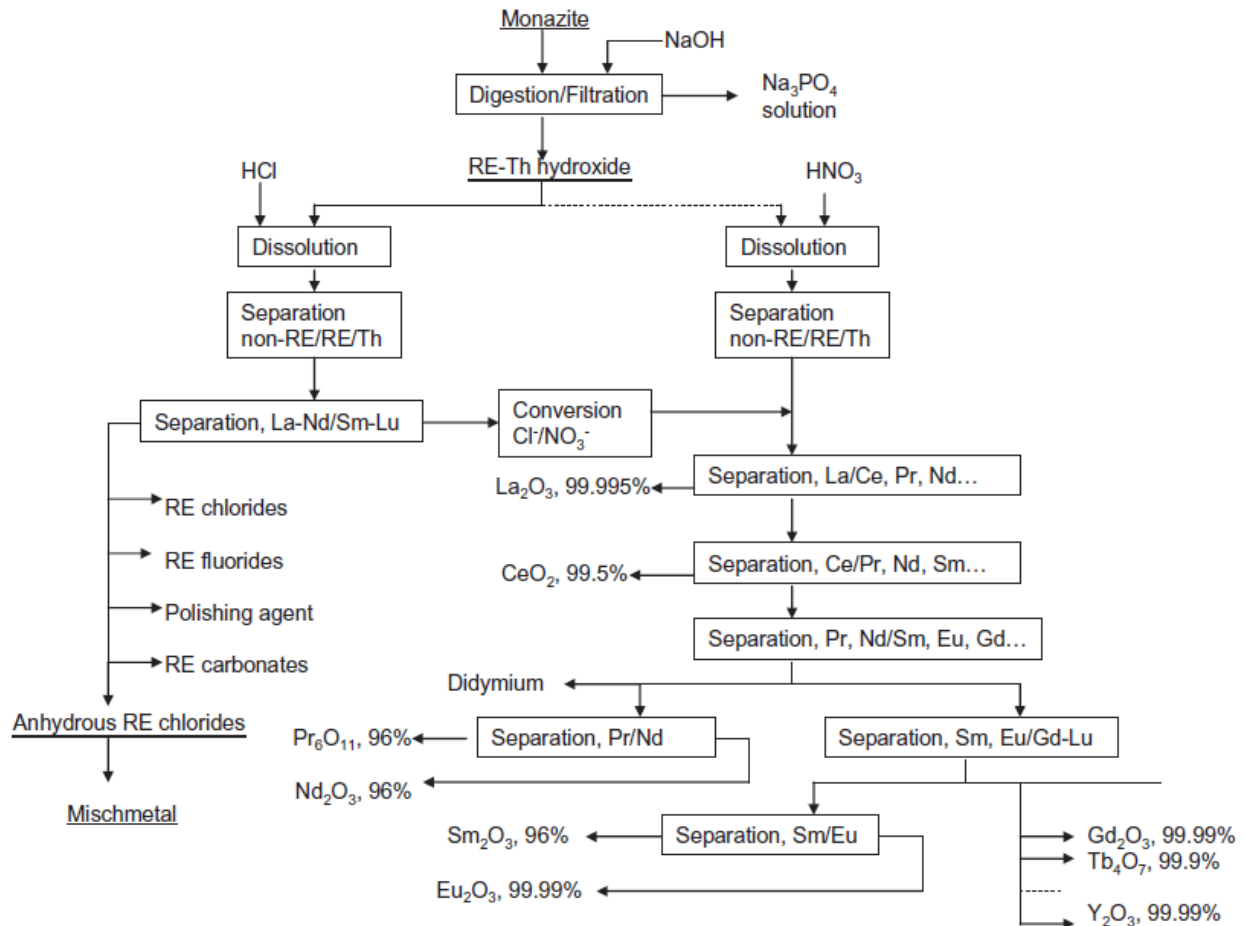


Figure 4.14 Procédé d'extraction liquide-liquide Rhône Poulenc (l'actuel group Rhodia-Solvay) pour la séparation des ETR. Tirée de (F. Xie et al., 2014). Sous licence CC BY-NC-ND.

Ce procédé considéré comme standard par les industriels (Sastri, 2003), peut aussi être adapté pour produire des oxydes d'ETR de haute pureté à partir de la bastnäsité, xenotime, euxenite. Cette flexibilité du procédé s'explique par une littérature sensiblement riche sur les solvants utilisés pour l'isolement des ETR, à savoir les acides carboxyliques comme le versatique 911 (Brown & Sherrington, 1979), les amines comme le nitrate de trioctylmonométhylammonium (Aliquat 336), la tri-n-octylamine (Alamine 336 ou Alamine 308) et les organophosphorés neutres comme le tributylphosphate (TBP) qui reste le plus utilisé des extractants organophosphorés neutres dans le procédé Rhône-Poulenc.

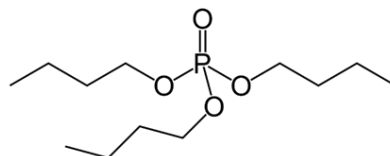


Figure 4.15 Structure du Tributylphosphate (TBP)

À 50% dans du Shellsol A, il extrait les complexes neutres d'ETR (TBP)₃ETR(NO₃)₃ par une réaction de solvation du métal. Avec 450 g.L⁻¹ de REEs en phase aqueuse après lixiviation, le TBP à 50% volumique dans du Shellsol A saturé à 100 g.L⁻¹ (Lo et al., 1983). Le coefficient de distribution k_D est compris entre 1

et 10 pour les ETR lourds (Tb-Yb) avec un maximum pour le Dy. Les ETR plus légers que le Tb ont des valeurs de K_D inférieures à 1. La réextraction des ETR s'effectue par lavage à l'eau.

4.2.2.1.2.2.10.3 Procédé Mintek

Dans ce procédé pilote, les ETR sont récupérés à partir de la boue de sulfate de calcium générée durant la production de l'acide phosphorique à partir de l'apatite à Phalaborwa (Afrique du Sud) (Preston et al., 1996). La boue est lixiviée avec de l'acide nitrique dilué contenant du nitrate de calcium. Les ETR sont extraits du lixiviat et le raffinat est recyclé vers la lixiviation après l'élimination du solvant organique entraîné. Les ETR sont réextraits du solvant chargé avec de l'eau et précipités avec de l'acide oxalique puis calcinés pour obtenir un mélange d'oxydes d'ETR avec 89—94% de pureté. Ce mélange d'oxyde contient une forte quantité de Nd, Sm et Eu pour lesquels des essais pilotes supplémentaires utilisant le TBP, le HDEHP et le Aliquat 336 ont été menés pour la production d'oxydes séparés.

4.2.2.1.2.2.10.4 Procédés industriels en Chine

Divers dispositifs de concentration directe pour obtenir la solution de ETRCl_3 sans passer par la précipitation-calcination ont été testés en Chine. On y recense des approches d'extraction par solvant, d'échange ionique et de membranes liquides. Toutefois, seule l'extraction par solvant est véritablement appliquée à grande échelle, malgré deux défis majeurs : la perte d'extractant (dissolution dans la phase aqueuse) et la difficulté à extraire efficacement les ETR de solutions très diluées. Pour y remédier, des extractants commerciaux comme l'acide naphénique, le P507 ou le P204 (D2EHPA) sont employés, en association éventuelle avec des techniques de moussage ou de centrifugation, qui améliorent le rendement par rapport aux opérations de brassage-décantation traditionnel (Han & Lin, 2022; J. Liu et al., 2018). Ainsi, la technologie actuelle de séparation des minerais consiste d'abord à isoler le Y(III) par l'acide nitrique, puis à séparer les autres ETR à l'aide d'extractants phosphorés tels que le HEH(EHP), le HDEHP et le P507 (Belova, 2017; X.-W. Huang et al., 2015; D. Li, 2019).

La monazite et la bastnäsité sont les principales sources d'ETR en Chine. Pour la bastnäsité, après le broyage et la lixiviation du minerai par H_2SO_4 , les ETR sont extraits par le P204 suivi d'une réextraction sélective pour les séparer en 2 groupes (La-Nd et Sm-Gd) avec une concentration faible en ETR plus lourds que le Gd. Les ETR peuvent alors être séparés individuellement si besoin. L'usine de Shanghai Yue Long a publié le traitement des concentrés de monazite par un procédé similaire au procédé Rhône-Poulenc (Zang et al., 1982). Après l'attaque de la monazite par NaOH, la filtration et la lixiviation des résidus par HCl, les chlorures d'ETR résultants sont extraits par D2EHPA puis séparés en 3 groupes à partir desquels les ETR sont produits individuellement ou mélangés sous diverses formes, oxydes, carbonates ou chlorures.

Pour son affinité avec les ETR lourds, l'acide naphénique est fréquemment utilisé pour la séparation des ETR lourds à partir des argiles ioniques (du Sud de la Chine) en milieu nitrique et chlorhydrique. Les ETR individuels sous forme d'oxydes ou de chlorures peuvent être produits en contrôlant la réextraction.

4.2.2.1.2.3 Milieux non usuels pour l'extraction et la séparation.

Dans les procédés hydrométallurgiques appliqués aux concentrés de bastnäsité ou de monazite, des acides forts (HCl, H_2SO_4 ou HNO_3) sont d'abord utilisés pour dissoudre les ETR, puis une extraction par solvant à l'aide de solvants organiques volatils, inflammables ou toxiques est donc couramment appliquée pour séparer ces éléments les uns des autres. L'ensemble du procédé requiert une grande quantité de réactifs chimiques et d'énergie, et génère toujours une importante quantité de déchets, causant ainsi des dommages graves aux écosystèmes. Par conséquent, le développement de solvants plus respectueux de

l'environnement et de la santé, pouvant être utilisés pour la lixiviation comme pour la séparation des métaux, revêt une importance capitale pour une production plus propre des concentrés d'ETR.

4.2.2.1.2.3.1 Extractants fluorés

Les extractants fluorés sont des composés présentant une concentration relativement élevée en fluor, et se caractérisent par une excellente stabilité thermique et chimique, ainsi qu'une faible toxicité.

Ces solvants présentent souvent une miscibilité dépendante de la température avec différents solvants organiques. Cela signifie qu'ils peuvent être utilisés dans des systèmes biphasiques fluoro-organique. Ces solvants peuvent être considérés comme « commutables », leur solubilité pouvant être modifiée simplement par variation de température.

Le comportement d'extraction et de séparation des ETR à partir de différentes solutions de HNO_3 a été examiné (Ueda et al., 2021). Les auteurs ont utilisé le TBP dans le perfluorohexane, et l'efficacité de séparation s'est révélée supérieure à celle obtenue avec le TBP dans le n-octane.

Par ailleurs, Nakamura et al. ont étudié l'extraction des ions d'ETR à l'aide d'un β -dicétone fluorophile comme extractant (Nakamura et al., 2015). Ils ont observé une amélioration significative des taux d'extraction et des facteurs de séparation pour les ETR lourds (Lu, Yb, Tm, Er et Ho), comparativement à un système de solvant organique conventionnel (notamment la thenoyltrifluoroacétone dans le CHCl_3).

4.2.2.1.2.3.2 Liquides ioniques (ILs)

Les liquides ioniques se composent généralement d'un gros cation organique asymétrique (pyrrolidinium, pyridinium, imidazolium, tétraalkylammonium ou tétraalkylphosphonium) et d'un petit anion organique ou inorganique (bromure, tétrafluoroborate, hexafluorophosphate). Si leur utilisation est largement décrite dans la littérature pour l'extraction des ETR contenus dans la mine urbaine (voir chapitre 3) ou dans les déchets miniers, peu d'articles sont dédiés à leur utilisation comme solvant ou co-solvant d'extraction de concentrés issus des ressources primaires. La plupart reposent sur l'utilisation de solutions synthétiques de chlorures, sulfates ou nitrates pour l'extraction des ETR comme pour l'élimination des impuretés radioactives (Arrachart et al., 2021; Zeng et al., 2022, 2023; H. Xu et al., 2022).

Hidayaha et Abidin ont utilisé les extractants conventionnels D2EHPA et la 2-thenoyltrifluoroacétone (HTTA) comme extractants cationiques, en combinaison avec l'Aliquat 336 (A336) comme extractant anionique (Hidayah & Abidin, 2018). Ces extractants ont été dilués dans des liquides ioniques à base d'imidazolium pour l'extraction des ETR. Les résultats ont montré que le D2EHPA présente un potentiel indéniable alors que la HTTA a donné des résultats contrastés, montrant une efficacité pour le Pr et le Gd lors du processus synergique. Parmi les différents extractants synergiques testés, l'Aliquat 336 s'est révélé être le plus compatible lorsqu'il est combiné avec des ILs. Notamment, les systèmes A336-[Cnmim][NTf₂] et A336-[C2mim][NTf₂] présentent des propriétés d'extraction remarquablement efficaces (L. Guo et al., 2014; Quijada-Maldonado & Romero, 2021). Outre des questions de viscosité élevée, le principal inconvénient dans l'utilisation des liquides ioniques restera lié à leur mode d'action, qu'ils soient purs ou en synergie avec un extractant classique. Quand il s'agit d'échange cationique ou anionique (avec passage de la partie cationique ou anionique du IL dans la phase aqueuse), le recyclage de la phase extractante est donc limité et la recherche de formulations ioniques permettant un transfert sans perte du IL devient un challenge (K. Wang & Luo, 2017).

4.2.2.1.2.3.3 Solvants eutectiques profonds (DESs)

Les solvants eutectiques profonds ont suscité un intérêt croissant au cours de la dernière décennie basée sur le concept de solvométallurgie, et sont considérés comme des solvants verts susceptibles de remplacer les solvants traditionnels à l'avenir. Dotés d'une faible pression de vapeur, ces solvants, souvent biodégradables et parfois peu toxiques, sont généralement liquides et non volatils à température ambiante. Les propriétés de ces solvants dépendent en grande partie des donneurs de liaisons hydrogène. La grande diversité de ces donneurs confère aux solvants une adaptabilité particulière, permettant de les personnaliser pour des applications spécifiques. Ainsi, les solvants eutectiques profonds peuvent constituer une alternative verte aux méthodes conventionnelles, et offrent un grand potentiel pour être utilisés dans les procédés hydrométallurgiques des ETR afin de réduire la quantité de déchets générés. Les solvants eutectiques profonds (DESs) constituent un type particulier de liquide ionique, composé d'un mélange d'acides et de bases de Brønsted ou de Lewis (Alguacil & Robla, 2023; Shakiba et al., 2023). Typiquement, les DESs se forment par interaction entre un donneur de liaison hydrogène (HBD), tel qu'un sel halogéné, et un accepteur de liaison hydrogène (HBA), tel qu'un sel d'ammonium quaternaire (voir chapitre 3). La littérature dédiée spécifiquement à la lixiviation et à la purification d'ETR issus de ressources primaires reste très modeste. La lixiviation de matériaux issus des gisements de type bastnäsité a été étudiée en utilisant des DESs à base de chlorure de choline (Entezari-Zarandi & Larachi, 2019). À cette fin, des mélanges mono- et multi-composants d'ETR (Y, La, Ce, Nd et Sm) sous forme de carbonates ont été examinés. Les expériences de dissolution ont montré que les DESs à base de chlorure de choline (ChCl)/(acide malonique (MA)) et de chlorure de choline (ChCl)/(mélange urée + acide malonique (UMA)) présentent de meilleures performances pour dissoudre les ETR. Le minerai de bastnäsité a donc été soumis à une étape de dissolution utilisant ChCl/UMA, mettant en évidence un système DES prometteur pour la dissolution sélective des ETR lourds par rapport aux ETR légers et aux éléments concurrents provenant des minéraux de gangue, tels que le Ca, le Mg et le Fe.

4.2.2.1.2.4 Procédés pour l'extraction en Europe

L'ensemble des technologies appliquées à l'extraction des ETR provenant de gisements aujourd'hui exploités dans le monde est également abordé dans la perspective de déploiement de filières européennes. Filippov et al. développent un procédé de flottation par mousse pour enrichir les monazites et autres minéraux riches en ETR dans les résidus de kaolin de St Austell au Royaume-Uni, en optimisant les réactifs collecteurs de façon à améliorer la sélectivité (Filippov et al., 2016). Les résultats montrent qu'une dispersion efficace des minéraux argileux est obtenue avec une concentration très faible (20 mg/L) en utilisant un dispersant à base de polyacrylate de sodium (Antiprex D). L'utilisation d'oléate et d'hydroxamate de sodium en présence ou en l'absence de réactif non ionique (PX4826) a été étudiée sur des échantillons désimprégnés avec ou sans dispersant. En l'absence de dispersant, les meilleurs résultats obtenus avec l'oléate de sodium ou l'hydroxamate en termes de teneur en ETR sont d'environ 3370 ppm et 2500 ppm, respectivement. Quantitativement, la récupération ETR avec l'oléate de sodium reste faible (30 %). Elle peut être portée à 83 % avec l'ajout d'un réactif non ionique, cependant au prix d'une teneur plus faible. L'ajout d'un dispersant améliore considérablement l'efficacité de la flottation. La teneur en ETR légers de la phase flottante obtenue avec l'oléate de sodium passe de 3370 ppm à 5350 ppm, tandis que la récupération augmente de 30 % à 80 %. Silva et al. se concentrent sur la flottation des minéraux riches en ETR, tels que la bastnäsité et la monazite, issues du complexe carbonatitique de Fen (Norvège) (C. M. Silva et al., 2023). Ils optimisent les paramètres de flottation grâce à une analyse minéralogique par microscopie électronique à balayage automatisée afin d'améliorer des ETR. Un mélange d'acide benzohydroxamique et d'Aero® 6493 (mélange commercial d'alcools, C11-14-iso-, C13-rich, d'acide caprylique et d'acide caprique) a été utilisé comme collecteur. Silin et al. se concentrent sur la récupération de la catapleiite et de l'eudialyte à partir des fractions non magnétiques du minerai de Norra Kärr (Suède), en appliquant la flottation avec des esters d'acide phosphorique pour atteindre des concentrations élevées d'ETR (Silin et al., 2022). Tamm et al. analysent l'enrichissement d'une

phosphorite estonien par flottation inverse, mettant en évidence l'influence du temps de flottation et du dosage des collecteurs sur la récupération des apatites et des ETR associés (Tamm et al., 2021).

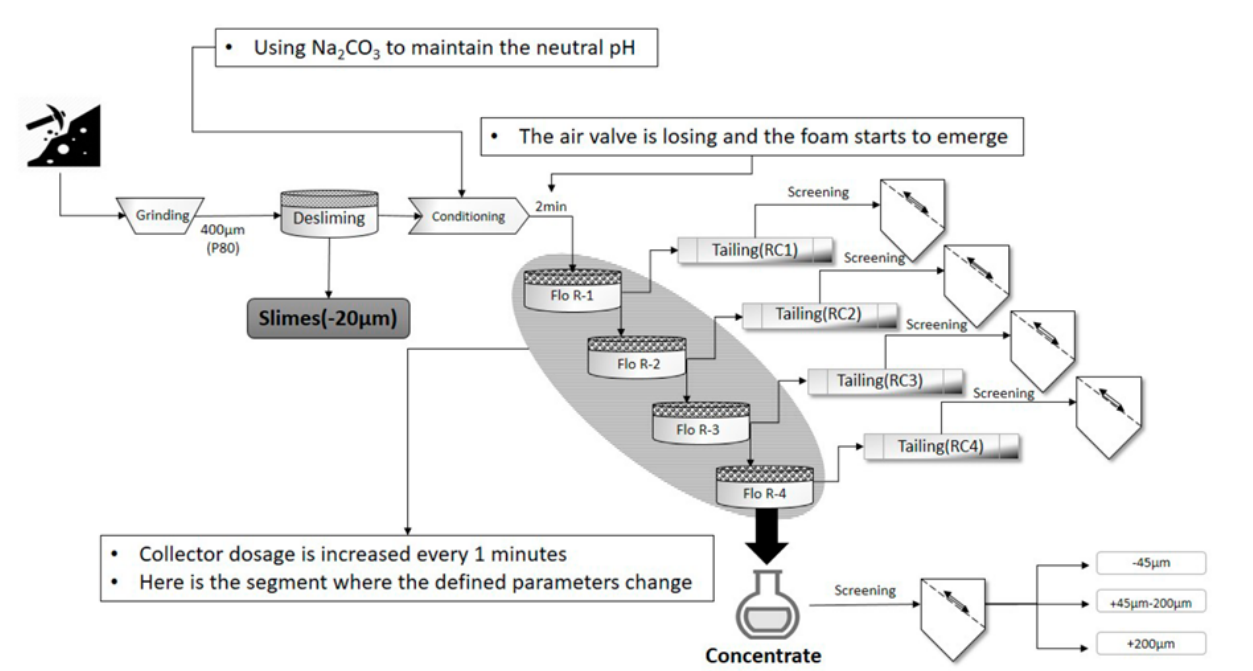


Figure 4.16 Procédé de flottation d'un minerai de phosphate estonien. Tirée de (Tamm et al., 2021). Sous licence CC BY.

Alemrajabi et al. explorent la récupération des ETR à partir des concentrés d'apatite obtenus via le procédé nitrophosphate appliqué aux minerais de fer en Suède, en exploitant la précipitation sélective et la conversion alcaline des phosphates d'ETR pour une récupération efficace (Alemrajabi et al., 2017, 2019; Balinski et al., 2019b, 2019a) analysent la lixiviation des concentrés d'eudialyte, en comparant l'extraction directe à l'acide sulfurique et la précipitation des sulfates métalliques après torréfaction sélective, optimisant la récupération du zirconium, de l'hafnium et des ETR (Balinski et al., 2020). Diehl et al. (2018) proposent une extraction assistée par ultrasons d'ETR à partir de roches carbonatitiques, réduisant le temps de lixiviation et la consommation d'acide tout en maintenant un rendement élevé (Diehl et al., 2018). Burlakovs et al. explorent la récupération des ETR à partir des fractions fines de déchets miniers et industriels, révélant la présence exploitable de néodyme et de dysprosium (Burlakovs et al., 2018). Stouraiti et al. étudient l'enrichissement des ETR dans les sables minéraux lourds de Nea Peramos (Grèce), en appliquant la séparation magnétique à haute intensité et la classification granulométrique pour concentrer l'allanite et la titanite, améliorant ainsi l'efficacité du traitement (Stouraiti et al., 2020). Lokshin et Tareeva développent une technologie intégrée pour le traitement des concentrés d'apatite du Khibiny (Russie), combinant la décomposition à l'acide phosphorique, la précipitation sélective et la régénération des résines échangeuses d'ions, améliorant ainsi la récupération des ETR lourds et minimisant les déchets (Lokshin & Tareeva, 2023). Kennedy et al. explorent un traitement pyrométallurgique des concentrés d'apatite extraits des rejets de la mine de Kiruna (Suède), utilisant une réduction carbothermique pour extraire le phosphore et concentrer les ETR dans les scories, proposant un schéma d'optimisation thermodynamique du processus (Mark William Kennedy et al., 2017). Stopic et Friedrich passent en revue les avancées en métallurgie extractive des ETR, détaillant l'application de la lixiviation sous pression, la précipitation sélective et la pyrolyse ultrasonique pour améliorer la récupération des ETR à partir de diverses sources secondaires (Stopic & Friedrich, 2021). Stark et al. examinent la séparation des ETR dans les minerais d'eudialyte du gisement de Norra Kärr (Suède) via la séparation magnétique haute intensité et la flottation sélective en milieu acide, atteignant une

récupération de 81 % des ETR (Stark et al., 2017). Chanturiya développe une approche innovante pour l'extraction du zirconium et des ETR à partir des concentrés d'eudialyte, combinant la lixiviation acide, le traitement par ultrasons, la technologie plasma et l'électrochimie afin d'éviter la formation de gels de silice et optimiser la récupération des éléments valorisables (Chanturiya, 2022). Parmi les innovations majeures figurent l'utilisation des solvants eutectiques profonds pour améliorer la sélectivité d'extraction des ETR dans les résidus miniers (Thomas et al., 2024), l'exploitation de la flottation assistée par ultrasons pour réduire le temps de traitement et la consommation de réactifs (Diehl et al., 2018), ainsi que le développement de nouveaux collecteurs spécifiques aux zirconsilicates pour améliorer la séparation des minéraux d'ETR (Silin et al., 2022). D'autres avancées portent sur la réduction des impacts environnementaux des procédés d'extraction grâce à des techniques de régénération des réactifs et de recyclage des résidus (Lokshin & Tareeva, 2023), le développement de techniques de précipitations sélectives pour limiter les pertes métalliques (Alemrajabi et al., 2019), et l'optimisation de la séparation magnétique et de la flottation sélective pour améliorer les rendements d'extraction des ETR à partir de matrices complexes (Stark et al., 2017). Ces études démontrent une convergence vers des procédés plus efficaces et respectueux de l'environnement, cherchant à maximiser la récupération des ETR tout en minimisant les pertes et les coûts énergétiques. Elles contribuent au développement d'une chaîne d'approvisionnement plus durable pour les ETR, explorant de nouvelles sources minérales et industrielles afin de pallier la dépendance aux gisements traditionnels.

4.2.2.1.2.5 Résumé et conclusion

En résumé, la séparation et la purification des ETR reposent aujourd'hui sur un corpus technique très structuré qui va des méthodes « historiques » de cristallisation fractionnée, précipitation sélective ou échange d'ions, aux dispositifs d'extraction liquide-liquide (ELL) multi-étages et, plus récemment, aux solvants eutectiques profonds (DES) ou aux liquides ioniques. 58 publications de rang 1 parues depuis 2015 dont plusieurs revues et 3 majeures (Manis Kumar Jha et al., 2016; Merroune et al., 2024; F. Xie et al., 2014) identifient clairement l'ELL comme l'approche industrielle dominante, capable de traiter des concentrés mixtes dissous dans HCl, HNO₃ ou H₂SO₄ au moyen de batteries pouvant dépasser 1 500 étages d'extraction/lavage/réextraction. Pour l'ELL, les agents extractants se classent en quatre familles distinctes, les échangeurs cationiques (D2EHPA, PC 88A, P 507, acides carboxyliques...) qui échangent leurs protons contre le cation ETR³⁺, les chélatants (hydroxyoximes, β-diketones...) qui forment des complexes polydentés très sélectifs mais de capacité limitée, les anioniques (amines de type Aliquat 336...) utiles pour la formation de paires d'ions; les solvatants neutres (TBP, malonamides, diglycolamides...) qui transfèrent des nitrates neutres d'ETR. Six publications très citées démontrent que le tandem D2EHPA/PC 88A permet de séparer en cascade des mélanges La/Ce/Pr/Nd, Sm/Gd/Eu puis Y/HREE avec des facteurs de séparation (sélectivité) dépassant 20 pour Dy/Y et 14 pour Tb/Gd, tandis que l'emploi synergique d'un éther-couronne ou d'un dicétone fluorophile double la sélectivité Nd/Eu. Les études réalisées par K. Liu et al. (K. Liu et al., 2023) montrent que la solubilité aqueuse des acides carboxyliques (naphténique, versatique 10) limite leur utilité. L'ajout d'isoxazolones (CA-100) ou l'usage de diluants aromatiques diminue cependant ces pertes de 30 %. Les articles de synthèse identifient aussi la contrainte environnementale majeure. Chaque tonne d'ETR purifiée génère jusqu'à 1,5 t de saumure NaCl quand la réextraction se fait à la soude, si bien qu'une douzaine de travaux focalisés entre 2020 et 2023 testent des couples extractant/agent de stripping sans sodium, par exemple HEHEHP réextrait à l'acide lactique qui divise les rejets salins par 2. Les approches classiques comme celles de Molycorp (bastnäsite-HCl—D2HEPA), de Rhône-Poulenc (Monazite- HCl et/ou HNO₃- D2HEPA) ou du procédé Mintek (lixiviation nitrique de phosphogypse puis D2EHPA) restent robustes, mais la littérature converge sur l'intérêt de solvants plus vertueux. Une étude montre que le TBP dans le perfluorohexane améliore de 25 % le coefficient de distribution des ETR lourds par simple commutation de température (Ueda et al., 2021). Une équipe a démontré qu'un DES à base de choline-urée-acide malonique dissout préférentiellement les ETR lourds de bastnäsite, offrant une lixiviation sélective sans acide fort et une

réextraction à 99 % par simple ajout d'acide oxalique (Entezari-Zarandi & Larachi, 2019). Sur le plan quantitatif, les approches ELL traditionnelles délivrent 50–80 % de rendement global en oxydes d'ETR hautement purs, alors que les procédés émergents (DES, IL, membranes) reportent encore des rendements labo de 35–60 %, mais avec une réduction d'un facteur quatre des émissions fluorées ou radioactives (par exemple (Alemrajabi et al., 2022; Arrachart et al., 2021; Zeng et al., 2023)). Les considérations environnementales de tels procédés demeurent cependant encore limitées. En Chine, les recherches portent sur l'extraction par solvant, l'échange d'ions et les membranes liquides, mais seule l'extraction liquide-liquide est industrialisée. L'industrie emploie des extractants commerciaux (acide naphthénique, P507 ou D2EHPA) parfois couplés à des procédés de moussage ou de centrifugation, plus performants que les mélangeurs-décanteurs classiques (Han et al., 2022; J. Liu et al., 2018). Les schémas actuels isolent d'abord Y(III) en milieu nitrique, puis fractionnent les autres REE avec HEH(EHP), HDEHP ou P507 (Belova, 2017; Han et al., 2022; X.-W. Huang et al., 2015). La bastnäsite est plus particulièrement traitée par le D2EHPA, la monazite suivant un procédé dérivé de Rhône-Poulenc (Zang et al., 1982). L'acide naphthénique reste privilégié pour les argiles ioniques riches en ETR lourds. La littérature scientifique étudiée converge donc vers l'idée qu'aucun « solvant miracle » ne remplacera à court terme les phosphates ou phosphonates. En revanche, la modularité des circuits (mélangeurs-décanteurs classiques, colonnes pulsées, colonnes à plateaux) et la synergie entre extractants (acides et solvants neutres notamment) permettent déjà de gagner en capacité ou de réduire le nombre d'étages, sans compromettre la pureté du produit finale. Sur le plan européen, une quinzaine d'études (2016-2024) déploient flottation, lixiviation et procédés hybrides pour préparer une filière ETR locale. La mousse de Filippov et al. porte la teneur en monazite des boues kaoliniques de 3 370 ppm à 5 350 ppm, avec 80 % de récupération grâce à 20 mg L⁻¹ de polyacrylate (Filippov et al., 2016). Sur la bastnäsite norvégienne, Silva et al. (2023) obtiennent des ETR enrichis en optimisant un collecteur hydroxamate/alcools (C. M. Silva et al., 2023). En Suède, Silin et al. concentrent la catapleiite par des esters phosphoriques, tandis que Stark et al. atteignent 81 % de récupération d'eudialyte via une séparation magnétique haute intensité et une flottation acide (Silin et al., 2022; Stark et al., 2017). Les stratégies nitrophosphate (Alemrajabi et al., 2019), lixiviation ultrasons (Diehl et al., 2018) et solvants eutectiques profonds (Thomas et al., 2024) confirment l'intérêt d'approches sélectives, régénérables et sobres en réactifs pour une chaîne d'approvisionnement en ETR durable.

En conclusion, les travaux récents sur la séparation et la purification des éléments d'ETR révèlent une profonde structuration du champ technique, enrichie par des décennies d'optimisation industrielle et par l'émergence de solutions plus durables. Le paysage technologique actuel se caractérise par une coexistence dynamique entre procédés éprouvés, massivement déployés à l'échelle industrielle et perpétuellement optimisés par une recherche incrémentale, et voies alternatives en développement, visant à mieux répondre aux enjeux environnementaux, économiques et géopolitiques contemporains.

Finalement, l'ensemble des données apporte des arguments en faveur d'un modèle hybride, dans lequel les technologies classiques, notamment l'extraction liquide-liquide (Manis Kumar Jha et al., 2016; Merroune et al., 2024; F. Xie et al., 2014) continuent d'assurer des performances de séparation robustes pour des matrices complexes, tandis que les efforts de recherche s'orientent vers la réduction des impacts environnementaux et l'adaptation à des ressources non conventionnelles. 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.

Par ailleurs, les solvants émergents, qu'il s'agisse des liquides ioniques (IL), des solvants eutectiques profonds (DES), introduisent de nouvelles logiques de conception fondées sur la régénéralité, la sélectivité intrinsèque et la sobriété en réactifs (par exemple (Alemrajabi et al., 2022; Arrachart et al.,

2021; Zeng et al., 2023). Ces approches, encore limitées à l'échelle laboratoire, offrent néanmoins des perspectives crédibles à moyen terme, en particulier pour le traitement de ressources secondaires ou de résidus industriels riches en ETR (cf. 4.2.2.2). L'intérêt croissant pour ces systèmes est d'autant plus justifié que les études récentes soulignent leur potentiel de réduction significative des émissions fluorées ou radioactives, tout en conservant des performances de récupération acceptables. Toutefois, la transition vers des procédés plus vertueux suppose un effort soutenu d'optimisation technico-économique et une meilleure compréhension des mécanismes moléculaires et supramoléculaires impliqués, notamment pour assurer leur montée en échelle et leur intégration dans des chaînes de valorisation existante.

La littérature actuelle converge également sur un constat d'importance stratégique : l'indépendance technologique et la sécurisation des approvisionnements en ETR ne pourront reposer uniquement sur des transferts de technologies déjà matures, mais devront 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. Ces démarches témoignent d'une volonté croissante d'inscrire la chimie séparative des ETR dans une logique de souveraineté, d'économie circulaire et de durabilité.

Ainsi, 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 recherche académique, industrie et politique publique, afin de structurer une filière ETR à la fois performante, propre et stratégiquement autonome.

4.2.2.1.2.6 Réduction, purification ultime et production de métaux

4.2.2.1.2.6.1 Réduction

Les oxydes d'ETR sont les produits finaux des opérations de traitement et de séparation du minerai. Ils constituent donc la matière de départ naturelle pour la conversion en métal par réduction. Ces oxydes sont extrêmement stables, ce qui rend leur réduction en métal particulièrement difficile. Ces difficultés sont généralement aggravées par les propriétés physiques des ETR, telles que le point de fusion et la pression de vapeur. La conversion de l'oxyde d'ETR en halogénure d'ETR, puis la réduction de ce dernier en métal, est une procédure utile en raison de certaines caractéristiques intrinsèques des procédés de réduction des halogénures. L'électrolyse en sels fondus, telle qu'elle est appliquée à la production de métaux réactifs, est également pertinente pour la préparation des métaux d'ETR. Le point de fusion relativement bas de nombreux ETR est un avantage. Une autre possibilité intéressante est la préparation de métaux d'ETR via la formation préalable d'un alliage, à partir duquel le métal est ensuite récupéré. Dans cette voie, des méthodes de réduction chimiques ou électrolytiques peuvent être utilisées (C. Gupta & Krishnamurthy, 2005).

Chaque méthode de préparation de métaux d'ETR présente des avantages et des limites, en fonction de son applicabilité à des éléments spécifiques, de la pureté du produit, du rendement en métal, de la taille des lots, de la commodité opérationnelle et de l'économie du procédé (C. K. Gupta & Krishnamurthy, 2013).

Les métaux d'ETR figurent parmi les plus difficiles à obtenir à l'état pur. Plusieurs procédés ont été développés pour les produire avec des puretés variées. Ceux-ci incluent : (i) la réduction des chlorures ou fluorures anhydres, (ii) la réduction des oxydes d'ETR, (iii) l'électrolyse en sels fondus de chlorures d'ETR ou de mélanges oxyde—fluorure (Habashi, 2013; B. Mishra & Anderson, s. d.).

Une évaluation qualitative des éléments réactifs utilisables comme agents réducteurs pour la production des métaux d'ETR peut être obtenue à partir des énergies libres de formation des oxydes, fluorures et chlorures, et de leur dépendance à la température. Les données pour les ETR et certains agents

réducteurs potentiels indiquent que, dans les systèmes d'oxydes, l'ordre de stabilité est : $\text{CaO} > \text{ETR}_2\text{O}_3 > \text{MgO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$; parmi les fluorures : $\text{CaF}_2 > \text{ETRF}_3 > \text{LiF} > \text{NaF} > \text{MgF}_2 > \text{AlF}_3$; et parmi les chlorures : $\text{KCl} > \text{NaCl} \approx \text{CaCl}_2 > \text{ETRCl}_3 > \text{MgCl}_2 > \text{AlCl}_3$.

Cependant, cet ordre de stabilité peut être modifié dans les systèmes réels en changeant les activités de certains réactifs ou produits. En l'absence de telles modifications, les données ci-dessus indiquent que le calcium est le seul choix pour la réduction des oxydes et fluorures d'ETR, tandis que les chlorures peuvent également être réduits efficacement par le lithium, le sodium ou le potassium.

La faisabilité thermodynamique n'est cependant qu'un des nombreux facteurs déterminants de la praticabilité d'un procédé de réduction. D'autres éléments doivent être pris en compte, comme le point de fusion du laitier de calcia et l'exothermicité de la réaction, qui indiquent que la réduction calciothermique des oxydes d'ETR n'est pas une méthode appropriée pour la production de ces métaux. La voie des halogénures est donc privilégiée. Les ETR métalliques sont très réactifs, en particulier aux températures élevées nécessaires à leur préparation. La réduction des halogénures, qui consiste généralement en la réduction métallothermique d'halogénures purs anhydres avec des réducteurs métalliques purs, est une méthode standard de préparation des métaux réactifs, et elle est conçue comme un procédé sans oxygène. Toutefois, l'oxygène et d'autres impuretés interstitielles telles que le carbone et l'azote pénètrent dans le métal. Cela est dû à l'extrême stabilité des solutions et composés formés par ces éléments avec les métaux d'ETR. Bien que ce phénomène ne puisse être totalement évité, il peut être minimisé par un choix approprié des matériaux de conteneur et en effectuant toutes les opérations dans un environnement contrôlé.

Les méthodes de production des métaux d'ETR par réduction des chlorures sont résumées dans la figure 4.57 de Gupta et Krishnamurthy (C. Gupta & Krishnamurthy, 2005) et récemment décrites par Yu et al. (J.-W. Yu et al., 2025). En partant de l'oxyde d'ETR, le procédé comprend essentiellement deux étapes :

1. la préparation du trichlorure d'ETR anhydre ;
2. la réduction du trichlorure en métal.

Le procédé le plus ancien et le plus utilisé pour la préparation du chlorure est la voie humide : l'hexahydrate de trichlorure est cristallisé à partir d'une solution de HCl et d'oxyde d'ETR. Le chlorure hydraté est ensuite déshydraté par chauffage sous flux de HCl sec à pression réduite. En alternative, des méthodes sèches telles que la chloruration de l'oxyde par chauffage avec du chlorure d'ammonium ou la chloration de l'oxyde (ou même du concentré de minerai d'ETR) par chauffage avec du carbone sous flux de chlore sont également utilisées. Le chlorure peut ensuite être purifié par distillation.

Les principaux agents réducteurs du trichlorure d'ETR sont le calcium et le lithium. La réduction par le calcium a été utilisée pour la production des lanthanides à bas point de fusion, La, Ce, Pr, ainsi que Nd et Gd. La réduction du chlorure d'ETR par le lithium a été utilisée avec succès pour la majorité des ETR. Dans le procédé de l'USBM (US Bureau of Mine), le chlorure et le lithium sont chauffés ensemble dans un creuset en molybdène sous atmosphère inerte. Dans les procédés commerciaux, la réduction par vapeur de lithium du trichlorure a permis d'obtenir de l'yttrium et d'autres ETR à haut point de fusion. Le tantale était utilisé comme conteneur, et le laitier de LiCl était éliminé par distillation sous vide.

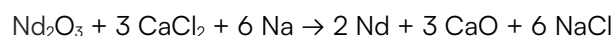
L'utilisation de fluorures d'ETR comme intermédiaires de réduction en métal permet d'éviter les problèmes associés à l'usage de chlorures hygroscopiques et volatils (J.-W. Yu et al., 2025). Cette méthode permet d'obtenir des métaux plus purs. Les méthodes sont résumées dans la figure 4.58 de Gupta et Krishnamurthy (C. Gupta & Krishnamurthy, 2005).

Parmi les trois grandes alternatives pour convertir l'oxyde d'ETR en fluorure, une méthode techniquement parfaite existe pour convertir le fluorure en métal. Le fluorure d'ETR et le calcium sont chargés dans un creuset en tantale, puis chauffés dans une atmosphère d'argon à environ 500°C au-dessus du point de

fusion du composant le plus réfractaire du mélange réactionnel. La réaction se termine en quelques minutes, avec une bonne séparation métal—laitier. Le Ca excédentaire et le laitier adhérent sont éliminés par fusion sous vide, ce qui permet d'obtenir un métal de haute pureté avec un rendement de 97 à 99 %. Ce procédé est applicable à tous les métaux d'ETR, quel que soit leur point de fusion, à l'exception de Sm, Eu et Yb, qui forment des halogénures divalents stables. Le lithium est le seul autre réducteur efficace, mais il reste moins performant que le calcium. Une variante importante du procédé, notamment pour l'Y, consiste à effectuer la réduction en présence de magnésium à basse température. Le magnésium est ensuite éliminé de l'alliage Y—Mg par distillation sous vide, et l'éponge d'Y est fondue sous vide.

Une limitation de la voie fluorure réside dans le coût élevé des composés fluorés, qui finissent en fluorure de calcium de faible valeur. Bien que le Sm, l'Eu et l'Yb ne puissent être produits par réduction des halogénures, leurs oxydes peuvent être réduits directement en métal *via* un procédé exploitant leur grande volatilité. Cette technique est similaire à celle utilisée pour le magnésium. Le La est l'un des métaux ETR les moins volatils. De plus, La_2O_3 possède l'une des chaleurs de formation les plus négatives. Dans ce procédé, un mélange intime de copeaux de La et d'oxyde d'ETR est chauffé dans un creuset en tantale équipé d'un long condenseur en tantale. Le La réduit l'oxyde d'ETR, et le métal produit, étant volatil, s'échappe et se condense. Le rendement en métal est élevé. Certains métaux tels que le Ce, le mischmétal, le zirconium et le thorium, aux caractéristiques similaires à celles du La, ont également été utilisés.

Ce procédé est illustré dans la figure 4.59 de Gupta et Krishnamurthy (C. Gupta & Krishnamurthy, 2005) avec d'autres méthodes spécifiques de réduction des oxydes. Un procédé plus récent pour la production métallothermique des métaux d'ETR est la réduction—extraction en sels fondus, développée par General Motors (R. A. Sharma, J. Metals, 1987, 39, 33-37). La réduction est réalisée en réagissant Nd_2O_3 avec du Ca dans un bain de sel fondu (CaCl_2 — NaCl), tout en extrayant simultanément le métal réduit dans un alliage fondu Nd—Zn ou Nd—Fe :



L'alliage Nd—Zn est ensuite traité sous vide pour éliminer le zinc et produire du Nd métallique. Le procédé est devenu plus attractif commercialement grâce à l'utilisation du sodium comme agent réducteur à la place du calcium.

Actuellement, les procédés électrolytiques représentent la majorité de la production commerciale de métaux d'ETR dans le monde. Le La, le Ce et le Pr ont des points de fusion qui permettent leur récupération à l'état liquide par électrolyse de chlorures fondus bon marché à des températures inférieures à 1100 °C. L'obtention des métaux à l'état liquide facilite la séparation laitier—métal, minimise la contamination du métal réduit, et permet une opération continue à grande échelle. Ces procédés électrolytiques sont plus simples et moins coûteux que les réductions métallothermiques complexes.

La faisabilité technique de produire en petites quantités des ETR métalliques à haut point de fusion (comme le Gd, le Dy, l'Y, en plus du Nd, du Pr et du didymium [Nd + Pr]) sous forme consolidée a été démontrée en utilisant des fluorures comme électrolytes à la place des chlorures. Ces études ont été menées dans des cellules haute température spécialement conçues pour fonctionner jusqu'à 1700 °C. Pour le Ce et le La, des cellules ont été développées et exploitées pour une production continue de ces métaux par électrolyse oxyde—fluorure.

Si les métaux d'ETR sont récupérés non pas sous forme pure, mais sous forme d'alliages binaires avec des points de fusion entre 600 et 1000 °C, le procédé électrolytique est applicable à tous les métaux d'ETR, avec les avantages supplémentaires d'une récupération liquide du métal et d'une température de fonctionnement plus basse. De plus, ce procédé permet de récupérer tous les métaux d'ETR, y compris les divalents stables, sous forme d'alliages. Si un métal relativement volatil comme le cadmium, le zinc ou le magnésium est utilisé comme élément d'alliage avec un ETR peu volatile à haut point de fusion (par exemple Nd, Gd, Y), l'alliage peut être distillé sous vide pour obtenir le métal pur.

La question d'un procédé de réduction techniquement parfait pour la préparation des métaux d'ETR a trouvé réponse dès les années 1950—1960, avec le développement des procédés de réduction par fluorure et de réduction directe lanthanothermique. Mais ces procédés sont coûteux, en raison du prix élevé des produits chimiques, du réacteur, et du caractère discontinu du procédé. Il en va de même des procédés électrolytiques, à l'exception de ceux pour la récupération de La, Ce et Pr dans des bains de chlorures. L'électrolyse oxyde—fluorure, bien que très efficace, présente des problèmes liés aux hautes températures, à la corrosion, à la faible solubilité des oxydes dans les fluorures fondus, et aux limitations de densité de courant afin de ne pas endommager l'anode. Le domaine reste donc ouvert à des améliorations et au développement de nouveaux procédés moins coûteux, mais permettant d'obtenir une pureté adéquate du métal final.

En résumé, sur la base de l'analyse de 6 articles (dont (C. K. Gupta & Krishnamurthy, 2013; C. Gupta & Krishnamurthy, 2005) et (J.-W. Yu et al., 2025)), la production de métaux d'ETR repose sur la réduction de leurs oxydes, produits finaux du traitement minéral. En raison de leur stabilité chimique et de leurs propriétés physiques (point de fusion élevé, faible pression de vapeur), la conversion directe des oxydes en métaux est complexe. Une voie courante consiste à former des halogénures (chlorures ou fluorures), puis à les réduire par voie métallothermique ou électrolytique. Les procédés métallothermiques mobilisent principalement le calcium ou le lithium comme agents réducteurs, tandis que les méthodes électrolytiques, notamment en sels fondus, permettent une récupération efficace des ETR sous forme liquide. La voie fluorure, bien qu'énergétiquement favorable et adaptée à l'obtention de produits très purs, reste onéreuse. Pour certains ETR volatils, des réductions directes par le lanthanothermie 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 techno-économique pour une production à grande échelle.

En conclusion, la diversité des approches développées pour la production des métaux d'ETR témoigne des contraintes physiques et chimiques associées à ces éléments, mais aussi de l'ingéniosité déployée pour les surmonter. Finalement, l'ensemble des données apporte des arguments en faveur d'une approche raisonnée, fondée sur un arbitrage entre pureté, rendement, coût énergétique et faisabilité industrielle. Les usages ciblés, qu'il s'agisse d'applications technologiques de pointe, de production à grande échelle ou de procédés économiquement viables, conditionnent fortement le choix des voies de réduction (C. Gupta & Krishnamurthy, 2005). Si certaines méthodes apparaissent plus adaptées à des productions de niche, d'autres, notamment les procédés électrolytiques en sels fondus ou les combinaisons hybrides, semblent porter les meilleures promesses pour une valorisation durable et compétitive des ETR. 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.

4.2.2.1.2.6.2 Purification ultime

Qu'ils soient produits par métallothermie ou par électrolyse en sels fondus, les ETR réduits sont généralement purs à 98—99%, voire à 99,5%. Dans certains cas, il est possible, en prenant soin d'utiliser des matières premières pures et un environnement contrôlé, de limiter la teneur totale en impuretés à environ 0,5%. Cependant, cet accroissement de pureté n'est souvent ni techniquement réalisable, ni économiquement viable, surtout à l'échelle industrielle. L'alternative générale à l'amélioration ou à la modification de la technique de réduction elle-même consiste à produire d'abord un métal relativement impur par une méthode de réduction économiquement acceptable, puis à le soumettre à une procédure de raffinage appropriée.

C'est une étape importante, car des ETR métalliques de qualité raisonnable, suffisamment purs pour de nombreuses applications, sont disponibles à des prix abordables. Par ailleurs, un métal qualifié d'ultrapur pour une application donnée peut s'avérer impur pour une autre. Cela met en évidence la nécessité d'adapter le procédé de purification à une application spécifique, en utilisant les métaux commerciaux comme matière de départ. L'étape de raffinage est donc une opération essentielle dans la chaîne de valeur des ETR.

Un certain nombre de procédés sont donc utilisés pour raffiner les ETR nouvellement réduits à différents niveaux de pureté. La nature et la concentration des impuretés à éliminer, ainsi que le niveau de pureté final souhaité, déterminent en général la technique de raffinage à employer. Dans le cas des ETR, les procédés applicables sont fortement influencés par les points de fusion et la pression de vapeur des métaux concernés. Aucune technique de purification ne permet une épuration complète à elle seule : une séquence de procédés est nécessaire pour éliminer toutes les impuretés (D. W. Jones et al., 1982).

La technique doit également répondre à d'autres critères, tels que la forme du produit, le rendement, la taille des lots, la simplicité opérationnelle et l'économie. En revanche, dans les opérations de recherche ou à petite échelle, l'accent est mis sur la pureté ultime atteignable, tandis que le rendement et le coût deviennent secondaires.

Les traitements par « pyrovide » comme la fusion sous vide, la distillation sous vide et la sublimation sont généralement les méthodes utilisées. L'électroraffinage en sels fondus n'a pas été largement appliqué au raffinage des ETR, tout comme les procédés à l'iode ou le procédé Van Arkel—de Boer. L'ultrapurification à 99,99% est cruciale pour certaines applications. Elle repose généralement sur la purification zonale et ses variantes, ainsi que sur l'électrotransport en phase solide.

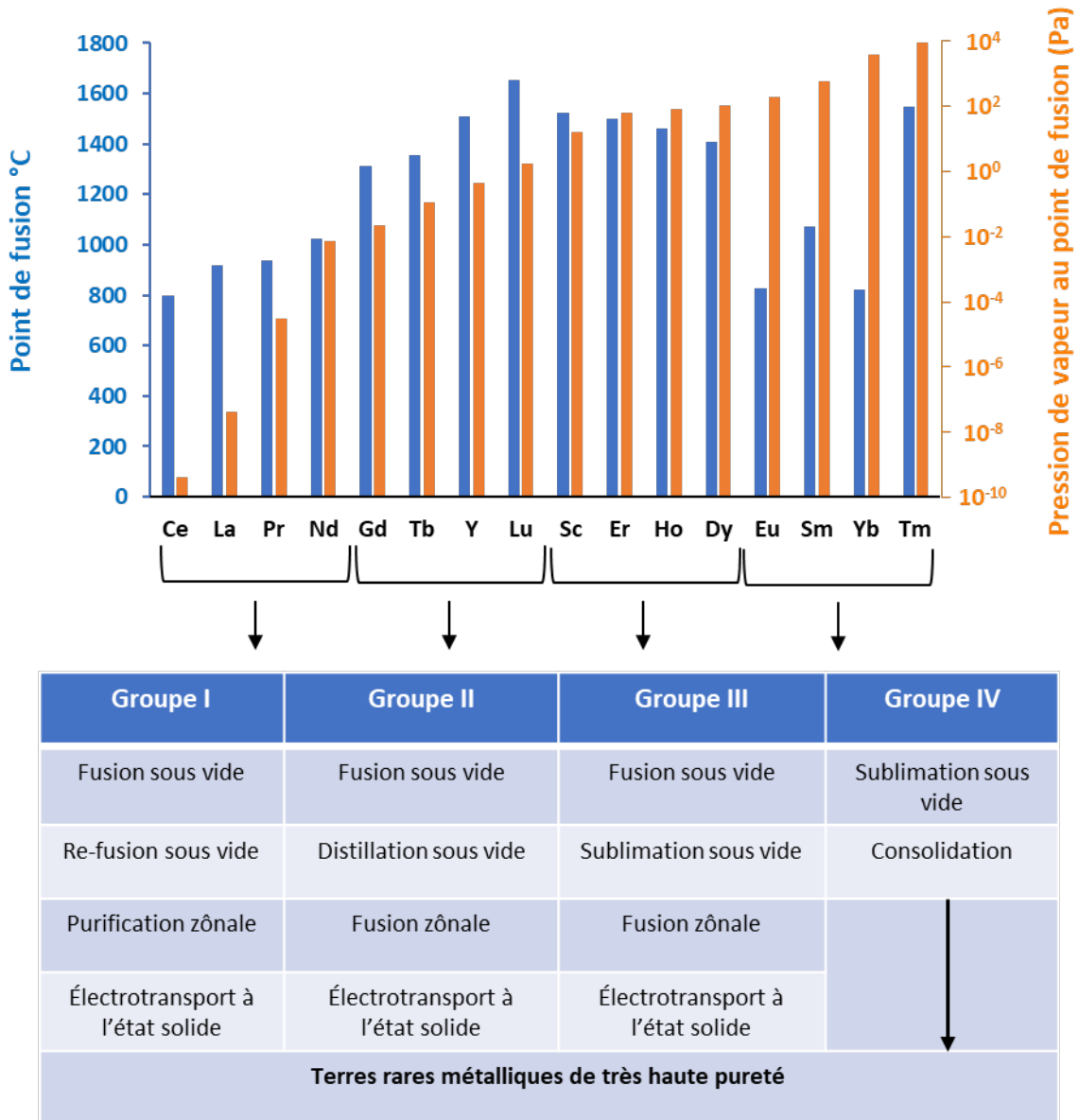


Figure 4.17 Méthodes de raffinage utilisées pour la production d'ETR ultra-pures (d'après les données de Jones et al. (D. W. Jones et al., 1982)).

Contrairement aux propriétés chimiques des ETR, assez semblables entre elles, leurs propriétés physiques varient fortement, influençant directement les méthodes de raffinage et d'ultrapurification.

Les impuretés présentes dans les métaux réduits proviennent de nombreuses sources dont les matières premières (composés intermédiaires d'ETR et réducteurs), l'environnement gazeux (ou le vide résiduel) du procédé de réduction, ainsi que les matériaux du creuset. Tout autre ETR que celui visé est également considéré comme impureté, bien que cela doive être géré dès l'étape de séparation avant réduction.

Parmi les impuretés d'origine, le calcium, lithium, magnésium, cérium, zirconium, thorium, zinc, fer, cobalt, nickel, cuivre, fluor, chlore et oxygène sont les plus communs. L'atmosphère du procédé est responsable de l'introduction de l'oxygène, de l'azote, de l'hydrogène et du carbone. Les creusets, en contact intime avec le métal en cours de réduction, peuvent aussi se corroder et contaminer le métal (fer, silicium, carbone, titane, zirconium, molybdène, tantale, etc.).

Il existe deux grandes catégories de procédés d'élimination des impuretés :

1. Ceux qui les éliminent du métal (purification conventionnelle),
2. Ceux qui les redistribuent pour obtenir une portion plus pure du métal (ultrapurification).

Dans les deux cas, un vide poussé ou ultra-poussé est requis pour empêcher les impuretés atmosphériques d'interagir avec le métal et pour faciliter l'élimination de ces dernières. Le traitement « pyrovide » (Lorenz & Bertau, 2020), qui consiste à chauffer le métal à des températures proches ou supérieures à son point de fusion sous vide dans un creuset en tantale, est la méthode la plus importante et la plus efficace.

Dans la fusion sous vide, les impuretés se volatilisent, laissant un métal plus pur. Dans la distillation ou la sublimation sous vide, c'est le métal lui-même qui se volatilise, se condense en produit pur, tandis que les impuretés restent dans le résidu. Le La, le Ce, le Pr et le Nd ayant une faible pression de vapeur, leur purification se fait par fusion sous vide et refusion. Le Gd, le Tb, l'Y et le Lu nécessitent en plus une distillation sous vide. Le Sc, l'Er, l'Ho et le Dy, plus volatils, sont purifiés par fusion puis sublimation. Quant à l'Eu, au Sm, à l'Yb et au Tm, uniquement très volatils, ils sont purifiés exclusivement par sublimation sous vide.

Les traitements par pyrovide sont réalisés dans des fours à induction ou à résistance, avec des creusets en tungstène ou en tantale pour la majorité des métaux, et par faisceau d'électrons pour l'Y. L'électroraffinage dans une cellule électrolytique sous atmosphère inerte a été appliqué à l'Y et au Gd, les deux plus difficiles à purifier par voie purement pyrométallurgique. Dans un bain $\text{LiCl}-\text{YCl}_3$, les impuretés métalliques sont éliminées ; dans un bain $\text{LiF}-\text{YF}_3$, l'oxygène l'est aussi. Pour le Gd, le bain contient toujours du GdF_3 en plus du LiF. Le métal électro-raffiné contient moins d'oxygène, mais la concentration finale dépend des impuretés présentes dans l'électrolyte.

La purification finale est assurée par fusion zonale et électrotransport en phase solide. La fusion zonale est utile pour éliminer les impuretés métalliques (tantale, tungstène) captées durant le traitement pyrovide (H. Liu et al., 2020). Elle nécessite un vide poussé ou une atmosphère inerte pure. Deux techniques sont utilisées :

1. le métal est placé dans un creuset horizontal, et la zone fondue est déplacée horizontalement,
2. ou le métal est suspendu verticalement, et la zone fondue est maintenue par tension de surface.

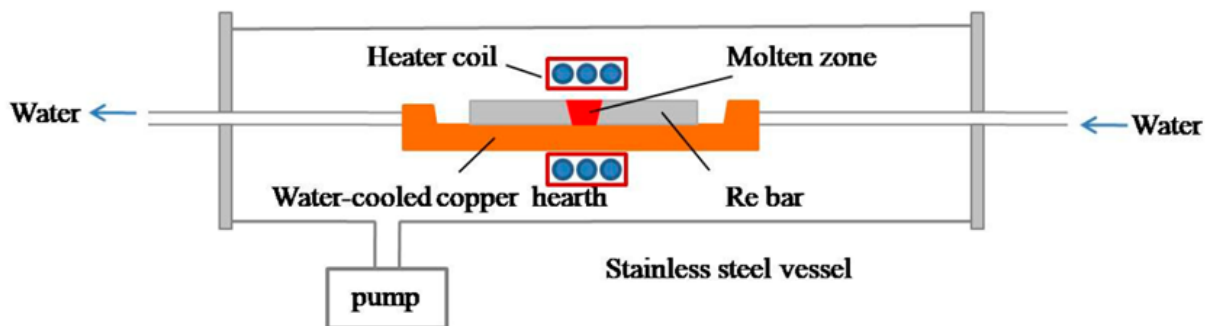


Figure 4.18 Fusion par zone d'arc à plasma (H. Liu et al., 2020). Sous licence CC BY.

Le chauffage est assuré par induction ou, de préférence, par faisceau d'électrons. Les premiers travaux portaient sur l'Y, puis sur le La, le Ce, le Gd et le Tb. Les impuretés métalliques comme le fer, le cuivre, le cobalt, le nickel, le tantale, le tungstène et l'aluminium sont efficacement transportées dans le sens du déplacement de la zone fondue.

Cependant, les impuretés interstitielles (oxygène, hydrogène, azote) suivent la direction opposée et ne sont pas efficacement éliminées. Ainsi, aucune partie du lingot n'est purifiée de manière uniforme. La fusion zonale reste toutefois utile, notamment combinée à l'électrotransport, qui permet une purification interstitielle.

L'électrotransport en phase solide consiste à faire passer un courant continu à travers une tige métallique dans un conteneur sous ultra-vide.

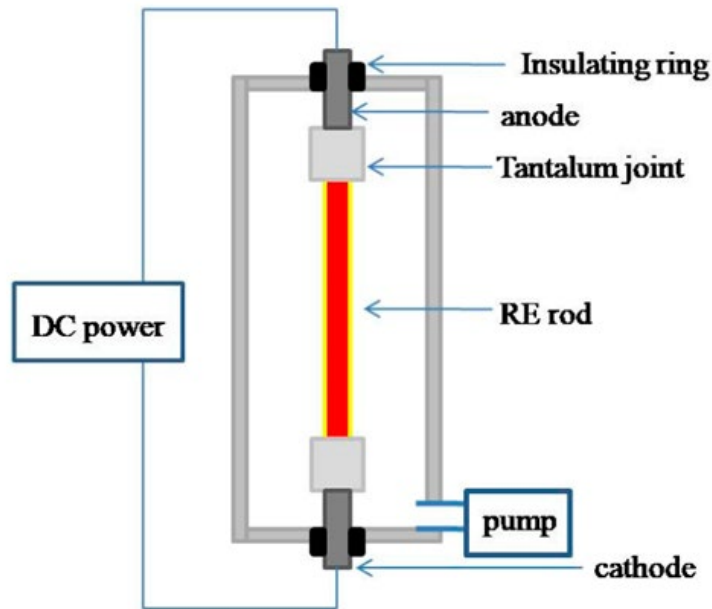


Figure 4.19 Electromigration en phase solide (H. Liu et al., 2020). Sous licence CC BY.

Les impuretés migrent sous l'effet du champ électrique et s'accumulent à une extrémité, laissant le reste du métal plus pur. Le courant chauffe également le métal, ce qui accélère la migration des impuretés. La pression de vapeur du métal à température d'électrotransport détermine si le procédé est mené sous vide ultra-poussé ou atmosphère inerte. Ce procédé a d'abord été appliqué à l'Y, puis au La, Pr, Nd, Gd, Tb, Er, Lu, Ce et Sc. Il est très difficile pour le Sm et l'Eu, et impossible pour le Tm et l'Yb.

L'oxygène, l'hydrogène, le carbone et l'azote représentent plus de 95% des impuretés dans les métaux commerciaux, et sont les plus sensibles à l'électrotransport. Le procédé est lent, limité à de petits échantillons, et seule une fraction du métal atteint une très haute pureté. La purification par fusion zonale est aussi une méthode de redistribution des impuretés, notamment des impuretés de substitution.

La combinaison des deux techniques permet d'obtenir une petite portion de métal hautement purifiée. Ces métaux ultrapurs sont essentiels à la recherche. D'autres techniques, comme le raffinage à l'iodure, ont été tentées mais sans succès concluant (Swider et al., 2015).

En résumé, la purification ultime des ETR repose sur des techniques adaptées au niveau d'impuretés résiduelles et aux exigences spécifiques des applications. Les traitements sous vide poussé, appelés "pyrovide", incluent fusion, distillation et sublimation sous vide, selon la pression de vapeur du métal. Les éléments volatils (Sm, Eu, Yb, Tm) sont purifiés par sublimation, tandis que d'autres nécessitent une séquence de traitements. La fusion zonale, efficace pour éliminer les impuretés métalliques, est souvent combinée à l'électrotransport en phase solide pour extraire les impuretés interstitielles (O, H, C, N). Ainsi la séquence fusion sous vide/distillation-sublimation sous vide/fusion zonale /électrotransport reste à ce

jour la méthode techniquement la plus aboutie pour convertir les métaux d'ETR réduits en métaux de la plus haute pureté possible (H. Liu et al., 2020).

Basées sur une littérature très limitée, les méthodes d'ultrapurification associent pyrovide, fusion zonale et électrotransport. Cette séquence, bien que lente et adaptée à de petits volumes, reste incontournable pour obtenir des REEs ultrapurs nécessaires aux recherches de pointe et à certaines applications technologiques exigeantes.

4.2.2.1.3 Bio-extraction

4.2.2.1.3.1 Bio-lixiviation des ressources primaires

La biolixiviation est une méthode prometteuse pour l'extraction des éléments de terres rares (ETR) à partir de minéraux tels que la monazite, la bastnäsité et la xenotime (Z. Chen et al., 2024; McGaughey et al., 2025). Contrairement aux procédés chimiques traditionnels, elle repose sur l'utilisation de micro-organismes capables de produire des acides organiques ou inorganiques, ou des agents complexants, facilitant la dissolution des ETR. La monazite, un phosphate riche en ETR légers comme le Ce, le La et le Nd, est particulièrement étudiée. Cependant, sa teneur en thorium pose des défis environnementaux et sanitaires.

Les argiles et oxydes de fer contenant des ETR constituent également des sources intéressantes. Bien que généralement moins concentrées en ETR que la monazite ou la bastnäsité, elles sont plus abondantes et facilement accessibles. La biolixiviation peut donc offrir une alternative écologique pour l'extraction de ces ressources stratégiques, essentielles aux technologies avancées et aux énergies renouvelables.

La biolixiviation de la monazite implique l'usage de bactéries (Fathollahzadeh et al., 2018) ou de micro-champignons (Brisson et al., 2016), qui produisent des acides (citrique, sulfurique) ou d'autres agents complexants capables de dissoudre les ETR présents dans le minéral. Cette approche présente plusieurs avantages : elle réduit l'utilisation de produits chimiques toxiques, diminue l'empreinte carbone et fonctionne généralement à des températures et pressions plus faibles, permettant des économies d'énergie.

Malgré son potentiel, la biolixiviation fait face à des défis, tels que des cinétiques de lixiviation lentes, la nécessité d'une forte activité microbienne, et la présence de contaminants comme le thorium. La recherche vise à optimiser ces procédés, et la biolixiviation émerge progressivement comme une alternative durable, surtout lorsqu'elle est combinée à d'autres techniques, telles que l'extraction par solvant ou les méthodes hydrométallurgiques.

4.2.2.1.3.1.1 Monazite and xenotime

Le xénotime et la monazite sont les phosphates d'ETR les plus courants et constituent les principaux porteurs d'ETR dans différents types de roches, jouant un rôle clé dans leur extraction industrielle. Ces dernières années, la biolixiviation de la monazite et du xénotime a connu des avancées significatives, notamment grâce à l'optimisation de souches microbiennes telles qu'*Acidithiobacillus ferrooxidans* et *Leptospirillum ferrooxidans*, capables de produire les acides et catalyseurs d'oxydation nécessaires à une lixiviation efficace. La bio-ingénierie a également été utilisée pour améliorer l'efficacité et la sélectivité de ces micro-organismes, tandis que le contrôle des paramètres opérationnels, tels que le pH, la température et la disponibilité des nutriments, contribue à augmenter le rendement global de lixiviation des ETR.

He et al. ont étudié les mécanismes de biolixiviation des ETR par *Bacillus thuringiensis* via la production d'acides organiques et l'acidification du milieu, favorisant la dissolution des phosphates résistants (Y. He

et al., 2024). Cette dissolution se produit par deux mécanismes principaux : l'attaque protonée et la formation de complexes avec des ligands, ce qui augmente la solubilité des ETR. Cependant, une partie des ETR libérés peut précipiter sous forme de phosphates métastables. De même, Fathollahzadeh et al. ont montré qu'une co-culture d'*A. ferrooxidans* autotrophe et acidophile et d'*Enterobacter aërogène* hétérotrophe est plus efficace que les cultures individuelles, probablement grâce à une interaction synergique générant à la fois des acides organiques et de l'acide sulfurique (Fathollahzadeh et al., 2018). Le consortium a permis de solubiliser les ETR (Ce, La, Nd, Pr et Y) jusqu'à 40 mg L⁻¹.

Plusieurs voies biologiques permettent la biolixiviation des ETR (cf. Figure 4.20 ci-dessous). Les protons issus de l'acide sulfurique produit par les microbes oxydant le soufre et les acides carboxyliques produits par les microbes utilisant du carbone organique peuvent lixivier les ETR des minéraux, tandis que les sulfates et acides organiques forment des complexes avec ces éléments (Das et al., 2019; Fathollahzadeh et al., 2019; Kaksonen et al., 2020). Les micro-organismes solubilisant le phosphate améliorent également la lixiviation des ETR à partir de minéraux et de déchets phosphatés (Reed et al., 2016; Schmitz et al., 2021), avec des rendements supérieurs à 90 % suite à l'excrétion d'acides organiques (Y. Zhao et al., 2024). Les microbes accumulant des polyphosphates réduisent la précipitation des ETR et facilitent leur solubilisation (Vera et al., 2022). De plus, l'oxydation microbienne du fer (Fe²⁺ → Fe³⁺) contribue à la précipitation du phosphate et à l'amélioration de la biolixiviation (Wilfert et al., 2015). La lixiviation peut se faire en mode "contact" ou "sans contact", selon que les microbes sont attachés aux surfaces minérales ou libres en solution. La lixiviation par contact a été montrée comme plus efficace sur la monazite (Fathollahzadeh et al., 2018).

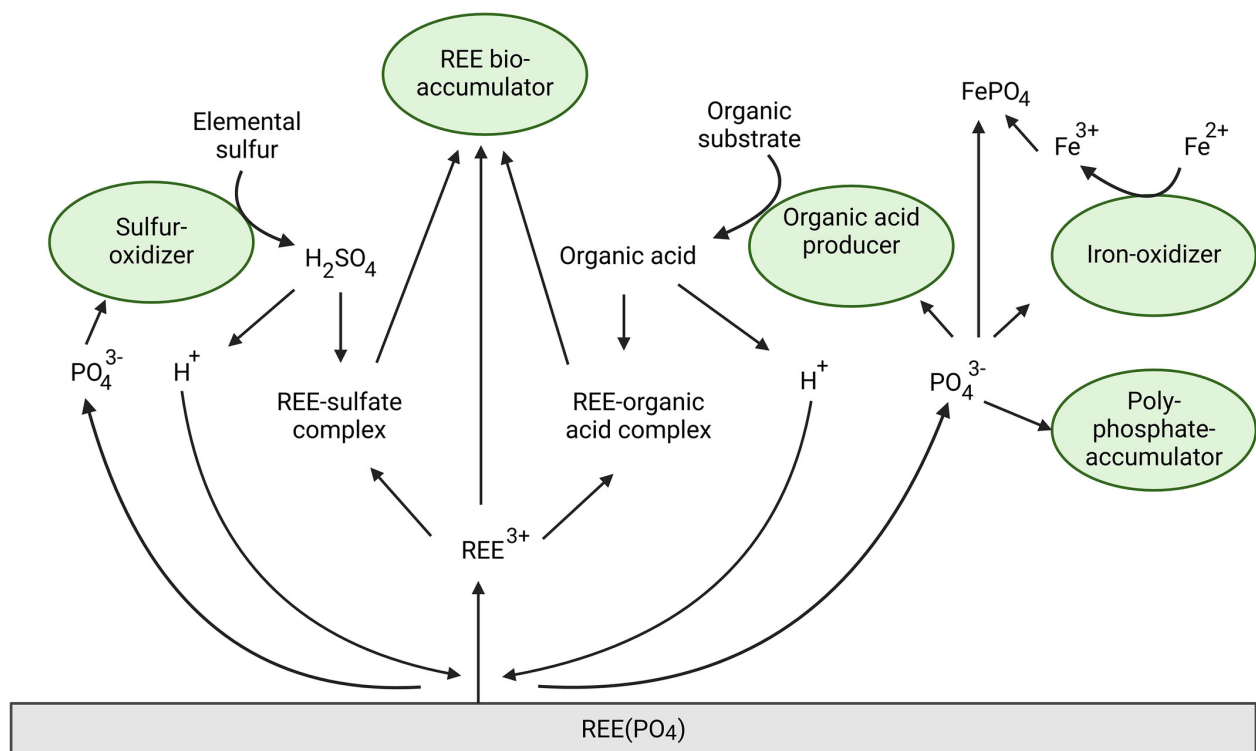


Figure 4.20 Rôles possibles des micro-organismes dans la biolixiviation et la récupération des ETR à partir de minéraux phosphatés. Les cellules microbiennes peuvent être attachées aux minéraux ou libres en solution, permettant une lixiviation par contact, sans contact ou coopérative. Les micro-organismes interviennent par plusieurs mécanismes : oxydation du soufre et des ions métalliques, bioaccumulation des ETR, accumulation de polyphosphates, et complexation des ETR avec les sulfates ou les acides organiques. Figure tirée de (McGaughey et al., 2025). Sous licence CC BY-NC-ND.

Enfin, Castro et al. ont étudié l'utilisation de *Burkholderia thailandensis* pour la solubilisation de la monazite (Castro et al., 2023). La bactérie a libéré jusqu'à 8,3 mg L⁻¹ d'ETR après 15 jours dans un bouillon contenant 1 % de monazite. Les rhamnolipides produits par *B. thailandensis* ont montré un rôle potentiel dans l'amélioration de la biolixiviation, avec une solubilisation maximale de 9,36 mg L⁻¹ à la concentration micellaire critique (CMC) pour des rhamnolipides commerciaux.

La biolixiviation de la monazite représente ainsi une voie prometteuse pour l'extraction durable des ETR. Bien qu'elle ne soit pas encore largement utilisée à l'échelle industrielle, son potentiel pour transformer l'industrie minière des ETR est significatif, particulièrement dans le contexte des technologies vertes.

4.2.2.1.3.1.2 Bastnäsité

En ce qui concerne la bastnäsité, seules quelques études ont rapporté la récupération des ETR par biolixiviation. Zhang et al. ont examiné la faisabilité de la lixiviation des ETR de la bastnäsité par *Micrococcus* sp, *Micromonospora* sp et *Streptomyces* sp (L. Zhang et al., 2018). Bien que faisable, l'efficacité de la lixiviation n'était que de 0,08 %, ce qui pourrait être dû à la faible concentration de sucre utilisée (1 g/L de glucose) et à la production insuffisante d'acides organiques qui en résulte.

4.2.2.1.3.1.3 Argiles à adsorption d'ions

Les argiles à adsorption d'ions, contrairement à la monazite, au xénotime et à la bastnäsité, contiennent principalement des ETR moyens et lourds sous forme ionique, ce qui les rend plus propices à la lixiviation. La lixiviation conventionnelle à l'aide de sulfate d'ammonium soulève des préoccupations environnementales, d'où l'intérêt pour des solutions de remplacement respectueuses de l'environnement (J. Li, 2024; Shen et al., 2023). Les acides organiques (gluconate, citrate, oxalate) issus de micro-organismes, tels que ceux produits par *Aspergillus niger*, ont démontré une efficacité de lixiviation élevée, atteignant jusqu'à 100 % dans des conditions optimisées (Meng et al., 2022). Des rapports S/L élevés et la facilité de désorption des ETR contribuent aux performances supérieures des procédés de biolixiviation. Des essais à l'échelle pilote ont confirmé la faisabilité de cette approche, avec des rendements atteignant 95 % (Meng et al., 2023). Dans une récente étude, Li décrit l'évolution des techniques d'extraction des ETR à partir des argiles ioniques au cours de ces dernières décennies et synthétise les technologies de biolixiviation et leur potentiel d'application (types de micro-organismes utilisés, les mécanismes de biolixiviation, les performances d'extraction ainsi que les stratégies d'optimisation) (J. Li, 2024).

4.2.2.1.3.1.4 Résumé

En résumé, à l'instar de la biolixiviation mise en œuvre pour la mine urbaine (cf. partie 3.2 du rapport), cette approche représente également **une voie émergente et prometteuse pour une extraction durable des ETR à partir de minerais primaires**. 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 (Z. 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 (Y. 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., 2022, 2023), d'autres comme la bastnäsité affichent encore des rendements faibles, nécessitant des recherches supplémentaires (L. 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**.

4.2.2.1.3.2 Phytominage des ETR, une stratégie écologique et prometteuse d'extraction verte

Le phytominage, ou agrominage d'ETR, se distingue comme une méthode innovante, respectueuse de l'environnement, et économiquement porteuse (Dinh et al., 2022; Rabbani et al., 2024).

Le phytominage repose sur l'utilisation de plantes capables d'extraire et d'accumuler les ETR dans leurs tissus (feuilles, tiges, racines). Ces éléments sont ensuite récupérés par traitement de la biomasse récoltée : séchage, broyage, lixiviation, purification, voire calcination (Jally et al., 2021). Ce procédé offre une alternative écologique aux méthodes minières classiques, réduisant les impacts liés à l'érosion, à la pollution et à la destruction des écosystèmes. Il permet également de valoriser des sources secondaires comme les résidus de monazite, les cendres volantes de charbon (CFA), ou les déchets miniers (Peiravi et al., 2017, 2021; Rabbani et al., 2024).

Certaines espèces végétales montrent une affinité exceptionnelle pour les ETR. *Dicranopteris linearis*, une fougère tropicale, peut accumuler jusqu'à 6900 mg·kg⁻¹ d'ETR dans ses feuilles sans signe apparent de toxicité (Chour et al., 2018). De même, *Phytolacca americana*, plante herbacée vivace à croissance rapide, atteint des concentrations de 0,1 % d'ETR dans ses pousses (Grosjean et al., 2020). D'autres espèces comme *Pronephrium simplex* et *Blechnum orientale* présentent également un potentiel intéressant.

Ces plantes utilisent des mécanismes sophistiqués de tolérance et de compartimentation : les ETR sont souvent localisés dans des zones nécrosées des feuilles, en co-localisation avec des éléments comme le manganèse ou le silicium. Ce phénomène de compartimentation sacrificielle permet de piéger les métaux dans des cellules mortes, préservant ainsi l'intégrité des tissus actifs (W.-S. Liu et al., 2020).

Plusieurs méthodes sont testées pour extraire les ETR de la biomasse végétale :

- Lixiviation acide (HNO₃ à 0,5 M), suivie d'une purification par résine échangeuse d'ions ;
- Précipitation par acide oxalique et calcination des cendres (Chour et al., 2018, 2020) ;
- Prétraitement alcalin pour les biomasses riches en silicium et aluminium (Jally et al., 2021) ;
- Procédé organosolv acide, associant éthanol et acide sulfurique, permettant une extraction de haute pureté des ETR tout en valorisant des co-produits comme la lignine et les phénols (C. Xie et al., 2023).

Ces techniques doivent composer avec la complexité chimique de la biomasse, notamment la présence d'éléments interférents comme le silicium ou l'aluminium.

Le phytominage s'inscrit dans une logique d'économie circulaire. En plus de l'extraction de métaux, il contribue à la réhabilitation des sols dégradés en améliorant leur structure, leur fertilité et leur activité biologique (van der Ent et al., 2015). Il est particulièrement adapté aux sites faiblement concentrés ou pollués, non exploitables par les méthodes traditionnelles.

Malgré les avancées, plusieurs verrous subsistent (Grosjean et al., 2024):

- Les mécanismes cellulaires d'absorption, de translocation et de stockage des ETR restent mal compris, notamment chez les plantes non modèles comme les fougères ;
- Le rôle du microbiote rhizosphérique dans la mobilité ou la stabilisation des ETR n'est que partiellement exploré (phytominage des terres rares amélioré par bioaugmentation (Jalali & Lebeau, 2021; McGaughey et al., 2025));
- La sélection génétique et agronomique de plantes performantes nécessite le recours aux outils "omiques" (génomique, transcriptomique...), encore peu utilisés.

Par ailleurs, les études portent majoritairement sur les ETR légers, alors que les ETR lourds, plus rares et stratégiques, mériteraient une attention accrue (Grosjean et al., 2020).

Aujourd'hui, le phytominage reste encore à un stade préindustriel, avec des rendements modérés. Cependant, dans un contexte de prix élevés des ETR et de tensions géopolitiques sur leur approvisionnement, cette méthode pourrait devenir économiquement intéressante. Elle pourrait être intégrée à des bioraffineries territorialisées, combinant extraction minérale, phytoremédiation et production de biomasse valorisable. Des essais à grande échelle et des analyses de cycle de vie pour évaluer la viabilité économique et environnementale de cette filière ont été initiés (Rabbani et al., 2024). Si ces validations confirment son potentiel, le phytominage pourrait contribuer à un approvisionnement plus durable en ETR.

4.2.2.2 Sources secondaires

Les sources secondaires d'ETR restent aujourd'hui largement sous-exploitées, bien qu'elles fassent l'objet d'un intérêt croissant dans la recherche scientifique. Les études récentes soulignent en effet leur potentiel significatif, au-delà des seules ressources issues de la mine urbaine (abordées au chapitre 3) (Binnemans et al., 2015; Peiravi et al., 2021).

Parmi ces sources, on retrouve notamment les déchets miniers et industriels : cendres de charbon, résidus de bauxite, phosphogypse, drainages miniers acides, ou encore déchets issus de l'extraction de divers métaux (voir section 4.1). Cette section dresse un panorama des travaux développant des méthodologies innovantes pour extraire les ETR à partir de ces différentes sources secondaires.

4.2.2.2.1 Drainages miniers acides

Plusieurs approches ont été développées pour extraire les ETR à partir des drainages miniers acides (AMD), en combinant efficacité de récupération et réduction des impacts environnementaux. Ces méthodes reposent sur des mécanismes physico-chimiques variés, allant de la précipitation sélective à des techniques plus avancées comme les membranes ou les polymères. Elles visent non seulement à valoriser ces ressources secondaires, mais aussi à améliorer la gestion des effluents miniers.

4.2.2.2.1.1 Extraction par précipitation

Les procédés de neutralisation des eaux acides et de précipitation permettent une dépollution tout en extrayant les métaux de manière séquentielle, avec en prime la captation de CO₂. La précipitation en plusieurs étapes permet une séparation progressive du Fe, de l'Al et des ETR (Behzad Vaziri Hassas et al., 2023). Des expériences menées en Pennsylvanie ont montré que la carbonatation des AMD permet de récupérer jusqu'à 85 % des ETR à un pH inférieur à 7 (Behzad Vaziri Hassas et al., 2020).

4.2.2.2.1.2 Extraction par polymères

L'utilisation de nanoparticules polymériques, comme les dendrimères PAMAM, permet une adsorption efficace des ETR après traitement alcalin des AMD (Anyik John Leo et al., 2022). Ces polymères ont une forte capacité d'adsorption, facilitant la récupération des métaux.

4.2.2.2.1.3 Extraction par membranes

Les membranes apparaissent comme une solution prometteuse pour la séparation des ETR, notamment grâce aux systèmes à base d'adsorbants modifiés aux amines (Fonseka et al., 2023). L'étude a démontré des taux de récupération élevés avec une pureté significative de l'Europium.

4.2.2.2.1.4 Extraction par échange d'ions

Les résines échangeuses d'ions offrent une alternative durable, en particulier dans des environnements riches en sulfates, comme les AMD des gisements de Minas Gerais (Gabriela Cordeiro Silva et al., 2022). L'élution avec du CaCl_2 permet une récupération efficace de La et Y.

4.2.2.2.1.5 Barrières de remédiation passives

Les barrières de remédiation passives concentrent les ETR dans des précipités solides issus de la neutralisation acide. Les systèmes naturels de drainage calcaire et de bassins d'écoulement vertical sont jusqu'à trois fois plus efficaces que les traitements chimiques (Hedin et al., 2019). L'application sur les charbons de l'Est américain a montré des concentrations allant jusqu'à 1950 mg/kg d'ETR, comparables à celles des gisements de type "ion adsorption".

4.2.2.2.1.6 Lessivage séquentiel

Les tests de lessivage séquentiel sur les AMD de charbon des Appalaches ont évalué la rentabilité de l'extraction des ETR (Fritz et al., 2021). Les coûts estimés de production de concentré d'ETR mélangé varient entre 3400 et 5900 \$/kg, ce qui limite la viabilité du procédé sans soutien financier.

4.2.2.2.2 Résidus de bauxite, cendres de charbon et phosphogypse

Les résidus de bauxite, cendres de charbon et phosphogypses sont des sources secondaires potentiellement intéressantes d'ETR (section 4.1) (Binnemans et al., 2015). Un des avantages de ces sources secondaires par rapport à une source primaire est la granulométrie très fine de ces matériaux qui permet de s'affranchir d'une étape de broyage avant extraction, ce dernier ayant déjà été réalisé lors de l'exploitation de la source primaire dont ils sont issus (avant extraction de l'alumine des phosphates ou bien avant combustion du charbon).

Si les grandes approches développées pour extraire les ETR à partir de ces sources secondaires sont identiques à celles décrites dans le cas de la mine urbaine (hydrométallurgie, pyrométallurgie, biométallurgie), des spécificités liées à la nature de la matrice dans laquelle sont localisés les ETR sont à noter. De plus, la spéciation des ETR dépend du type de résidu (ex. : la spéciation des ETR est très différente dans les cendres de charbon et dans le phosphogypse) mais aussi pour un type de résidu donné, la spéciation dépend de l'origine de la matière première (ex. : la spéciation des ETR dans les

résidus de bauxite est différente en fonction de l'origine de la bauxite (karstique vs latéritique) (Couturier et al., 2024)). Des stratégies d'extraction spécifiques à la nature des résidus sans grande innovation environnementale ont ainsi été développées.

Concernant les **résidus de bauxite**, deux stratégies sont largement décrites dans la littérature pour l'extraction des ETR qui ne considèrent que très rarement les potentielles variations de spéciation en fonction de l'origine de la bauxite: lixiviation directe ou après une première étape de pyrométallurgie pour élimination du Fe et/ou Al ; ces deux approches sont largement discutées dans des articles de synthèse (Binnemans et al., 2015; Borra, Chenna Rao et al., 2016b; Swain et al., 2022; Zinoveev et al., 2021).

Pour la première stratégie, l'utilisation d'acides minéraux forts pour la lixiviation des ETR dans les résidus de bauxite a fait l'objet de nombreuses études qui sont répertoriées dans les articles de synthèse cités ci-dessus. Ces expériences sont généralement réalisées dans des conditions très acides avec une sélectivité limitée et nécessitent des équipements adaptés contre la corrosion. De plus, ces procédés génèrent de grandes quantités de déchets acides. Enfin, dans certains cas, la formation de gels de silice peut compliquer l'extraction des ETR (Zinoveev et al., 2021).

Dans le cadre de la deuxième stratégie, la lixiviation des ETR succède à un traitement pyrométallurgique qui vise à éliminer le fer et l'aluminium principalement. La lixiviation est alors réalisée sur un résidu de ce traitement thermique dont les propriétés varient en fonction de ce pré-traitement (température du procédé thermique, vitesse de baisse de la température, etc.). Ces procédés sont également largement discutés dans les articles de synthèse. L'avantage principal de cette approche est de libérer le Sc piégé dans les oxydes de fer notamment (Borra et al., 2016; Rivera et al., 2019).

Concernant les **phosphogypses**, la lixiviation des ETR est contrôlée par la solubilité du gypse (S. Li et al., 2022; Mukaba et al., 2021) qui emprisonne une grande partie des ETR. Le procédé largement décrit utilise des acides minéraux forts (principalement H_2SO_4 , HNO_3 et HCl), le gypse étant soluble en condition acide. Plusieurs études synthétisent ces travaux (Binnemans et al., 2015; Lambert et al., 2018; Mukaba et al., 2021). Il a également été montré que HNO_3 et HCl sont plus efficaces que H_2SO_4 , le gypse étant moins soluble en présence d'ions SO_4^{2-} (Common ion effect en anglais) (S. Li et al., 2022; S.-B. Lu et al., 2023). HCl est décrit dans la littérature comme étant plus bénin pour l'environnement et moins coûteux que HNO_3 (S. Li et al., 2022).

Ces procédés permettent une lixiviation souvent partielle des ETR (entre 12 et 86%) qui varie en fonction de l'origine du minerai et des conditions expérimentales (nature et concentration en acide, température, rapport L/S). À titre d'exemple, dans des conditions similaires, environ 50% des ETR sont dissous avec de l'acide sulfurique à 0,5 M sur un phosphogypse espagnol (Cánovas et al., 2019) alors que moins de 15% sont dissous à cette même concentration pour un phosphogypse Russe (Rychkov et al., 2018). L'optimisation par plan d'expérience a permis d'atteindre des rendements proches de 90-100% à 45°C dans HCl (2,5M) et HNO_3 (2,1M) pour un phosphogypse canadien faiblement concentré en ETR (295,2mg/kg) (S. Li et al., 2022). Ces différences de rendement observées, parfois dans des conditions de lixiviation similaire, illustrent une nouvelle fois l'effet de la nature du résidu et de la spéciation des ETR sur leur lixiviation.

Enfin, concernant les **cendres de charbon**, les phases vitreuses amorphes aluminosilicatées qui contiennent majoritairement les ETR (cf. partie 4.1 du rapport) sont des phases complexes à solubiliser et nécessitent des conditions de traitement extrêmes. Un prétraitement est donc nécessaire pour dissoudre le verre amorphe afin d'augmenter l'efficacité de la récupération des ETR.

Les approches classiques de lixiviation acide couplées avec une étape de dissolution alcaline et/ou une étape pyrométallurgique (grillage alcalin la plupart du temps) sont décrites dans plusieurs articles de synthèse récents (Fu et al., 2022; Rybak & Rybak, 2021; Vilakazi et al., 2022). À titre d'exemple, un grillage alcalin en présence de NaOH suivi d'une lixiviation acide permet de récupérer plus de 90% des terres à partir de diverses cendres volantes issues de différents bassins collectés aux États-Unis (Taggart et al.,

2018). Pour une des cendres (Powder River) l'étape de lixiviation acide suffit. En effet, comme pour les résidus de bauxite ou le phosphogypse, l'extractibilité des ETR dépend de l'origine du charbon (Taggart et al., 2016) qui entraîne des différences de spéciation dans les cendres et donc de solubilité. Une autre étude a montré par exemple que les cendres volantes dans lesquelles les ETR sont associés à la matrice vitreuse sont peu solubles lors d'une lixiviation acide (30-70% de dissolution) contrairement à des cendres pour lesquelles les ETR sont sous forme d'oxyde ou associées à l'apatite (100% de dissolution) (P. Liu et al., 2019). Le grillage alcalin est donc recommandé pour les cendres les plus récalcitrantes afin d'altérer la matrice vitreuse et libérer les ETR (P. Liu et al., 2019; Taggart et al., 2018).

La très grande majorité des études sur l'extraction des ETR à partir de résidus de bauxite, de phosphogypse ou de cendres de charbon citées ci-dessus décrivent une étape de lixiviation par des acides minéraux parfois couplée avec une étape de traitement thermique afin de libérer les ETR de leur phase porteuse ou pour éliminer des phases majeures potentiellement problématiques pour l'extraction. Bien que souvent efficaces en termes de rendement de lixiviation, ces études présentent un certain nombre de limites mis en avant par la communauté scientifique :

- Faible sélectivité de la lixiviation, nécessitant de nombreuses étapes d'extraction et purification.
- Génération de grandes quantités de solutions acides à traiter ainsi que de résidus solides à gérer (stockage).
- Faible rentabilité économique des procédés développés par rapport à la production primaire.

Face à ce constat, plusieurs études proposent des stratégies innovantes et plus responsables pour améliorer les rendements et/ou la sélectivité d'extraction et limiter l'impact environnemental des procédés:

- Pré-traitement physique afin de concentrer les ETR avant extraction ou d'altérer la matrice afin de faciliter leur mise en solution.
- Utilisation de méthodes d'activation physique ou chimique *in situ*.
- Amélioration de la sélectivité d'extraction afin de limiter le nombre d'étapes et réduire ainsi l'impact environnemental global du procédé (utilisation d'acides organiques).
- Développement de procédés extractifs non conventionnels (e.g. ionométallurgie, conditions supercritiques).
- Développement de bioprocédés.
- Approches zéro-déchets afin de valoriser l'ensemble de la matrice sur des applications à plus ou moins haute valeur ajoutée. Ces approches permettent également d'éviter le coût (économique, social, environnemental) du stockage des résidus.

Par la suite nous nous focaliserons principalement sur des procédés alternatifs d'extraction des ETR qui répondent aux enjeux listés ci-dessus.

4.2.2.2.1 Pré-traitement des résidus

Un des avantages de ces matériaux est leur granulométrie très fine ce qui permet de réaliser la lixiviation sans étape préalable de broyage, étape généralement très énergivore. Pour la même raison, les étapes de pré-concentration physique des phases porteuses des ETR par séparation densimétrique, de taille ou magnétique sont généralement peu efficaces même si quelques tentatives ont été réalisées. Par exemple, un pré-traitement par séparation de taille et magnétique permet de concentrer les ETR dans une fraction fine non magnétique pour des cendres de charbon produites en Chine (Pan et al., 2020). Une lixiviation acide de cette fraction permet la dissolution de 80% des ETR contre 40% sur le matériau de départ. Cependant, plus de 50% des ETR sont perdus dans les autres fractions, ce qui questionne le véritable gain d'un tel prétraitement. Des résultats similaires ont été observés sur des cendres produites en

Colombie (Santos, Ana Claudia et al., 2022). Une autre étude montre qu'une séparation densimétrique à l'aide de métatungstate de lithium est plus efficace qu'une séparation magnétique ou par taille pour concentrer les ETR de cendres volantes mais les masses récupérées enrichies et/ou les facteurs d'enrichissement sont faibles (Lin et al., 2017). De plus la mise en œuvre d'une séparation densimétrique à l'échelle industrielle peut s'avérer complexe avec un coût environnemental élevé par rapport au gain obtenu.

D'autres stratégies de pré-traitements physiques tels que l'altération physique des résidus par micro-ondes ont été testées. L'équipe de G. Azimi a montré qu'un prétraitement micro-onde des résidus de bauxite (Reid et al., 2017) ou du phosphogypse (Lambert et al., 2018) permet d'améliorer légèrement les rendements de lixiviation acide des ETR (augmentation des rendements de 10 à 20%). Un tel traitement permet d'altérer la structure des particules (formation de crevasses et pores) augmentant ainsi la surface de contact entre la solution acide et les phases porteuses favorisant ainsi la libération des ETR. L'effet du traitement micro-onde sur la sélectivité de lixiviation n'est cependant pas présentée. La mise à l'échelle d'un tel procédé nécessiterait d'être étudié plus en détail en termes de faisabilité technique, coût et énergie.

En conclusion, contrairement à la mine urbaine, les approches de prétraitements physiques des sources secondaires (concentration par taille, densimétrie, magnétique et altération physique des résidus) pour améliorer les rendements de lixiviation semblent peu efficaces. La faible granulométrie des particules et la complexité des phases porteuses des ETR (forte agglomération/aggrégation des particules, multiples phases porteuses, distribution diffuse des ETR dans la matrice) sont probablement à l'origine de ces résultats peu convaincants et expliquent le peu d'études consacrées à cette étape de pré-traitement physique.

4.2.2.2.2 Méthodes d'activation physiques et chimiques *in situ*

Des méthodes d'activation physiques telles que la dispersion par ultrasons permettent d'améliorer les rendements de lixiviation. L'effet de cavitation provoquée par une exposition aux ultrasons d'une solution de phosphogypse et d'acide sulfurique permet d'augmenter les rendements de lixiviation des ETR de 20% ainsi que la cinétique de réaction avec un équilibre atteint au bout de 20 min (Lutke et al., 2023). L'implosion des bulles de cavitation près des particules de phosphogypse modifie leur morphologie en formant des fractures et des fissures. De plus, cela favorise les collisions entre elles et réduisant ainsi leur taille. Enfin, l'agitation ultrasonique améliore le mouvement convectif, augmentant la surface de contact entre le solide et l'agent de lixiviation. Ces effets facilitent ainsi le transfert de masse et accélèrent la cinétique de lixiviation des ETR.

Parmi les méthodes d'activation chimique, le procédé appelé "*Resin-in-Pulp*" (ou *RIP* en anglais) est un procédé hydrométallurgique qui consiste à ajouter une résine chélatante ou échangeuse d'ions directement dans la solution de lixiviation pour extraire sélectivement des métaux d'intérêt. Virolainen et al. ont testé ces deux types de résine pour récupérer sélectivement les terres rares d'un phosphogypse dans une solution en présence d'acides minéraux (Virolainen et al., 2019). Les **résines échangeuses d'ions** retiennent les ions d'ETR par attraction électrostatique, mais sont peu sélective vis-à-vis du calcium contenu dans le phosphogypse. En revanche, les **résines chélatantes** adsorbent spécifiquement les ETR formant des complexes stables augmentant ainsi la sélectivité d'extraction notamment vis-à-vis du calcium. En revanche l'étape d'élution est plus complexe dans le cas des résines chélatantes comparées aux résines échangeuses d'ions. Ce procédé combiné avec une étape de broyage et une lixiviation sous ultrason a permis de multiplier par un facteur 4 la lixiviation des ETR d'un phosphogypse (de 18 à 72% de lixiviation) (Rychkov et al., 2018).

4.2.2.2.3 Sélectivité d'extraction

La sélectivité d'extraction peut-être un objectif à atteindre à diverses étapes du procédé (prétraitement, lixiviation, extraction) afin de limiter le nombre d'étapes totales d'extraction réduisant ainsi son impact global.

Certains acides minéraux forts peuvent permettre d'atteindre une certaine sélectivité. Par exemple Canovas et al. ont mesuré l'ensemble des éléments lixiviés par HNO_3 et H_2SO_4 d'un phosphogypse (Cánovas et al., 2019). Ils montrent que 46-58% d'ETR sont dissoutes dans l'acide sulfurique à 0,5 M alors que plus de 80% sont dissoutes dans HNO_3 , 3M. En revanche, moins de 6% de Ca est dissous dans le premier cas contre 71% dans le 2^{ème} cas. En se projetant vers une application industrielle, les auteurs privilégient la sélectivité au rendement qui permettrait de réduire le coût et l'impact environnemental du procédé d'extraction. Cependant, mis à part quelques cas particuliers comme celui-ci, la majorité des lixiviations avec des acides minéraux forts sont peu sélectives. Diverses stratégies alternatives à la lixiviation par des acides minéraux forts permettent d'améliorer la sélectivité d'extraction des ETR. Ces approches sélectives qui incluent la combinaison de traitements hydro-pyrométallurgiques, de la lixiviation par des acides organiques sont décrits ci-dessous.

4.2.2.2.3.1 Combinaison de traitement hydro- et pyrométallurgiques

Si un pré-traitement thermique est souvent utilisé pour libérer les ETR de leur phase porteuse et ainsi augmenter les rendements d'extraction, il peut parfois être utilisé pour améliorer sa sélectivité. C'est le cas notamment de plusieurs études réalisées sur des résidus de bauxite. Une des difficultés de la lixiviation sélective est de s'affranchir des éléments de la matrice tels que le Fe, Si ou l'Al, présents en fortes concentrations ou bien encore le Ca dont le comportement physico-chimique est relativement proche de celui des ETR (rayon ionique proche). Divers traitements thermiques tels que la sulfatation, le grillage, fusion réductrice permettent d'éliminer certains éléments de la matrice (Ca, Al, Fe principalement) avant l'étape de lixiviation acide des ETR (Borra et al., 2016; Zinoveev et al., 2021) permettant ainsi d'améliorer la sélectivité.

À titre d'exemple, une extraction multiétapes a été proposée par Li et al. pour séparer dans un premier temps le fer par dissolution dans l'acide oxalique puis le Calcium après grillage de résidus de bauxite à 520°C (conversion du Ca en CaCO_3) et dissolution dans de l'acide dilué à pH neutre (W. Li et al., 2022). Dans une dernière étape, les ETR sont lixiviés dans de l'acide sulfurique. Dans les conditions optimales, 60 à 80% des ETR sont lixiviés alors que moins de 4% de Fe, Na, Ca, Ti et Al sont dissous.

Dans la même philosophie, une première étape de sulfatation des résidus de bauxite permet de transformer les oxydes de métaux en sulfates (Borra et al., 2016). Une deuxième étape de grillage à 650-700°C permet de retransformer les sulfates les moins stables en oxydes, ce qui est le cas du sulfate de fer ferrique par exemple. Les sulfates d'ETR sont en revanche stables lors de l'étape de grillage puis peuvent être lixiviés dans de l'eau lors d'une troisième étape. Ces conditions permettent de récupérer 90% des ETR dans les conditions optimums avec moins de 1% de dissolution du Fe, Ti et Si et moins de 20% d'Al.

Un autre avantage de ces procédés pyrométallurgiques pour les résidus de bauxite en amont de la lixiviation des ETR est qu'ils permettent de libérer une partie significative du scandium qui est piégé dans les phases de fer (Borra et al., 2016; Rivera et al., 2019; Vind et al., 2018) permettant de meilleurs rendements de récupération du scandium par rapport à une lixiviation directe des ETR. Par exemple, la quantité de Sc récupéré après des procédés de fusion-lixiviation ou bien grillage alcalin-fusion-lixiviation sur des résidus de bauxite grecs est deux fois plus importante qu'après une lixiviation simple (Borra, Chenna Rao et al., 2016a). Encore une fois, toutes les études ne sont pas comparables et l'origine du résidu de bauxite est à considérer puisque dans certains cas, une simple lixiviation à température ambiante avec 0,5 M HNO_3 peut permettre de récupérer jusqu'à 80% du Sc (Ochsenkühn-Petropulu et

al., 1996). Bien que cette expertise ne se focalise pas spécifiquement sur le Sc, ce dernier est clé puisqu'il représente l'élément avec la plus grande valeur dans les résidus de bauxite et la rentabilité d'un procédé de récupération d'ETR dans des résidus pourrait dépendre de sa récupération (Borra, Chenna Rao et al., 2016a).

En revanche, ces procédés ne semblent pas toujours significativement plus efficaces en termes de rendement et/ou sélectivité de lixiviation des ETR par rapport à une lixiviation directe. À titre d'exemple, la réduction carbothermique à plus de 1000°C pour récupérer le fer dans une première étape peut, lors d'une seconde étape, réduire l'efficacité de la lixiviation des ETR par rapport à une lixiviation directe de ces dernières à partir du résidu de bauxite initial (Habibi et al., 2022). Ces procédés thermiques soulèvent également des questions sur leur impact environnemental, notamment en termes d'émissions de CO₂ et de consommation d'énergie qui est considérable par rapport à une lixiviation directe (différence d'un facteur 40 environ pour la consommation d'énergie par exemple) (Habibi et al., 2022).

4.2.2.2.3.2 Lixiviation assistée par des ligands organiques

Une autre approche consiste à s'inspirer de la biolixiviation qui consiste en partie en une dissolution assistée par des acides organiques. Si l'affinité de l'acide organique pour les ETR est supérieure à l'affinité pour les autres éléments de la matrice alors une lixiviation sélective peut être attendue. Il est important de préciser que la sélectivité de l'extraction peut également provenir de la spéciation des éléments (ETR et autres éléments de la matrice) dans le résidu. Un avantage d'une lixiviation assistée par des acides organiques est qu'elle peut être réalisée dans des conditions de pH moins extrêmes qu'avec les acides minéraux forts. L'origine des acides organiques peut être biologique (utilisation directe d'un milieu de culture) ou synthétique (solution d'acides organiques préparées à partir de produits commerciaux).

Une première stratégie est de récupérer un surnageant de milieu de culture après séparation des microorganismes et riches en acides organiques puis réaliser la lixiviation mais la sélectivité n'est pas toujours optimum. Il est également possible de travailler avec des solutions synthétiques d'acides organiques, ce qui permet de mieux contrôler les conditions d'expérimentation et de mieux comprendre les mécanismes réactionnels. Parmi les acides organiques testés, l'acide citrique (Banerjee et al., 2021; Borra et al., 2015; Gasser et al., 2019; Lallemand et al., 2022; Lütke et al., 2022; Oularé et al., 2025; Shalchian et al., 2024; É. Ujaczki et al., 2017) est un des acides organiques à faible poids moléculaire largement étudié qui présente une grande affinité chimique pour les ETR et dont les performances en termes de rendement de lixiviation sont proches des acides minéraux.

À titre d'exemple, des rendements de lixiviation similaires ont été mesurés sur un résidu de bauxite grec pour une lixiviation à 90°C avec de l'acide citrique comparée à une lixiviation par des acides minéraux à température ambiante (Borra et al., 2015).

Lallemand et al. ont étudié la dissolution sélective des ETR à partir d'un résidu de bauxite latéritique à divers pH avec différents acides organiques (citrique, tartrique et oxalique) (Lallemand et al., 2022). Dans les conditions expérimentales testées, l'acide citrique permet d'obtenir des taux de dissolution des ETR légers de l'ordre de 40-50% à 25°C et ce jusqu'à des pH de 4,5 avec une bonne sélectivité vis-à-vis du Fe et du Ti (moins de 1% et 5% de dissolution respectivement). En revanche, les ETR lourds ne sont pas dissouts à cause d'une spéciation défavorable. Les ETR lourds dans ce résidu sont présents sous forme de phosphates d'ETR thermodynamiquement très stables. Cependant, cela permet une sélectivité de dissolution des ETR légers vis-à-vis des lourds qui peut être intéressante à exploiter.

Dans la même dynamique, Tamba Oularé et al. ont optimisé la dissolution des ETR par l'acide citrique à pH 3 permettant d'obtenir jusqu'à 82% de dissolution sélective des ETR légers pour des résidus latéritiques à 75°C (sélectivité de 4200 par rapport au fer) (Oularé et al., 2025). De plus, la même étude réalisée par comparaison sur un résidu de bauxite d'origine karstique a permis de mettre en avant le rôle fondamental de la spéciation sur le comportement de dissolution (cf. partie 1.2). Dans le cas des résidus

karstiques, le rendement de dissolution atteint 50-60% pour l'ensemble des ETR avec une sélectivité intéressante mais moins bonne vis-à-vis des éléments majeurs que pour les résidus latéritiques.

L'acide citrique a également été utilisé pour la lixiviation des ETR dans un fertilisant à base de phosphogypse (phosphogypse + 2%P₂O₅) montrant de bons résultats après 3 cycles successifs de lixiviation sur un même échantillon (83,4% de dissolution) mais aucune étude de sélectivité vis-à-vis du Ca n'a été présentée ni même de comparaison avec un acide fort (Gasser et al., 2019). Lutke et al. ont également montré des résultats prometteurs avec l'acide citrique sur un phosphogypse magmatique mais une fois encore la sélectivité n'a pas été investiguée (Lütke et al., 2022). Dans le cas particulier des phosphogypses, la sélectivité est certainement complexe à atteindre, car les ETR sont majoritairement substitués dans la structure du gypse (cf. partie 4.1). Leur lixiviation est donc conditionnée à la dissolution de la matrice (gypse). Cependant un traitement alcalin du gypse avec Na₂CO₃ pour former du CaCO₃ qui contient les terres rares (plus de 99%) puis dissolution par acide nitrique ou citrique permet de dissoudre 75,1 et 87,4% des ETR respectivement (Gasser et al., 2022). Dans ce dernier cas, moins de 1% du Ca est dissous. Le couplage avec extraction liquide/liquide et précipitation par acide oxalique permet d'obtenir 85% des ETR à une pureté de 97,7%.

D'autres acides organiques ont été testés. Si l'acide tartrique est moins efficace que l'acide citrique pour la lixiviation des ETR à partir des résidus de bauxite, il est en revanche plus sélectif par rapport au Fe, Al et Ti (Lallemant et al., 2022). L'acide tartrique montre également des résultats un peu différents pour dissoudre sélectivement et en une étape les ETR de cendres générées en laboratoire à partir d'un charbon indien avec des rendements de lixiviation supérieurs à l'acide citrique (acide tartrique > acide lactique > acide citrique > acide malonique > acide succinique) (Banerjee et al., 2021). Les rendements de dissolution des ETR légers par l'acide tartrique à 5% sont prometteurs (65% de dissolution après 60 minutes à 90°C, pH 1.8) mais reste faible pour les ETR lourds (19%). En revanche la sélectivité de la lixiviation vis-à-vis du Fe, Al et Si est intéressante puisque moins de 10% de ces éléments sont dissous dans ces conditions. Même si la transposabilité de cette étude sur des cendres industrielles françaises ou européennes se pose, cette approche mérite d'être développée et éventuellement couplée avec une première étape de grillage ou lixiviation alcaline afin d'améliorer les rendements de lixiviation.

Une autre étude a étudié l'utilisation d'acide lactique pour la lixiviation des ETR de cendres volantes de charbon indiennes et obtient de très bons rendements de lixiviation (jusqu'à 89%) (Karan et al., 2023). Contrairement à l'étude précédente, les ETR lourds sont extraits avec de bons rendements (>60-70%) mais s'expliquent très probablement par une différence de spéciation. Dans le cas de ces cendres volantes, les ETR ne sont pas associés à la matrice vitreuse mais sont majoritairement dans une phase relativement soluble (disponible par échange ionique). Plusieurs procédés d'extraction sont ensuite testés (précipitation avec des acides oxaliques, extraction par solvants puis précipitation sous forme de fluorure) et l'acide lactique est recyclé (Karan et al., 2023).

Enfin, la dissolution assistée par ligand et en particulier par l'acide citrique présente des avantages par rapport à une récupération des ETR après un traitement thermique. La lixiviation des ETR par l'acide citrique à 80°C, suivie par une extraction par solvant a été utilisée par comparaison avec des procédés de sulfatation et grillage suivi d'une étape de lixiviation à l'eau puis extraction par solvant sur des résidus de bauxite iraniens (origine géologique non décrite) (Shalchian et al., 2024). Les résultats montrent de meilleurs rendements d'extraction par la voie acide citrique mais surtout ce procédé est moins complexe, énergivore et permet d'éviter le traitement de certains gaz générés par le procédé thermique (SO₃).

En résumé, si l'utilisation des acides organiques est souvent justifiée par la recherche d'une meilleure sélectivité de la lixiviation, des études plus systématiques comparant les performances de sélectivité de ces acides organiques avec des acides inorganiques manquent et sont nécessaires afin de mieux comprendre les paramètres qui contrôlent cette sélectivité. Au-delà de la réactivité intrinsèque des ligands organiques pour les ETR qui peut permettre une certaine sélectivité de dissolution par complexolyse par rapport aux éléments majeurs, la variété de la nature des sources secondaires et de spéciations des différents éléments (ETR et autres éléments de la matrice) rend complexe la comparaison

de différentes études réalisées avec des acides organiques et l'identification des paramètres affectant réellement la sélectivité (réactivité des ligands vs spéciation des éléments). Enfin, la rentabilité économique en termes de coût reste à prouver.

Au-delà de l'emploi d'acides organiques pour la lixiviation sélective des ETR, l'acide oxalique est historiquement largement mobilisé à l'échelle industrielle pour leur précipitation sélective. Cette approche demeure aujourd'hui une stratégie centrale dans de nombreux procédés de récupération développés et étudiés dans le cadre de cette expertise.

4.2.2.2.4 Approches zéro-déchet

Parmi les approches innovantes d'extraction des ETR, l'approche zéro-déchet est particulièrement attractive puisqu'elle permettrait de réduire la quantité de résidus générés et des impacts associés à leur stockage (Joyce & Björklund, 2019; Y. Liu & Naidu, 2014). De plus, si l'extraction des ETR seuls est rarement rentable, la valorisation multi-élément pourrait ainsi permettre de rendre le procédé plus viable d'un point de vue économique (Y. Liu & Naidu, 2014) en particulier si les coûts évités de gestion et stockage des déchets sont considérés.

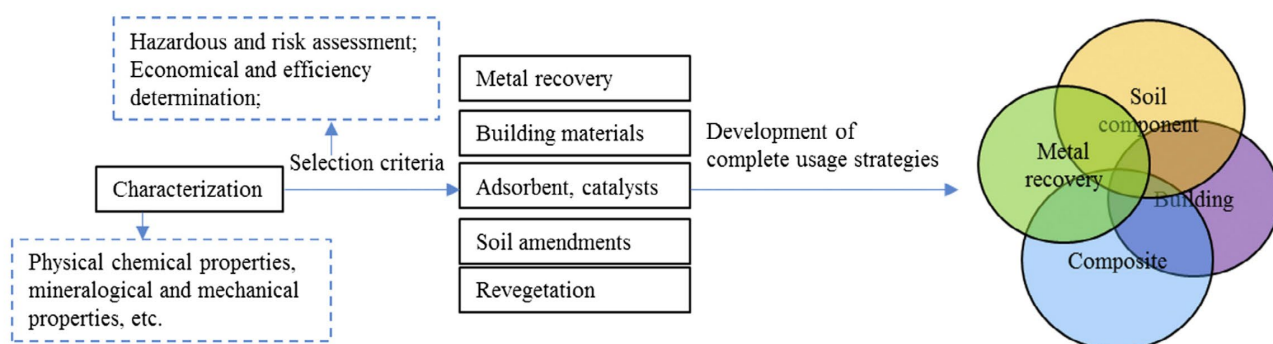


Figure 4.21 Procédure complète de traitement des boues rouges. Tirée de (Y. Liu & Naidu, 2014)

Ces approches zéro-déchet suscitent l'intérêt des industriels. Parmi les brevets déposés, celui d'Orbite Aluminate Inc. est régulièrement cité (e.g. (Zinoveev et al., 2021)) mais à notre connaissance pas industrialisé. Il permet d'extraire plus de 90 % des éléments contenus dans les résidus de bauxite, y compris les ETR. Il intègre une étape de lixiviation sous haute pression à 150–170 °C, dissolvant presque tous les éléments sauf le Si et le Ti puis un traitement au gaz HCl de la solution obtenue est réalisé pour précipiter $\text{AlCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$. Ce dernier est récupéré puis chauffé à 900–950 °C, produisant de l'alumine (Al_2O_3). Après élimination de l'Al, la solution est chauffée à 180°C pour former Fe_2O_3 . Enfin, les ETR sont extraits par un procédé d'extraction par solvant.

Dans la littérature académique, des articles de synthèse des études consacrées à la récupération des ETR et des autres éléments à partir de résidus de bauxite avec une approche zéro-déchet ont été publiés (Binnemans et al., 2015; Borra, Chenna Rao et al., 2016b; Y. Liu & Naidu, 2014; Swain, 2022; Zinoveev et al., 2021) et décrivent les nombreux procédés complexes (conceptuels ou basés sur des études empiriques) qui permettent une récupération multi-élément dont les ETR. Ces procédés mobilisent plusieurs étapes de pré-traitement, d'hydro et pyro-métallurgie, d'extraction par solvants afin de séparer principalement le Fe, Al, Ca, Na, Ti, V et les ETR.

Un procédé a également été développé afin de récupérer les ETR, l'Al et le Si de cendres volantes en combinant des étapes de grillages avec différents fondants, lixiviations alcaline, acide et à l'eau (voir la figure 1 de (X. Fan et al., 2022)). Un tel procédé permet de séparer et récupérer près de 90% du Si, de l'Al et des ETR.

Une autre alternative dans les approches zéro-déchet est de valoriser le résidu après une étape d'extraction des ETR comme matériaux dans la construction ou comme adsorbant pour le traitement de l'eau par exemple. Des synthèses de ces études ont été publiées dans des articles de review en particulier pour les résidus de bauxite (Binnemans et al., 2015; Klauber et al., 2011). Une étude montre qu'une telle approche (extraction + matériaux) est plus performante environnementalement que les procédés d'extraction mono-élément, car ils maximisent les impacts évités tels que le stockage des résidus (Joyce & Björklund, 2019). Cependant pour des raisons de performance des matériaux, de coût et de risques liés à la forte alcalinité des résidus de bauxite, la présence de métaux lourds et de radioactivité naturelle renforcée, les résidus de bauxite sont très peu valorisés aujourd'hui. Le couplage d'une première étape de récupération des ETR puis de valorisation des résidus comme matériau a peu été exploré.

Contrairement aux résidus de bauxite, la valorisation du phosphogypse après extraction des ETR semble plus prometteuse. Par exemple, le gypse obtenu après extraction des ETR peut être ajouté au ciment en substitution au gypse naturel sans perte de performance en termes de résistance à la compression (Rychkov et al., 2018).

Une autre approche est la lixiviation indirecte, définie comme « les procédés qui consistent à modifier la microstructure du phosphogypse en matériaux qui pourraient trouver des applications commerciales et industrielles tout en libérant des ETR emprisonnés dans la matrice » (Mukaba et al., 2021). Ainsi pour les phosphogypse, des approches de carbonatation ou de recristallisation ont été décrites. Si la première approche semble peu réaliste en termes de coût et d'énergie (Mukaba et al., 2021), la deuxième approche pourrait permettre de synthétiser de fibres de sulfates de calcium à partir de phosphogypse combinée à l'extraction d'ETR. Ces fibres (whiskers) peuvent ensuite être utilisées dans diverses applications industrielles en raison de leurs propriétés mécaniques et leur stabilité chimique (plastiques, plâtre, ciment, plaquettes de frein, etc.). Le couplage récupération d'ETR et synthèse de fibres de sulfates de calcium reste encore à développer.

En résumé, l'approche zéro-déchets est particulièrement intéressante dans le but d'éviter les coûts (économiques, sociaux, environnementaux) du stockage des résidus. Si toutes les études citées ci-dessus montrent la faisabilité technique de valoriser presque tous les éléments contenus dans les résidus de bauxite, le phosphogypse ou les cendres de charbon, leur développement reste à l'échelle du laboratoire (parfois même conceptuel) et il n'existe pas encore de technologies intégrées rentables pour le recyclage complet de ces résidus à l'échelle industrielle qui intègre une étape de récupération des ETR. De plus les considérations environnementales de tels procédés sont encore limitées (Zinoveev et al., 2021) et ne sont pas discutées au regard des impacts liés au stockage. En particulier les études proposant de séparer les différents éléments des différents résidus s'appuient généralement sur des procédés complexes qui combinent des étapes de pré-traitement, hydro- et pyrométallurgique dont les impacts environnementaux et la rentabilité économique sont inconnus. La valorisation du résidu comme matériaux en tant que tel (sans étapes d'extraction multi-élémentaires supplémentaire) après une étape d'extraction des ETR apparaît comme une solution intéressante afin d'extraire les ETR et valoriser le résidu restant à moindre coût. Cependant le nombre d'études à ce sujet est très limité.

Des études comparatives techno-économiques et d'impact environnemental des différentes approches zéro-déchets (extraction multi-élémentaire vs valorisation du résidu comme matériau après extraction des ETR) en comparaison avec le scénario actuel qui consiste à stocker ces résidus manquent. Ces études permettraient d'identifier les voies de gestion de ces résidus les plus efficaces et pertinentes en termes de coût et d'impact environnemental. Même si quelques tentatives très incomplètes ont été réalisées (Borra, Chenna Rao et al., 2016a) ces études sont complexes à mener pour des technologies peu matures (TRL bas).

4.2.2.2.5 Procédés non-conventionnels (conditions super- et sub-critiques, ionométallurgie)

Un fluide supercritique est une substance qui se trouve à une température et une pression supérieure à son point critique. Dans cet état, il présente des propriétés intermédiaires entre celles d'un liquide et d'un gaz avec une densité suffisamment élevée pour dissoudre des substances. Sa diffusion, à travers une poudre par exemple, est facilitée favorisant ainsi le transfert de matière. Les fluides supercritiques peuvent être utilisés en substitut de solvants plus toxiques.

L'extraction d'ETR d'une cendre volante de charbon par une solution extractante de HNO₃ et TBP (tributyl phosphate) en conditions supercritiques de N₂, Air et CO₂ a montré que ces conditions favorisent l'extraction sélective des ETR par rapport à la même extraction réalisée sans condition supercritique (Y. Zhu et al., 2023). Des facteurs de concentrations de 1,91, 2,04 et 3,23 ont été obtenus par rapport au Fe, Al, Ca et Mg pour l'air, l'N₂ et le CO₂ supercritiques respectivement. Les conditions supercritiques favorisent la sélectivité de complexation du TBP avec les ETR par rapport aux autres éléments de la matrice. Après plusieurs étapes de stripping, le produit final contient 6,47% d'ETR contre 0,0234% initialement dans la cendre de charbon.

Des conditions subcritiques (viscosité et constante diélectrique plus faible) peuvent également permettre d'améliorer la lixiviation des ETR. Lu et al. a montré que la totalité des ETR présents dans un phosphogypse sont dissoutes en 5 minutes à 100°C et une pression de 10kg/cm² et une solution lixiviante de 0,1mol/L HCl (S.-B. Lu et al., 2023). La même expérience réalisée à 80°C à pression ambiante permet de récupérer à peu près 50% des terres rares en 10 minutes et avec une énergie requise presque dix fois supérieure (S.-B. Lu et al., 2023). Pour cette dernière étude, la sélectivité d'extraction n'a pas été mesurée.

Autre méthode non conventionnelle, l'ionométallurgie est une approche d'extraction des métaux utilisant des solvants ioniques (comme les liquides ioniques ou solvants eutectiques profonds) pour dissoudre et séparer les éléments de manière plus sélective et potentiellement plus durable que les procédés conventionnels. Cette approche a peu été investiguée sur les sources secondaires et sans résultats probants. Un liquide ionique hydrophobe (HbetTf₂N) a été testé sur un résidu de bauxite grec (Davris et al., 2016) mais l'extraction est peu convaincante. Les résultats obtenus ne semblent pas apporter de plus-value par rapport à des extractions en milieux acides (minéraux ou organiques). De même Couturier et al. ont montré qu'un solvant eutectique profond à base d'acide lactique et de chlorure de choline se révèle moins efficace qu'une solution aqueuse d'acide lactique pour l'extraction d'ETR de résidus de bauxites latéritique et karstique, remettant en question leur intérêt à court terme pour la lixiviation des ETR sur ces ressources secondaires (Couturier et al., 2025).

4.2.2.2.6 Procédés biologiques

La bioextraction, via des microorganismes capables de solubiliser les ETR par des mécanismes d'acidification et/ou de complexation, offre une voie prometteuse pour valoriser ces sources secondaires tout en limitant l'empreinte écologique des procédés traditionnels. Cette section explore les stratégies de biolixiviation appliquées au phosphogypse, cendres de charbon et résidus de bauxite.

4.2.2.2.6.1 Phosphogypse

Les principaux composants du phosphogypse sont le calcium (Ca) et le soufre (S), principalement sous forme de sulfate de calcium. Il contient également des éléments en plus faibles proportions, tels que le fer (Fe), le phosphore (P) et l'aluminium (Al), présents sous forme de phases minérales résiduelles ou d'impuretés issues du procédé de production des engrais phosphatés. La composition du phosphogypse

peut varier selon l'origine du minerai phosphaté et les conditions de traitement industriel, ce qui influence ses propriétés physico-chimiques et son potentiel de valorisation. Le gypse est la principale phase contenant des ETR (70 %), tandis que certains ETR sont également présents dans la monazite et l'apatite (cf. section 4.1). Les acides inorganiques libèrent 80 à 90 % des ETR du phosphogypse, et les acides organiques, en particulier l'acide citrique, peuvent solubiliser 60 à 80 % des ETR. Les performances de la biolixiviation sont comparables à celles des acides organiques et même des acides inorganiques, impliquant les bactéries *Gluconobacter oxydans* ou *At. thiooxidans* (S. Shi et al., 2023).

Antonick et al. ont rapporté que le bio-lixiviant obtenu à partir d'une culture de *G. oxydans* libérait les ETR (Y, Ce, Nd, Sm, Eu et Yb) du phosphogypse synthétique à 25 °C à un ratio S/L de 2 %, avec une efficacité (36 %-91 %) supérieure à celle de l'acide gluconique et du H_3PO_4 , mais inférieure à celle du H_2SO_4 (Antonick et al., 2019). Une simulation thermodynamique a montré que la solubilité des ETR dans le phosphate était fonction du pH, ce qui indique que l'acidification est la principale cause de la biolixiviation. En outre, la solubilité des ETR dans l'acide gluconique est plus élevée que celle de l'acide sulfurique en raison de l'effet de complexation, ce qui est cohérent avec les résultats expérimentaux.

Tayar et al. ont montré que les micro-organismes autotrophes oxydant le soufre (*Acidithiobacillus thiooxidans*) extraient efficacement les ETR du phosphogypse (Tayar et al., 2022). Au total, 60,5 % des ETR (La, Ce, Nd, Pr) ont été extraits du phosphogypse par *At. thiooxidans*, producteur d'acide sulfurique, à 30 °C et à un ratio S/L de 2 % après 20 jours. En particulier, les approches de biolixiviation en deux étapes et en milieu usé ont donné des taux de récupération des ETR plus élevés que l'approche en une étape, ce qui signifie que seul l'acide sulfurique produit par les bactéries est responsable de l'extraction des ETR, et que les cellules ou d'autres métabolites jouent un rôle négligeable dans le processus de biolixiviation. Ce résultat est très différent de celui de l'étude de Su et al. (Su et al., 2020). Les bactéries oxydant le soufre conviennent à la biolixiviation du phosphogypse, probablement parce qu'elles se sont adaptées à l'environnement du phosphogypse, qui est acide, oligotrophe et contient des métaux lourds (S. Shi et al., 2023).

4.2.2.2.6.2 Cendres de charbon

Les cendres volantes de charbon provenant de la combustion du charbon contiennent de fortes concentrations de métaux. Si des techniques de lixiviation appropriées sont identifiées, les cendres volantes de charbon pourraient constituer une source utile de minéraux précieux, notamment d'ETR. Deux approches peuvent être adoptées pour libérer les ETR présents dans les cendres de charbon.

La première approche repose sur la production d'acides organiques par des souches de microchampignons. Dans l'étude de Park and Liang, trois souches microbiennes, *Candida bombicola*, *Phanerochaete chrysosporium* et *Cryptococcus curvatus*, ont été testées sur leurs performances en matière de lixiviation des métaux et des ETR contenus dans les cendres volantes (Park & Liang, 2019). En comparant la perte minérale et l'efficacité de la lixiviation résultant de la lixiviation indirecte ou de l'utilisation du surnageant de culture, *C. bombicola* a été identifiée comme étant la meilleure, conduisant à la perte minérale la plus élevée et à l'efficacité d'extraction des éléments traces et des ETR parmi les trois souches. La perte minérale la plus élevée observée lors de l'utilisation du surnageant de cette souche de levure était de 59,7 %. Ce test de lixiviation a permis de dissoudre 67,7 % d'Yb et 64,6 % d'Er dans les cendres. Cette étude a donc démontré que la biolixiviation est possible pour extraire les métaux des cendres volantes. Plus récemment, Ma et al. ont optimisés les conditions de culture et le processus de biolixiviation des ETR par *Aspergillus niger* (Ma et al., 2023). Les résultats ont montré que les sources d'azote organique affectent la morphologie et la capacité de production d'acide par *A. niger*, et que la souche d'*A. niger* utilisée dans cette étude sécrète principalement de l'acide oxalique (4,05 mg/L). D'autre part, la valeur initiale du pH, le facteur le plus influent, affecte le processus de biolixiviation en affectant la production d'acide par *A. niger*. Ainsi, en optimisant la valeur initiale du pH pour améliorer la capacité de production d'acide par *A. niger* et en développant le meilleur système de biolixiviation, les cendres de

charbon montrent un taux de lixiviation de 31 % pour les ETR. Enfin, sur la base des résultats des tests des acides organiques et du pH, combinés aux études précédentes, Ma et al. ont indiqué que le mécanisme principal de la biolixiviation des ETR à partir de centre de charbon à l'aide d'A. niger est expliqué par l'échange de protons et la complexation des ligands organiques.

La deuxième approche repose sur la production d'acide inorganique. Zhang et al. ont étudié La production d'acide et d'oxydant à partir de l'oxydation de la pyrite par *Acidithiobacillus ferrooxidans* pour générer de l'acide sulfurique pour la lixiviation des ETR (Z. Zhang et al., 2021). La solution de biolixiviation acidifiée a été utilisée pour extraire les ETR des déchets de charbon, avec des rendements de 13 à 14 % pour la plupart des ETR (~72 heures de lixiviation). Cependant, la récupération pour les tests de plus longue durée était significativement plus élevée (varie de 40 à 60% pour les ETR individuels).

4.2.2.2.6.3 Résidus de bauxite

La biolixiviation des ETR peut être réalisée en présence de micro-champignons, de bactéries et d'archées, soit directement par l'action des microorganismes sur la matrice solide (biolixiviation directe), soit indirectement via leur milieu de culture après séparation des cellules (biolixiviation indirecte). Ces processus reposent sur différents mécanismes, notamment l'acidolyse, la complexolyse et la redoxolyse, tels que décrits dans le chapitre 3 (S. Panda et al., 2021).

Dans ce contexte, il convient de distinguer deux grands groupes fonctionnels de microorganismes impliqués dans la biolixiviation. D'une part, les microorganismes hétérotrophes, tels que certains micro-champignons et bactéries, produisent des acides organiques (par exemple acide citrique, oxalique ou gluconique) capables de solubiliser les ETR par acidification du milieu et complexation des métaux. D'autre part, les microorganismes chimio-autotrophes génèrent principalement des acides inorganiques, comme l'acide sulfurique, à partir de l'oxydation de composés réduits (soufre), favorisant ainsi la dissolution des phases minérales et la libération des ETR. Cette distinction fonctionnelle est essentielle pour le choix et l'optimisation des stratégies de biolixiviation appliquées à la valorisation des boues rouges.

4.2.2.2.6.3.1 Micro-organismes hétérotrophes

Une des études pionnières de biolixiviation sur les résidus de bauxite a été réalisée avec *Penicillium tricolor*, un champignon qui a été isolé à la surface d'un dépôt de résidus de bauxite et qui a été sélectionné pour sa capacité à produire de grandes quantités d'acides organiques. Les acides organiques produits dans le milieu de lixiviation ont été identifiés et sont l'acide oxalique, l'acide citrique et l'acide gluconique. Une dissolution graduelle de 20 à 70% des ETR légers aux ETR lourds respectivement a été observée dans les conditions optimales de biolixiviation suggérant une dissolution contrôlée par le rayon ionique (Qu & Bin Lian, 2013). Le même auteur a également utilisé *Aspergillus Niger* également connu pour synthétiser les mêmes petits acides organiques que *Penicillium tricolor*. Des taux de dissolution des ETR pouvant atteindre 62% pour l'Yb (Qu et al., 2015). Ces études sont encore très préliminaires et la sélectivité de la biolixiviation n'est pas reportée. De plus, d'après les auteurs, la production importante de biomasse par les champignons et la dissémination de spores pouvant contaminer l'environnement sont deux contraintes pour le développement d'un procédé industriel. Un point intéressant cependant est que dans le cas de *Aspergillus Niger*, la lixiviation avec le milieu de culture sans les champignons est plus importante que la biolixiviation en présence de ces derniers. Le rôle des petits acides organiques est donc clairement établi et montre tout l'intérêt de développer des procédés de lixiviation bio-inspirés avec des acides organiques (cf. section 3.2.3.3).

La même méthodologie a été utilisée pour isoler la bactérie *Acetobacter* sp. et réaliser des tests de biolixiviation (Qu et al., 2019). Des résultats similaires ont été observés avec 20 à 60% de dissolution des

ETR légers et lourds respectivement dans les conditions optimales. À la différence de *Penicillium tricolor*, une plus grande variété d'acides organiques secrétés par *Acetobacter* sp. a pu être identifiés avec une grande majorité d'acides acétiques, mais aussi des acides oxalique, citrique, tartrique, malique, lactique, fumarique et succinique. Cette fois-ci, la biolixiviation en présence de bactéries (biolixiviation directe) est plus efficace que la lixiviation avec le milieu de culture seul et en présence des métabolites après séparation des bactéries (biolixiviation indirecte). Dans le cas de la biolixiviation directe, les bactéries, certainement sous le stress induit par la présence de résidus de bauxite alcalin, produisent une plus grande quantité d'acides organiques améliorant ainsi la lixiviation des ETR.

Dans un cas particulier, la biolixiviation des ETR a été décrite dans un procédé de valorisation des résidus de bauxite dans une approche d'économie circulaire. En effet, l'utilisation de résidus de bauxite comme neutralisant et détoxifiant pour la production d'acide lactique avec *Lactobacillus plantarum* à partir de biomasse a montré une légère co-extraction simultanée des ETR qui s'explique par la forte affinité des ligands lactate pour ces derniers. Même si ce type d'étude est très embryonnaire et nécessite d'être optimisé, la production simultanée d'ETR et d'acide lactique semble intéressante d'autant plus que le procédé permet une baisse de l'alcalinité des résidus de 92,2% (Gao, Liu, et al., 2024).

Les auteurs soulignent également l'avantage d'utiliser des micro-organismes anaérobies tels que *Lactobacillus plantarum* dont l'activité microbienne et la production d'acides organiques, contrairement aux microorganismes aérobies (*Gluconobacter oxydans*, *Penicillium tricolor*), ne sont pas limitées par le problème de transfert d'oxygène dans une pulpe concentrée en résidus de bauxite (typiquement 10%) (Gao, Liu, et al., 2024).

Les résidus de bauxite étant des déchets solides hautement salins et alcalins générés dans les raffineries d'alumine, ce qui implique une désalcalinisation en vue d'une élimination et d'une valorisation sûres. Gao et al. ont isolé un champignon (*Trichocomaceae* sp. K-2) isolé à partir de sédiments marins pour la désalcalinisation simultanée des résidus de bauxite et la récupération d'ETR (Gao, Sun, et al., 2024). Le micro-champignon a démontré une croissance robuste à une salinité élevée (45 g/L NaCl), une bonne tolérance à un pH élevé (jusqu'à 12) et la capacité d'utiliser des substrats peu coûteux dérivés de la biomasse lignocellulosique. *Trichocomaceae* sp. K-2 a permis d'atteindre un pH minimum significativement plus bas (<4) dans un délai considérablement court (<16 jours), et l'efficacité de l'élimination des alcalins a atteint 94%. En outre, la lixiviation concomitante d'ETR tels que Nd, Sc et Y des résidus de bauxite pendant la désalcalinisation était possible. La désintégration physique et l'érosion chimique par les acides organiques secrétés sont responsables de la lixiviation des ETR. Cette étude met en lumière la manière dont les micro-organismes marins peuvent être exploités pour l'élimination écologique des résidus de bauxite et incite à explorer des microbes marins plus robustes et polyvalents pour la gestion durable et rentable d'autres déchets solides hautement salins et alcalins.

4.2.2.2.6.3.2 Bactéries chimio-autotrophes

Outre les micro-organismes hétérotrophes, les bactéries chimio-autotrophes ont également été étudiées pour la biolixiviation des résidus de bauxite. Zhang et al. ont montré qu'au cours de la phase de biolixiviation aérobie à l'aide d'*Acidianus manzaensis* (souche microbienne capable d'utiliser la pyrite comme source d'énergie), les taux d'extraction des ETR augmentent avec l'augmentation des rapports massiques pyrite/résidus de bauxite ; les taux les plus élevés pour le Ce (82,4%), le Gd (86,8%), l'Y (85,3%) et le Sc (78,6%) ont été atteints pour un rapport massique pyrite/résidus de bauxite de 2:1 après 22 jours de biolixiviation (D. Zhang et al., 2020). Une légère diminution s'est ensuite produite, car les précipités formés par la jarosite, l'hématite, le diaspoire et le SiO₂-gel peuvent adsorber de petites quantités d'ETR dissouts. Dans des conditions anaérobies, l'ajout de S⁰ s'est progressivement oxydé en sulfate, et la jarosite s'est progressivement dissoute en Fe²⁺ et ont disparu au jour 10 avec un taux de biolixiviation maximal pour Ce, Gd, Y et Sc de 86,3%, 93,7%, 90,2% et 74,9%, indiquant que les résidus de la première étape ont été dissouts avec la réduction dissimilatoire de la jarosite par *A. manzaensis* en

utilisant S^0 comme donneur d'électrons. Ces résultats suggèrent une nouvelle méthode pour la récupération efficace des métaux de valeur à partir des résidus de bauxite. Zhang et al. (2022) s'est penché sur la solubilisation des ETR contenus dans les résidus de bauxite via l'oxydation du soufre (S^0) catalysée par la bactérie modérément thermophile *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* (D. Zhang et al., 2022). L'optimisation du processus de biolixiviation a été réalisée dans des flacons à agitation et des bioréacteurs de 5 L, avec des rapports de masse S^0 /résidus de bauxite et des taux d'aération variables. Les résultats montrent que les récupérations d'ETR les plus élevées (84% de Ce, et 91% de Y) ont été obtenues avec un rapport de masse S^0 /résidus de bauxite de 2:1 et un taux d'aération de 1 L/min. Bien que l'efficacité de lixiviation soit satisfaisante, le ratio S/L utilisé n'était que de 0,5 %, ce qui est bien inférieur à celle utilisée pour la biolixiviation par des microbes hétérotrophes. Par conséquent, la biolixiviation des ETR des résidus de bauxite par des microbes chimio-autotrophes n'est peut-être pas désirable.

4.2.2.2.7 Résumé et conclusion

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 (cf. partie 4.1). 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 mg/kg (N. 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 (cf. section 4.2.3. ci-dessous). 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, Chenna Rao et al., 2016a)) ces études sont complexes à mener pour des technologies peu matures (TRL bas).

4.2.3 Une évaluation de la durabilité encore incomplète : verrous méthodologiques et variabilité des impacts

La transition vers des filières d'approvisionnement en ETR plus durables repose en grande partie sur la capacité à évaluer de manière robuste leurs impacts environnementaux, économiques et sociaux. Toutefois, les approches actuelles demeurent encore fragmentaires, en raison de verrous méthodologiques, de lacunes de données et d'une forte hétérogénéité des systèmes étudiés. En particulier, la diversité des types de gisements et des procédés associés induit des impacts très contrastés, rendant difficile toute comparaison directe. Cette section propose ainsi d'analyser, d'une part, la variabilité des impacts environnementaux selon les grandes catégories de gisements, et d'autre part, les limites des outils d'évaluation actuels, en soulignant la nécessité d'approches plus intégrées pour apprécier la soutenabilité des différentes filières.

4.2.3.1 Impacts environnementaux selon les types de gisements d'ETR

Les impacts environnementaux liés à l'extraction et au traitement des ETR varient fortement en fonction de la nature du gisement (cf. Figure 4.22 ci-dessous), des procédés utilisés et du contexte réglementaire. L'analyse du cycle de vie (ACV) en particulier, bien que confrontée à des limites méthodologiques et des lacunes de données, reste un outil clé pour comparer les performances environnementales des différentes filières. Elle révèle que les impacts sont conditionnés par la minéralogie, le contexte géographique, les pratiques d'extraction et les réglementations environnementales en vigueur.

Ore type	Energy for crushing and grinding	Grain size/ Difficulty of beneficiation	Chemicals (acid, flotation reagent)	Radioactivity: ore mineral and host rock	Amount of rock to be moved*	By-products
Carbonatite	Medium – High	Variable – 10 µm	Flotation – medium	Medium	Low	Not usually
Weathered carbonatite	Medium	10 µm and finer	Flotation – medium	Low–Medium	Low	Not usually
Alkaline rock	High	Variable 1 µm and larger	Variable	Variable	High	Co-products common
Ion adsorption clay (in-situ leaching)	None	Beneficiation not needed	Leaching, so can be high	Low	Low	None
Mineral sand (placer)	None–Low	10 – 100 µm	Low	High	High	from TiO₂, zircon etc production
By-product of igneous apatite	High	100 µm–mm	Medium	Low	High	from fertiliser manufacture
Red mud	Bauxite processing	n/a REE from red mud	Medium?	Low	High	from Al production

* i.e. low grade = large amount of rock

Figure 4.22 Exemples de gisements d'éléments de terres rares (ETR) et analyse qualitative de leurs caractéristiques d'extraction et de traitement. Les caractéristiques en vert et en gras sont généralement favorables à une exploitation responsable, celles en gris le sont moins, et les cellules non ombrées sont défavorables. Tirée de (Wall et al., 2017). Sous licence CC BY.

À ce jour, plusieurs gisements d'ETR sont recensés en Europe, mais leur diversité minéralogique et leur complexité géologique sont très variables. Par exemple, le projet Norra Kärr en Suède, fondé sur un gisement magmatique alcalin à eudialyte, se distingue par une faible teneur en éléments radioactifs (thorium, uranium), ce qui réduit les risques de contamination associés au traitement du minerai. Dans le reste du bouclier scandinave, les gisements des carbonatites avec de la monazite et bastnäsité impliquent des contraintes plus marquées, notamment à cause de leur radioactivité. Le gisement de type IOGC à Kiruna (Suède), le plus gros gisement européen de fer, n'a pas fait l'objet d'une analyse ACV, qui permettrait pourtant d'évaluer son potentiel. L'ampleur des impacts dépend du type de minéral exploité (monazite, bastnäsité, eudialyte...), des technologies de traitement disponibles et surtout du cadre réglementaire européen, qui impose des normes strictes en matière de rejets, de gestion des déchets et de concertation publique. Une approche différenciée est donc nécessaire pour évaluer la soutenabilité environnementale des projets extractifs, en intégrant à la fois la géologie locale, les contraintes écologiques et les attentes sociales des territoires concernés. Un aperçu des impacts environnementaux et sociaux rapportés par la littérature par grand type de gisement est listé ci-dessous :

4.2.3.1.1 Gisements d'adsorption ionique (argiles)

Les gisements d'adsorption ionique, présents surtout en Chine, sont la principale source mondiale d'ETR lourds (comme le dysprosium et le terbium, essentiels aux aimants permanents) (Schulze et al., 2017). Leur extraction repose sur la lixiviation *in situ*, une méthode qui permet de limiter les perturbations physiques (déboisement, défrichage de végétation) mais engendre de forts rejets chimiques.

La substitution des cations du sol (Ca^{2+} , Mg^{2+}) par des ions ammonium provoque un appauvrissement des sols, altérant leur fertilité à long terme. La percolation des solutions de sels d'ammonium dans les sols engendre également une contamination des eaux de surface et souterraines en ammonium, sulfates et azote, souvent au-delà des normes, contribuant à des phénomènes d'eutrophisation. Les émissions dans les effluents liquides induisent une salinisation secondaire des milieux aquatiques, réduisant leur biodiversité et affectant des fonctions écologiques clés comme la décomposition de la matière organique.

Les étapes en aval, notamment la séparation par extraction liquide-liquide, sont aussi consommatrices d'énergie et de réactifs chimiques, avec des rejets salins et azotés à surveiller. Les études ACV (Deng & Kendall, 2019; Schulze et al., 2017; Vahidi & Zhao, 2016) montrent que ce type de production présente un potentiel élevé d'eutrophisation marine et d'écotoxicité aquatique, en dépit d'impacts moindres sur l'acidification et la consommation de combustibles fossiles comparé aux mines conventionnelles. Le potentiel de réchauffement global (exprimé en $\text{kg CO}_2 \text{ eq}$) lié à l'extraction des ETR à partir d'argiles ioniques varie selon les études : il peut être équivalent (Vahidi & Zhao, 2016) ou supérieur à celui de la filière bastnäsite/monazite (Schulze et al., 2017).

Malgré ces charges environnementales, de nouvelles pratiques plus propres émergent. Wan et al. ont mené une évaluation de l'empreinte carbone de la production ionique d'ETR, montrant que les émissions peuvent être fortement réduites grâce à l'utilisation de l'hydroélectricité et d'autres sources d'énergie propres (Wan et al., 2022). Leurs résultats indiquent des émissions de 17,8 à 24,3 kg CO_2 équivalent par kilogramme d'ETR mixtes produits.

Sur le plan sanitaire, plusieurs études (J. C. K. Lee & Wen, 2017; Y. Wang et al., 2022) alertent sur les risques d'exposition chronique aux ETR dans les zones rurales proches de ces mines : accumulation dans les sols agricoles, contamination des cultures (blé, légumes, alliacées) et apports journaliers proches des seuils critiques de 70 $\mu\text{g/kg}$ /jour pour certaines populations à risque comme les enfants notamment.

4.2.3.1.2 Gisements de carbonatites : monazite et bastnäsite.

Les gisements de carbonatites (ex. : Bayan Obo en Chine, gisements canadiens) sont riches en ETR légers (lanthane, néodyme, cérium, etc.), mais aussi en éléments radioactifs comme le thorium et l'uranium. Leur traitement, souvent basé sur des procédés chimiques agressifs (acide sulfurique, oxalique, etc.), génère de grandes quantités de résidus solides et liquides contaminés.

Le traitement de la monazite, minéral riche en ETR mais aussi en thorium, pose des problèmes environnementaux majeurs en raison de sa radioactivité élevée. Les boues issues de la séparation des ETR contiennent des éléments radioactifs à longue durée de vie, nécessitant une gestion stricte des déchets (Browning et al., 2016; Zapp et al., 2022).

Dans les environnements naturels proches des gisements de carbonatites, les études écotoxicologiques montrent que l'enrichissement des sols et sédiments en ETR peut affecter le biota : retards de croissance et baisse de la reproduction chez les crustacés (Mehennaoui et al., 2024), altération des fonctions de photosynthèse chez les algues, et perturbation de la chaîne alimentaire en milieu aquatique (Romero-Freire et al., 2019). Ces effets sont d'autant plus préoccupants qu'ils touchent des espèces clés dans les cycles biogéochimiques des écosystèmes d'eau douce.

Des études ACV mettent en évidence un potentiel important de réduction des impacts environnementaux, en particulier par l'amélioration des pratiques de traitement des déchets (J. C. K. Lee & Wen, 2017) ou par l'optimisation des procédés de production (Ratthanapra & Suwanmanee, 2019). Ces derniers ont par exemple montré que l'élimination de l'étape d'extraction par solvant lors de la production d'oxyde de cérium à partir de monazite permettrait de réduire significativement les charges environnementales tout en maintenant une grande pureté du produit. L'extraction par solvant était

responsable jusqu'à 85% des impacts environnementaux totaux et 79% des dommages à la santé humaine et aux ressources. Ces résultats confirment que l'intensification des procédés, l'amélioration du traitement des déchets, le recyclage chimique et un contrôle environnemental plus strict sont essentiels pour construire une chaîne d'approvisionnement en ETR plus durable.

4.2.3.1.3 Gisements de type magma alcalin et eudialyte

Les gisements européens comme Norra Kärr, à base d'eudialyte, représentent une alternative potentiellement plus durable. L'eudialyte est pauvre en thorium et uranium, ce qui réduit les risques radioactifs, et les réglementations environnementales strictes en Europe limitent les émissions et imposent une gestion plus rigoureuse des déchets.

Selon Schreiber et al., la production de néodyme et dysprosium à Norra Kärr entraîne 40 et 20 % d'impacts en moins respectivement que celle à Bayan Obo, malgré une teneur en ETR plus faible du minerai (ce qui nécessite plus de matière première pour produire 1 kg d'ETR) (Schreiber et al., 2016). L'ACV met ici en évidence le rôle crucial du contexte réglementaire et de la technologie de traitement dans la réduction des impacts environnementaux.

4.2.3.1.4 Ressources secondaires (résidus miniers, phosphogypse, résidus de bauxite...)

L'extraction des ETR à partir de ressources secondaires (résidus de mines anciennes, déchets industriels) est perçue comme une opportunité de valorisation circulaire. C'est notamment le cas des résidus de bauxite, des cendres de charbon et du phosphogypse, qui ne nécessitent pas d'étape préalable de broyage, celle-ci ayant déjà été réalisée lors des procédés en amont. Or d'après Vidal, la consommation d'énergie de broyage est la plus grande contribution énergétique de la production des métaux pour des matrices diluées (Vidal, 2018) d'où l'intérêt de ces résidus déjà broyés.

Toutefois, les études ACV récentes (Grzesik et al., 2019) montrent que ces procédés peuvent également avoir des impacts environnementaux significatifs, surtout lors de la gestion finale des résidus ou de l'utilisation intensive d'électricité dans les procédés de séparation (gravimétrie, séparation magnétique). Dans le cadre des approches zéro-déchet (cf. section 4.2.2.2.4), les coûts sociaux et environnementaux liés au stockage de ces déchets évités ne sont que très rarement analysés bien qu'intéressants à considérer. Par exemple, Joyce et Bjorklund montrent que les procédés zéro-déchet (extraction + matériaux) sont plus performants environnementalement que les procédés mono-produit, car ils maximisent les impacts évités. Les bénéfices environnementaux proviennent surtout de l'évitement du stockage des résidus et le remplacement de productions primaires (métaux, ciment) (Joyce & Björklund, 2019).

D'un point de vue énergétique, les approches zéro-déchet proposées dans la littérature pour valoriser les sources secondaires sont plus énergivores mais permettent de limiter la production de déchets ultimes et de valoriser d'autres métaux. C'est le cas par exemple des résidus de bauxite, pour lesquels les procédés de récupération des ETR après une première étape de récupération du Fe et/ou Al sont bien plus énergivores (Borra, Chenna Rao et al., 2016a) mais permettent (1) de libérer et de récupérer le Sc associé aux phases de fer et (2) la valorisation de plusieurs éléments (Fe, Al, Ti). La valeur en scandium dans les résidus de bauxite étant largement plus élevée que celle des autres ETR, de tels procédés

permettent alors de mieux rentabiliser l'extraction aux dépens d'un coût énergétique plus important (Borra, Chenna Rao et al., 2016a).

Par ailleurs, les ressources secondaires comme le phosphogypse, les boues rouges, les scories, ou les cendres volantes présentent souvent des niveaux de radioactivité supérieurs aux normes, dépassant parfois de 1,5 à 7,5 fois les limites recommandées par l'UNSCEAR ou l'AIEA (Sahoo & Joseph, 2021). Cela peut limiter leur utilisation directe sans traitement spécifique, et appelle à des précautions particulières dans leur gestion.

4.2.3.2 Contexte et limites des études actuelles

La plupart des études citées dans ce chapitre montrent la performance technique des procédés développés avec des stratégies innovantes afin de diminuer notamment l'impact environnemental de l'extraction en utilisant divers leviers (sélectivité, approches zéro-déchets, bioextraction, etc.). Cependant, ces études sont souvent à des niveaux de maturité technologique faibles et les gains environnementaux sont souvent hypothétiques et très rarement quantifiés. De plus, les quelques évaluations de coûts de ces procédés sont souvent largement incomplètes, se limitant généralement aux prix des réactifs et des métaux produits. Une meilleure intégration des enjeux économiques, environnementaux et sociaux est par ailleurs nécessaire afin d'identifier les procédés les plus soutenables. En particulier, « une description détaillée des procédés, incluant une analyse des flux d'énergie et de matières ainsi qu'une évaluation des risques (par exemple à travers une évaluation de l'impact environnemental, une analyse de cycle de vie ou une analyse de coûts-bénéfices) est nécessaire pour déterminer la « meilleure technologie ». Ces innovations doivent ensuite être comparées aux pratiques actuelles d'extraction primaire afin de démontrer leur supériorité en termes de durabilité » (E. Ujaczki et al., 2018). À titre d'exemple, à ce jour, il n'existe pas d'analyse de cycle de vie (ACV) harmonisée permettant de comparer de manière robuste et systématique la production primaire des ETR à leur récupération à partir de ressources secondaires telles que les résidus de bauxite, les cendres de charbon ou le phosphogypse.

De plus, si l'ACV est un outil fréquemment utilisé pour identifier les points chauds environnementaux de l'extraction des ETR, elle reste tributaire de données de qualité souvent inégale, ce qui a notamment été pointé pour des systèmes de production chinois (Wulf et al., 2017). Les inventaires disponibles sous-estiment souvent les flux radioactifs, les effluents chimiques, ou les impacts sur la biodiversité (Schreiber et al., 2021). Par ailleurs, les résultats dépendent fortement du logiciel utilisé, des bases de données et des hypothèses sur les procédés. Ces limites, mises en évidence par de nombreux auteurs (Schreiber et al., 2021; Wall et al., 2017; Weng et al., 2016), soulignent l'urgence d'une plus grande transparence et d'une standardisation accrue des approches d'ACV afin d'obtenir des comparaisons fiables, d'identifier les principaux points chauds environnementaux et de guider la transition vers des chaînes d'approvisionnement en ETR plus durables.

Enfin, les logiciels actuellement utilisés pour réaliser des analyses en termes de cycle de vie n'incluent pas les risques géopolitiques et géoéconomiques de l'extraction dans l'évaluation. Les indicateurs ACV installés dans les logiciels mesurent en effet uniquement l'épuisement des ressources minérales. L'utilisation de méthodes d'évaluation de la criticité des matières primaires comme les ETR pour analyser leur risque d'approvisionnement, comme la méthode GeoPolRisk offre une perspective nouvelle, « vers l'intérieur » du système. Il prend en compte des facteurs tels que la concentration du marché et la stabilité politique et évalue le risque d'approvisionnement lié à l'importation d'une ressource et la vulnérabilité au risque d'approvisionnement, abordant ainsi les dimensions économiques liées à la durabilité (Gemechu et al., 2017). De telles méthodes apparaissent plus alignées avec la politique européenne actuelle, la Commission européenne ayant affirmé son intention d'intégrer la souveraineté stratégique, notamment

en ce qui concerne les matières premières critiques, comme un aspect clé de ses politiques industrielles et d'éco-conception⁸.

Ces manques soulignent la nécessité de développer des approches intégrées, combinant ACV, analyses technico-économiques, impacts environnementaux globaux et prise en compte des bénéfices associés à la valorisation des co-produits et à l'évitement de la mise en stockage des déchets. Une évaluation complète de la soutenabilité de ces procédés telle que proposée par Ujaczki et al. (E. Ujaczki et al., 2018), prenant en compte l'ensemble de ces critères, reste donc à développer pour guider les choix technologiques et politiques (cf. Figure 4.23 ci-dessous).

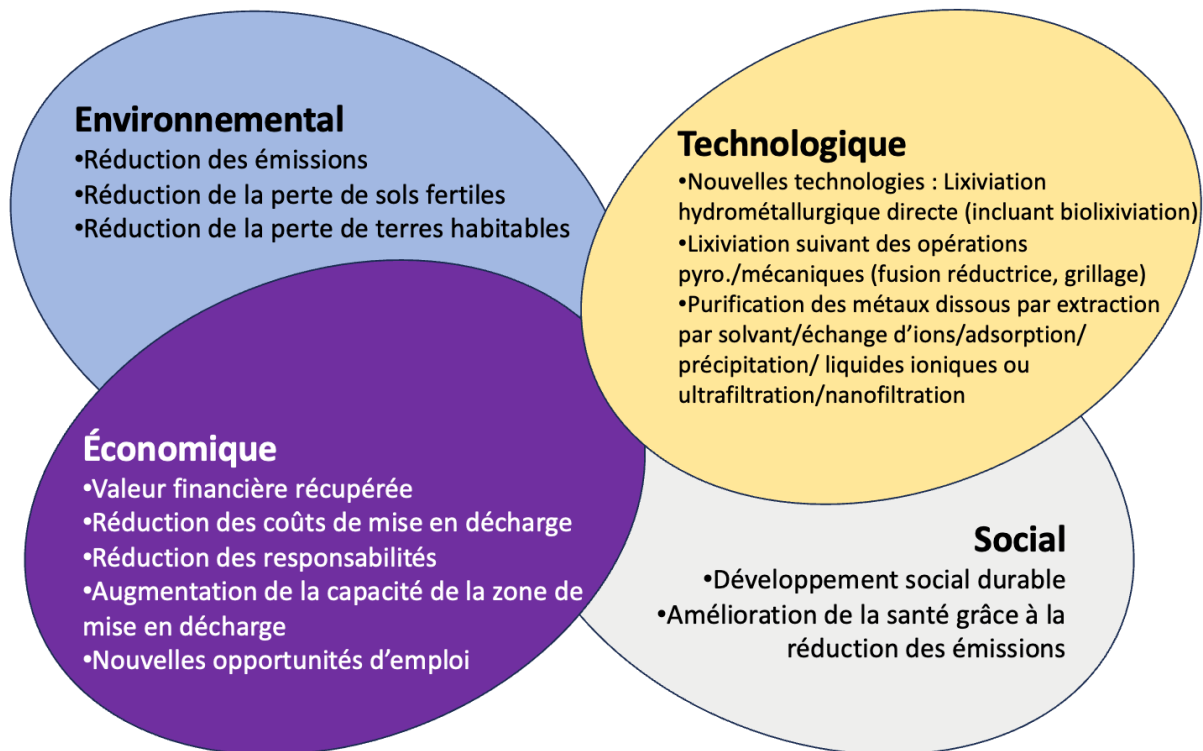


Figure 4.23 Bénéfices de l'extraction d'ETR à partir de sources secondaires. Adapté de (E. Ujaczki et al., 2018). Sous licence CC BY-NC.

En résumé, 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 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 bastnaésite et la monazite nécessitent par exemple beaucoup de réactifs chimiques et d'énergie, tandis que l'eudialyte, 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,

⁸ Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au Comité des régions : Résilience des matières premières critiques, (COM(2020) 474 final), 3 septembre 2020.

permettent de réduire significativement les émissions de CO₂. 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 géopolitiques d'approvisionnement révèlent que les gains environnementaux peuvent parfois déplacer la charge vers de nouvelles vulnérabilités économiques, 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 GeoPolRisk 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.

4.3 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 s'ancrent localement que s'ils sont partagés.

Le droit minier connaît des évolutions importantes (devoir de vigilance par ex.) 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 dans lesquelles sont produits ou extraits les ETR dans d'autres pays pour ensuite être importés 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.

L'extraction des terres rares connaît un intérêt croissant. Les usages des terres rares ainsi que les possibilités de recyclage (et leurs limites) tels qu'examinés dans les parties 1 et 2 de ce rapport montrent que l'extraction primaire des terres rares demeure nécessaire dans la situation actuelle et est fortement encouragée par la législation européenne, notamment au travers du Règlement sur les matières premières critiques. Élaborer des trajectoires de sobriété permettant une diminution de l'usage et de la consommation des terres rares amène néanmoins à se questionner sur les usages les plus prioritaires (voir partie 1). Cela suppose également de s'interroger sur les conditions de l'extraction. Cette partie se focalise sur l'intégration dans le processus extractif des problématiques sociales et environnementales, telle qu'elle existe à l'heure actuelle et telle qu'elle pourrait être envisagée pour extraire autrement.

Dans le corpus analysé, peu d'articles sont spécifiques à l'extraction des terres rares (voir zoom ci-dessous), mais les impacts environnementaux et sociaux de l'extraction minière en général sont aujourd'hui bien documentés par les scientifiques.

ZOOM. Les impacts environnementaux et sociaux de l'extraction des terres rares : exemples

Langkau et Erdmann, et Harpprecht et al., évaluent dans leurs travaux les impacts environnementaux de chaque kilogramme d'ETR produit en termes de toxicité humaine (notamment via la pollution de l'air et de l'eau), d'écotoxicité pour les écosystèmes aquatiques, d'acidification et d'eutrophisation des milieux (Harpprecht et al., 2024; Langkau & Erdmann, 2021). Ces impacts peuvent être exacerbés dans les zones où l'exploitation minière est mal réglementée ou où l'exploitation illégale est courante, comme dans certaines régions de Chine, où l'extraction des ETR conduit à une pollution par des substances radioactives et métalliques. Les auteurs mentionnent également que certains sites d'extraction utilisent des procédés particulièrement polluants comme la lixiviation acide. Par exemple, dans le sud de la Chine, cette méthode entraîne une forte contamination des sols et des cours d'eau. De plus, l'approvisionnement en produits chimiques nécessaires à cette lixiviation, comme le sulfate d'ammonium ou l'acide sulfurique, est lui-même source de pollution significative. Ces articles montrent que l'approvisionnement futur en terres rares pour les technologies vertes ne peut être durable sans une gestion responsable à plusieurs niveaux : améliorations technologiques des pratiques d'extraction et de transformation, renforcement de la réglementation, gouvernance environnementale renforcée, réduction de la demande et promotion du recyclage.

Werker et al. ont quant à eux évalué les risques sociaux liés à la production d'aimants en terres rares dans différentes chaînes de valeur : Chine, Australie-Malaisie et États-Unis-Japon par le biais d'Analyses du Cycle de Vie Social (ACVS) (Werker et al., 2019). En Chine, par exemple, l'exploitation minière illégale contribue à environ 22 à 25 % du volume de l'extraction nationale de terres rares, contribuant à une pollution sévère et à des risques sociaux tels que la corruption et la concurrence déloyale (Werker et al., 2019). Ces évaluations révèlent des différences notables dans les niveaux de risque social. Par exemple, la chaîne d'approvisionnement australo-malaisienne de Mount Weld (la mine se situe en Australie, la transformation en Malaisie) a présenté le niveau de risque le plus élevé dans 22 des 42 catégories d'impact. La chaîne de valeur de Bayan Obo en Chine suit, avec un risque élevé dans 17 catégories. À l'opposé, la chaîne d'approvisionnement de Mountain Pass, liée aux États-Unis et au Japon, a montré le niveau de risque social le plus faible, n'affichant de mauvais résultats que dans trois catégories. Dans la catégorie d'impact liée à la corruption publique, la chaîne de Bayan Obo a enregistré le risque le plus élevé avec 320,9 heures de risque moyen, soit près du double de celui de Mount Weld (172,4 heures) et environ cinq fois plus que Mountain Pass (69,3 heures). Dans l'ensemble, ces résultats démontrent l'importance de prendre en compte les risques sociaux spécifiques à l'extraction des ETR en parallèle des implications environnementales dans la chaîne d'approvisionnement mondiale (Werker et al., 2019).

Cependant, l'intégration des considérations humaines et environnementales dans l'extraction est bien plus large que la simple objectivation scientifique de l'impact de l'extraction sur les hommes et l'environnement : la prévention et la remédiation des impacts par les entreprises ou les États constituent un volet essentiel de la régulation de l'activité extractive.

La prise en compte des considérations humaines et environnementales dans le processus extractif s'inscrit ensuite dans le droit international de l'environnement et des droits humains. Le devoir de vigilance consacré notamment en France⁹, puis au sein de l'Union européenne¹⁰ vise à obliger les entreprises à appliquer et faire appliquer le droit international tout au long de la chaîne de valeur (voir Axe 1). Cette prise en compte se traduit également par l'émergence de la notion de « licence sociale et environnementale d'opérer », qui contraint un opérateur minier à obtenir l'autorisation d'opérer de l'État

⁹ Loi sur le devoir de vigilance du 27 mars 2017 (n°2017-399)

¹⁰ Directive 2024/1760 du Parlement européen et du Conseil du 13 juin 2024

(la licence légale), mais aussi en pratique de consulter les populations locales pour que ces dernières puissent accepter explicitement le projet (Licence dite Sociale et Environnementale d'Opérer ou Sustainable Development License to Operate - SDLO). Désormais, cette pratique de participation est aussi importante que le respect du droit national. En effet, il arrive que l'absence de licence sociale mette fin au projet minier malgré l'octroi d'une licence légale.

L'état actuel du droit national, européen et international comprend donc des obligations qui s'imposent aux entreprises minières. Ces obligations, limitées, ont été récemment étendues à l'ensemble des chaînes de valeurs. Comme le montrent certaines initiatives réglementaires comme le Règlement européen sur les matières premières critiques de 2024 (voir supra, partie 2.3), elles sont en tension avec les objectifs de relance des projets extractifs. Les sections 4.3.1 et 4.3.2 décrivent ces cadres et leurs limites, telles qu'analysées par la littérature. La section 4.3.3 montre comment les objectifs de transition environnementale réactualisent les références à la RSE et à la durabilité, en interrogeant un « extraire autrement » qui prendrait en compte des enjeux de justice sociale, environnementale et épistémique. La section 4.3.4 décrit les caractéristiques de cette « autre » extraction et avance quelques pistes pour la mener sur la base de propositions issues du corpus analysé.

4.3.1 L'émergence par la « *soft law* » des notions de responsabilité sociale et de durabilité : des mots d'ordre limités pour extraire autrement

L'émergence de la RSE dans le secteur minier s'inscrit dans un mouvement plus large de transformation des modes de régulation des activités extractives à partir des années 1990. Portée initialement par les entreprises elles-mêmes, des notions de « mine responsable » ou de « mine durable » se construisent sur une définition promue par les acteurs industriels, reposant sur des mécanismes de droit souple, des normes techniques volontaires et des dispositifs d'autorégulation - non contraignants donc, par définition, puisque pour créer du droit « dur » et contraignant seul l'État est compétent. À travers l'adoption de standards internationaux, les entreprises cherchent ainsi à démontrer leur engagement en matière environnementale et sociale, tout en conservant un contrôle sur les modalités de cette régulation.

4.3.1.1 Cadres et outils de la Responsabilité Sociale des Entreprises (RSE)

Les conséquences environnementales et sociales de l'extraction discutées dans les sections suivantes font l'objet d'une attention soutenue de la part des entreprises minières, dont certaines mettent en œuvre des techniques et procédés pour améliorer leurs relations avec les populations locales. Dans une situation où le « risque social » que posent les conflits autour des projets miniers est fréquemment considéré comme un des freins les plus importants (voire le plus important) à la réussite des projets miniers, les acteurs industriels et financiers du secteur ont progressivement cherché à réduire ce risque par différents mécanismes. **La « responsabilité sociale des entreprises » est ainsi devenue une composante indispensable des projets miniers** (Jenkins, 2004). La RSE est « un concept selon lequel les entreprises intègrent volontairement des préoccupations sociales et environnementales dans leurs activités commerciales et dans leur interaction avec leurs parties prenantes » (*Commission des communautés européennes, LIVRE VERT Promouvoir un cadre européen pour la responsabilité sociale des entreprises. 2001., s. d.*). La RSE vise à intégrer dans les pratiques des entreprises la prise en compte des implications environnementales et sociales des projets et qui comprend également des mécanismes de compensation sociale (via des rétributions directes ou indirectes vers les populations) ou technique (comme dans les cas de mesures de compensation de pertes de biodiversité (Ta & Campbell, 2023).

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, Yates et al. 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 (Yates et al., 2016). 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 Yates et al. 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 ».

Les normes internationales définissant la RSE partagent **cinq obligations communes** qui toutes revêtent la forme de clauses contractuelles ou d'actes unilatéraux entre parties à un contrat :

1. des mécanismes d'information et d'institution de la responsabilité dans l'entreprise,
2. une identification des chaînes de valeur afin d'instaurer une **traçabilité des biens et services**,
3. des **cartographies d'impacts** éventuels ou réels de l'activité de l'entreprise sur les droits de l'homme et de l'environnement,
4. des plans de **remédiation** de ces impacts,
5. des mécanismes de **plainte et de résolution des litiges** avec les parties prenantes ou les victimes de dommages dont tous constatent l'ineffectivité.

Ces bonnes pratiques sont d'abord d'**origine onusienne et donc du secteur public**. Elles font écho aux déclarations formulées lors du sommet mondial des Nations Unies sur le développement durable de Rio +20 (2012), dont certaines portent sur l'industrie extractive (voir zoom ci-dessous) et se manifestent dans un ensemble de documents comme les directives de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) sur la qualité de l'eau potable, le *Guide sur le devoir de diligence pour une conduite responsable des entreprises* (OCDE), *Guide sur le devoir de diligence pour des chaînes d'approvisionnement responsables en minerais provenant de zones de conflit ou à haut risque* de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE).

Ainsi, le *Guide OCDE sur le devoir de diligence pour une conduite responsable des entreprises*¹¹ présente un processus en six étapes visant à aider les entreprises à traiter les impacts négatifs réels et potentiels liés à leurs activités, à leur chaîne d'approvisionnement et à leurs relations d'affaires. Il commence par l'intégration de la conduite responsable dans les politiques et les systèmes de gestion de l'entreprise (afin que la diligence raisonnable fasse partie de la prise de décision). Vient ensuite l'étape d'identification et d'évaluation des impacts négatifs, suivie de l'action pour faire cesser, prévenir ou atténuer ces impacts. L'entreprise doit ensuite suivre la mise en œuvre et les résultats des mesures prises, puis communiquer publiquement et/ou aux parties prenantes sur la manière dont les impacts sont traités. Enfin, lorsque l'entreprise a causé ou contribué à un impact, ou lorsqu'il y a lieu, elle doit prévoir ou coopérer à des mécanismes de remédiation afin de contribuer à réparer les dommages.

Les principes mis en évidence dans ce contexte de l'ONU sont opérationnalisés dans des guides tels les *Stakeholder Engagement: A Good Practice Handbook for Companies Doing Business in Emerging Markets* (2007), *A Guide to Designing and Implementing Grievance Mechanisms for Development Projects* (2008), *Projects and People: A Handbook for Addressing Project-Induced In-Migration* (2009), ou encore *Strategic Community Investment: A Good Practice Handbook for Companies Doing Business in Emerging Markets* (2010).

¹¹https://www.oecd.org/fr/publications/2018/02/oecd-due-diligence-guidance-for-responsible-business-conduct_c669bd57.html

ZOOM. Référence aux activités minières dans les déclarations formulées lors du sommet mondial des Nations Unies sur le développement durable de Rio +20 (2012)

« 227. Nous sommes conscients que les minerais et les métaux jouent un rôle considérable dans l'économie mondiale et les sociétés modernes. Nous constatons que les industries extractives sont importantes pour tous les pays disposant de ressources minérales, en particulier les pays en développement. Nous constatons également que lorsqu'elles sont bien gérées, les activités extractives peuvent stimuler le développement économique général, réduire la pauvreté et aider les pays à réaliser les objectifs de développement arrêtés sur le plan international, dont ceux du Millénaire. Nous reconnaissons que les pays ont le droit souverain d'exploiter leurs ressources minérales en fonction de leurs priorités nationales et le devoir de respecter, ce faisant, les conditions énoncées dans les Principes de Rio. Nous reconnaissons également que les activités extractives devraient s'accompagner d'un maximum de bienfaits sociaux et économiques et limiter leurs répercussions sur l'environnement et la société. À cet égard, nous sommes conscients que les gouvernements ont besoin de moyens importants pour développer, gérer et réglementer leurs industries extractives dans l'intérêt du développement durable. »

« 228. Nous comprenons qu'il importe de mettre en place des cadres juridiques et réglementaires, des politiques et des pratiques solides et efficaces pour le secteur minier, qui apportent des bienfaits économiques et sociaux et comportent des garanties concrètes visant à réduire les incidences négatives sur la société et l'environnement et à préserver la biodiversité et les écosystèmes, notamment après la fermeture des mines. Nous appelons les gouvernements et les entreprises à s'efforcer de continuer d'accroître la responsabilité et la transparence ainsi que l'efficacité des mécanismes existants destinés à prévenir les flux financiers illicites provenant des activités extractives. »

Du côté des industriels et du secteur privé en général, et dans le contexte de cette mobilisation internationale, **le projet *Mining Minerals and sustainable development* qui voit le jour en 1999, à Davos**, est ainsi le premier projet dont l'objectif est d'évaluer le rôle du secteur minier dans le développement durable, en mettant en place une série d'indicateurs. Ainsi, à la fin de l'année 1998, neuf des plus grandes entreprises minières mondiales décident de lancer une nouvelle initiative visant à opérer un changement significatif dans la manière dont l'industrie aborde les problématiques minières qu'elles nomment ***Global Mining Initiative***. Par l'intermédiaire du *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), ces entreprises mandatent l'International Institute for Environment and Development pour réaliser une étude de cadrage, destinée à définir les grands défis que pose le développement durable au secteur minier à l'échelle mondiale, et proposer les contours d'un processus participatif. L'objectif est de mettre en place une dizaine d'indicateurs. **Ce projet donne naissance au standard IRMA**, qui permettrait de mettre en place une mine responsable (sur auto-déclaration et audit) autour de 5 grandes catégories fonctionnant en collèges pour tendre vers un équilibre des intérêts (investisseurs, acheteurs, miniers d'un côté, syndicats, populations autochtones et ONG de l'autre) :

1. intégrité (conformité légale et transparence des revenus),
2. responsabilité sociale,
3. responsabilité environnementale,
4. fermeture et remise en état,
5. systèmes de management performants (évaluation des impacts, monitoring).

Ce cadre, dont le fonctionnement par le biais de différents collèges permet un équilibre des intérêts représentés (investisseurs, acheteurs et industries de la mine d'un côté, et syndicats, populations autochtones et ONG de l'autre), est devenu le plus utilisé pour la mise en place de projets dits « durables » (Kamenopoulos et al., 2015). Il a été prolongé par des initiatives régionales qui ont elles-mêmes produit des lignes directrices. Par exemple, les **Seven questions to sustainability (7QS)** est l'un

des principaux outils de management de la branche nord-américaine du Mining Minerals and sustainable development. Le 7QS aide les décideurs à répondre à des questions en rapport avec sept thèmes :

1. l'engagement
2. les personnes
3. l'environnement
4. l'économie
5. les activités traditionnelles et non marchandes
6. les dispositions institutionnelles et la gouvernance
7. la synthèse et l'apprentissage continu.

Le cadre exige des décideurs qu'ils définissent des réponses idéales à chacune des sept questions, ainsi que des indicateurs et des mesures spécifiques pour ces réponses, qui doivent être précisés au cas par cas.

L'organisation patronale mondiale de la mine (**International Council on Mining & Metal (ICMM)**) ainsi que la plupart des sociétés minières font référence à ces « bonnes pratiques » qui visent à intégrer la RSE, les ODD et autres recommandations de l'ONU dans l'industrie extractive, et notamment à mieux prendre en compte les parties prenantes, et pas seulement les actionnaires ou l'État¹². D'autres guides existent, parmi lesquels : *Planning for Integrated Mining Closure: Toolkit* (2008), *Human Rights in the Mining and Metals Industry: Overview, Management Approach and Issues* (2009), *Human Rights in the Mining and Metals Industry: Handling and Resolving Local Level Concerns and Grievances* (2009), *Mining Partnerships for Development: Using Resource Endowments to Foster Sustainable Development. Mapping In-Country Partnerships* (2010), *Good Practice Guide: Indigenous Peoples and Mining* (2010), *Human Rights in the Mining and Metals Industry: Integrating Human Rights Due Diligence into Corporate Risk Management* (2012), *Community Development Toolkit: A set of 20 revised and updated tools intended for use throughout the mining project cycle* (2012).

À ces documents de référence s'ajoutent des initiatives visant à mesurer des critères de durabilité des activités minières. Le **GRI framework** et son **Mining and Metals Sector Supplement (MMSS)**¹³ est le cadre relatif à la durabilité dans le secteur minier le plus largement adopté. Ce cadre intègre des lignes directrices pour le *reporting*, avec 150 indicateurs. **En 2011, 95% des 102 rapports publiés par des entreprises minières se basaient sur ce modèle qui reste cependant très général, sans focus territorial ou géographique** (Fonseca et al., 2013). D'autres cadres de gouvernance et de suivi des activités minières existent et prennent en compte des indicateurs renforcés (Azapagic, 2004) ou le travail de Basu et Kumar « **Innovation and technology driven sustainability performance management (ITSPM)** » fondé sur les principaux piliers de performance (sociale, environnementale, économique) lui aussi très conceptuel et théorique (Basu & Kumar, 2004). On peut également mentionner des initiatives régionales, comme les lignes directrices et indicateurs rassemblés au début des années 2000 par la *Mining Association of Canada* dans l'initiative **Towards sustainable mining**. Cette approche propose 18 indicateurs dans 6 catégories et vise à développer les performances internes des sites miniers en rassemblant des données exploitables et comparables.

Un concept plus récemment introduit dans le secteur extractif est celui de la « **Licence sociale et environnementale d'opérer** » (SDLO), qui désigne l'obligation pour un opérateur minier d'obtenir l'autorisation d'opérer de l'État (la licence légale), mais aussi en pratique de consulter les populations locales pour qu'ils acceptent le projet (Prno & Scott Slocombe, 2012). La licence sociale et environnementale d'opérer peut se définir comme « un contrat social informel qui vise à combler le fossé

¹² https://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/documents/2021-01/tome_09_parangonnage_final24032017.pdf

¹³ https://transparencylab.org/Documentation/Advocacy.%20Monitoring.%20Sustainable%20-%20Responsible%20Initiatives/Global%20Reporting%20Initiative/GRI%20Sustainability%20Reporting%20Guidelines%20Mining%20and%20Metals%20Sector%20Supplement_2010.pdf

entre les points de vue des principales parties prenantes impliquées dans les activités minières » (Komnitsas, 2020) (cité par (Roche et al., 2023)). On peut considérer que cette simple pratique de participation est au moins aussi importante que le droit positif national : parfois la licence légale est subordonnée à cette pratique de participation ; parfois la licence légale est accordée, mais l'absence de licence sociale met tout de même fin au projet minier. L'étude de Montagne d'Or en Guyane a démontré que l'absence d'une SDLO pouvait entraîner l'échec d'un projet, même lorsque celui-ci était juridiquement valide (Lhuillier & Thibault, 2020). Dans ce cas, le refus de prendre en compte les préoccupations locales - en particulier la technique de séparation de l'or de la roche avec le recours ou non de cyanure- a conduit à une opposition massive et, *in fine*, à l'abandon du projet. Mais il est aussi possible d'interpréter la notion de licence sociale comme la réalisation du principe de démocratie environnementale, d'effet « direct » du droit international (Lhuillier and Thibault 2020). L'importance qu'a acquise la notion de « licence sociale » peut être rapprochée de la place majeure des relations avec les parties prenantes dans les initiatives RSE. Une revue systématique de la littérature sur la RSE dans le secteur minier montre ainsi qu'une majorité de travaux sur le sujet se penche sur les relations entre les entreprises et leurs « parties prenantes » (Rodrigues & Mendes, 2018).

4.3.1.2 . Question de l'adaptation des approches relevant de la RSE à la spécificité des terres rares

Les approches relevant de la RSE dans le domaine minier citées dans la section précédente ne sont pas spécifiques aux terres rares. Certains auteurs (dont (Kamenopoulos et al., 2015)) ont mis en évidence le fait que la production d'ETR est un processus tellement spécifique, que les outils envisagés pour le reporting des sociétés ne sont actuellement pas adaptés à ce cas particulier. Parmi ces caractéristiques spécifiques, on peut noter : la présence de thorium et/ou d'uranium dans la plupart des minéraux contenant des ETR, ce qui est directement lié à de la radioactivité incidente ; le fait qu'il n'est pas possible d'avoir une procédure standardisée pour l'extraction et le traitement des 15 (ou 17) ETR qui ont chacun leurs spécificités ; ou encore : les caractéristiques de marché comme la domination chinoise, etc. Le tableau ci-dessous (cf. Tableau 4-1) fait état de ces particularités qui justifieraient de créer des outils spécifiquement adaptés à l'évaluation des projets liés à l'extraction d'ETR. **Les auteurs invitent en effet à créer de nouveaux indicateurs qui prendraient en compte la spécificité des ETR** : selon eux, si une entreprise était capable de démontrer à travers le reporting qu'une mine d'ETR peut contribuer positivement à la société, elle serait d'autant plus à même de remplir les critères pour obtenir une licence sociale pour opérer.

4.3 L'intégration des considérations humaines et environnementales dans l'extraction

Tableau 4-1 Particularités des projets miniers d'ETR d'après (Kamenopoulos et al., 2015), p. 96-97.

Particularités de différenciation	Environnement	Économie	Société	Technologie	Géopolitique
Présence de radioactivité	Impact négatif sur une longue période Besoins d'un cadre juridique et de politiques gouvernementales strictes	Impact négatif aux échelles locale/régionale/nationale	Peut créer des troubles à l'échelle locale/nationale	Nécessité d'utiliser des technologies avancées pour le contrôle	Peut créer des conflits avec les États voisins
Marché	Forte demande de produits finaux à base d'ETR → augmentation des projets ETR, et des risques de dommages environnementaux Les produits finaux à base d'ETR dans les énergies « vertes » contribuent à réduire le CO ₂	Valeur ajoutée mondiale extrêmement élevée de la mine au marché Contrôle élevé de l'offre par la Chine Les ETR ne sont pas échangés sur des marchés/bourses de métaux Risque d'impacts négatifs sur l'économie locale (contamination ou usage accru d'infrastructures)	Les ETR couvrent des besoins de la société mondiale (téléphones mobiles, énergies vertes, etc.)	Crée une demande d'avancées en ingénierie et de main-d'œuvre qualifiée	Peut créer des conflits et des guerres commerciales entre pays
Contrebande	Procédés miniers environnementaux déficients	Marché noir Absence de transparence	Conditions de travail dangereuses/insalubres Corruption	Qualité inconnue des produits vendus	Risques de conflit Corruption
Extraction illégale	Procédés miniers environnementaux déficients	Marché noir Absence de transparence	Corruption	Qualité inconnue des produits vendus	Risques de conflit Corruption
Médias	Rôle négatif : diffusion de mauvaises nouvelles en cas d'accident probable et/ou d'impacts environnementaux Rôle positif : information optimiste au public sur la nécessité, l'importance et le lien entre ETR et développement d'une économie verte (échelles locale/régionale/mondiale)	Rôle positif : information optimiste au public sur la nécessité, l'importance et le lien entre ETR et développement d'une économie verte (échelles locale/régionale/mondiale)	Rôle négatif : diffusion de mauvaises nouvelles en cas d'accident du travail probable et/ou de conditions dangereuses/insalubres Rôle positif : information optimiste au public sur la nécessité, l'importance et le lien entre ETR, économie verte et lutte contre le changement climatique	Rôle positif : information optimiste au public sur la nécessité, l'importance et le lien entre ETR et développement de produits de haute technologie	Rôle négatif : diffusion de mauvaises nouvelles en raison de conflits probables (échelles locale/régionale/mondiale)
Domination de la Chine dans l'extraction et le raffinage des ETR	Procédés miniers environnementaux déficients	Risques économiques majeurs : la Chine pourrait dominer le secteur mondial des hautes technologies	Conditions de travail dangereuses/insalubres	Risques technologiques majeurs : la Chine pourrait dominer le secteur mondial des hautes technologies (des énergies propres aux industries de défense/spatiales)	Risques géopolitiques majeurs : la Chine pourrait dominer le secteur mondial des hautes technologies (des énergies propres aux industries de défense/spatiales)

4.3.1.3 Évaluation de la RSE

S'il est possible d'identifier quelques progrès dans la prise en compte des aspects environnementaux et des droits humains ainsi qu'un certain consensus autour de l'initiative pour la transparence des industries extractives et de la licence sociale pour opérer, la RSE ou le développement de la reconstruction environnementale pour la paix (autant d'initiatives qui participent de la mise en œuvre des Objectifs de Développement Durable (ODD), sur la production et la consommation soutenable), il est certain que l'ambition est immense et que les incertitudes sont nombreuses (Dou et al., 2023). Loin de faire consensus, les cadres d'évaluation mobilisés pour qualifier une activité minière comme « responsable » ou « durable » sont multiples, fragmentés et porteurs d'enjeux politiques (Kamenopoulos et al., 2015). Entre indicateurs environnementaux standardisés, critères de responsabilité sociale d'entreprise et référentiels internationaux souvent élaborés par ou avec les industriels, ces cadres reflètent des conceptions variées — et parfois contradictoires — de ce que signifie « faire mieux » en matière extractive.

De nombreux travaux ont mis en évidence l'intérêt, mais aussi les limites de la RSE, en analysant notamment les conséquences économiques positives des compensations proposées aux populations locales, mais aussi les risques de dépendance économique qu'elles encourrent (Jenkins & Obara, 2006), la capacité de la RSE à réduire certains conflits à court terme au bénéfice des entreprises minières, mais sans pour autant éliminer les causes des oppositions (Bezzola et al., 2022), ou encore l'intérêt de l'intégration dans les démarches de RSE de mesures environnementales comme la protection de la biodiversité, mais aussi leurs conséquences sociales négatives (Ta & Campbell, 2023). De façon générale, le concept de responsabilité a été bien étudié par la doctrine qui a notamment montré son impact limité en ce qui concerne les industries extractives (Hund, 2017).

Fonseca, McAllister et Fitzpatrick soulignent des lacunes communes dans cinq cadres de durabilité utilisés dans le secteur minier (Fonseca et al., 2013). Ils repèrent notamment :

- **L'absence d'intégration systématique** : La plupart des cadres, à l'exception partielle du 7QS, adoptent une approche cloisonnée qui analyse chaque indicateur indépendamment, négligeant ainsi les compromis et les synergies entre les dimensions de durabilité. Par exemple, l'impact des émissions de gaz à effet de serre sur la biodiversité locale n'est pas analysé de manière systémique, ce qui affaiblit l'utilité de ces cadres pour une vision holistique de la « mine durable ».
- **Un focus limité sur les effets à long terme et les ressources non renouvelables** : Aucune des approches ne prend en compte la question de l'épuisement des ressources, ni n'offre de solutions pour préserver les stocks minéraux pour les générations futures. Cette lacune est cruciale dans un contexte où la durabilité devrait inclure une gestion responsable des ressources non renouvelables.
- **Un problème d'échelle** : La plupart des cadres se concentrent uniquement sur la performance organisationnelle sans tenir compte des effets sur différents niveaux géographiques. Cette limite est problématique, car les impacts environnementaux peuvent varier selon le contexte régional et nécessitent une évaluation différenciée.

Bien qu'ils fournissent des outils pour mesurer certains aspects de la durabilité, **les cadres de durabilité analysés** (Fonseca et al., 2013) **échouent à capturer l'ensemble des impacts environnementaux et sociaux à long terme nécessaires pour une exploitation minière véritablement durable**. Les auteurs appellent à des cadres mieux intégrés, qui prendraient en compte les effets interconnectés et les compromis, et qui incluraient des évaluations de l'épuisement des ressources et de la résilience écologique à différentes échelles. En somme, la durabilité dans le secteur minier nécessiterait une refonte des méthodes d'évaluation actuelles pour aller au-delà de la simple évaluation de la performance passée et vers un véritable modèle de "green mining" adaptatif et prospectif.

De plus, les dispositifs existants, y compris lorsqu'ils s'appuient sur des notions relativement récentes comme la licence sociale pour opérer (SLO), apparaissent de plus en plus inefficaces. Des études montrent que la participation des populations locales dans la prise de décision reste symbolique et n'influence pas réellement l'issue des projets (Reveco, 2022). Les dispositifs actuels de consultation publique souffrent d'un manque de transparence, de temporalité inadaptée et d'un déséquilibre des rapports de force entre entreprises et populations locales (Komnitsas, 2020). Plusieurs facteurs contribuent à leur inefficacité :

- Temporalité inadaptée : les consultations interviennent souvent tardivement dans le processus d'autorisation, une fois que les grandes orientations du projet ont déjà été arrêtées.
- Absence de pouvoir décisionnel : les populations locales sont rarement en mesure d'influencer significativement les décisions finales.
- Mauvaise accessibilité de l'information : les documents techniques sont souvent complexes, rendant difficile la compréhension des impacts réels du projet pour les citoyens concernés.

On peut ajouter à la liste des critiques présentes dans le corpus étudié **l'inadéquation des mécanismes de compensation** mis en place par les entreprises et les gouvernements. En théorie, les communautés affectées devraient recevoir des indemnités proportionnelles aux dommages environnementaux et économiques qu'elles subissent. Cependant, une étude (Burtseva & Bysyina, 2019) sur la République de Sakha (Yakoutie) montre que **les méthodes de calcul des pertes ne prennent pas en compte les réalités locales des peuples autochtones**. Par exemple, les méthodologies appliquées dans la région de Sakha s'appuient sur des modèles développés pour d'autres zones de Russie, ne tenant pas compte des spécificités écologiques et culturelles des communautés touchées. Les indemnités sont souvent insuffisantes pour permettre **une transition vers un modèle économique alternatif**, ce qui condamne les peuples autochtones à une précarisation accrue après l'installation des industries extractives (Burtseva & Bysyina, 2019). Cet exemple montre que les compensations doivent être adaptées aux réalités économiques et écologiques locales, ce qui ne peut être réalisé sans assurer un rôle actif aux peuples autochtones dans l'évaluation des pertes. Le manque de prise en compte des dégâts sociaux et culturels dans les indemnités aggrave la défiance des populations locales.

Plus fondamentalement, des travaux en anthropologie, sociologie et sciences politiques ont mis en évidence le fait que le cadrage proposé par la RSE, et plus généralement par les normes et les standards visant à la prise en compte des impacts environnementaux et sociaux des activités minières, a lui-même des effets d'inclusion et d'exclusion. Ainsi, l'implication des populations locales conduit les entreprises minières à identifier des représentants censés parler au nom des populations concernées, les menant par là à redéfinir les organisations sociales existantes - au point que certains travaux parlent de « local washing » pour désigner les tensions, voire les incompatibilités, entre les parties prenantes interlocutrices des entreprises minières et la réalité des représentations sociales dans les territoires concernés (Murrey & Jackson, 2020).

Ce dernier point fait écho à un résultat plus général des travaux de recherche sur les controverses minières, qui montrent que même si de « meilleures pratiques sociales et environnementales » peuvent être mises en œuvre à l'échelle d'un projet donné et dans les cadres de la responsabilité sociale des entreprises examinant les conséquences des projets, les échelles spatiale et temporelle des projets ne sont pas nécessairement consensuelles. Les critiques des activités minières soulèvent des questions sur le passé et le futur des territoires concernés, sur les choix de société auxquels les projets miniers sont censés contribuer, sur la nature des territoires dans lesquels se déroulent les projets miniers et qu'ils contribuent à façonner (Laurent, 2023; Laurent & Merlin, 2021; Weszkalnys, 2014). La littérature qui s'est penchée sur ces critiques permet de conclure qu'en conséquence, la mobilisation des « meilleures pratiques » ne peut pas faire l'économie d'une réflexion plus générale sur les choix qui inscrivent les projets miniers dans des transformations territoriales plus vastes que les seules frontières des projets, au risque de perpétuer des désaccords profonds.

Des exemples très récents existent cependant de tentative d'inscription des « meilleures pratiques » dans les singularités territoriales : une recherche internationale récente sur l'acceptabilité sociale des projets miniers sous l'angle des « ententes » (meilleures pratiques d'acceptation sociales) conclues entre des entreprises minières et le milieu humain qui accueille ces activités a été menée sur trois continents (Amérique du Sud, Amérique du Nord, Europe, Afrique). Des modèles différents de « meilleures pratiques » apparaissent alors : importance des collectivités territoriales en Afrique pour corriger la notion post-coloniale de « populations locales » ; pratique de négociations en Europe pour pallier un droit de la participation des populations locales par des droits étatiques qui privilégient le pouvoir administratif ; intégration des populations autochtones à la négociation du contrat extractif avec l'entreprise extractive comme parties au contrat au Canada, dans des « ententes » qui sont autant de contrats extractifs, etc. (Lhuillier et al., 2024). Ce sont alors plusieurs « meilleures pratiques » post-coloniales qui sont proposées : africaines, européennes, canadiennes, voire une « meilleure pratique » commune, procédurale, permettant leur adaptation au continent ou produit minier par une recherche empirique, mêlant chercheurs, praticiens, entreprises et populations locales, respectant les singularités territoriales et historiques, mais aussi les projets politiques, par exemple la tendance mondiale à faire des populations locales des « parties » au contrat extractif, et, bien évidemment, la grande diversité des droits nationaux. Ces recherches sur les « best practices » - à la limite de la recherche ou littérature grise - du droit et de l'ethnométhodologie, mais aussi du management, financées par des organisations internationales, des universités, mais aussi des entreprises, influencent la construction de normes professionnelles de *soft law* et aussi, indirectement, le droit national ou international.

4.3.1.4 Conséquences de l'intégration des cadres de la responsabilité et de la durabilité dans le monde de l'investissement financier

Les normes et des standards définissant les principes et les méthodes de la RSE ont aujourd'hui utilisé dans le monde de l'investissement international qui a pu être analysé comme un moteur de la promotion de la RSE (Scholtens, 2006). Ceci implique que la RSE est intégrée par les entreprises dans des dispositifs de gestion des risques qu'encourent leurs projets, en particulier le « risque social » lié à des contestations (Frederiksen, 2018). Raisonner dans les termes du risque est une démarche ambivalente. L'intégration de la RSE dans ces dispositifs a pour effet de transformer des problématiques sociales et environnementales systémiques en composantes dont les risques sont mesurables, ce qui, pour certains auteurs, limite grandement les possibilités de développement inclusif effectif (Frederiksen, 2018). L'inscription de la RSE dans les pratiques de l'investissement international suppose que le caractère responsable des projets miniers soit visible pour des investisseurs attentifs à la prise en compte du risque social (Laurent & Merlin, 2021). Ceci se traduit par des indicateurs et des mesures, qui eux-mêmes reposent sur des choix (ex. : mesurer la présence de certaines espèces animales pour mesurer la biodiversité ; compter le nombre d'événements organisés avec des populations locales) qui conduisent à laisser dans l'ombre des dimensions non quantifiables ou systémiques plus difficilement saisissables par des indicateurs (ex. : évaluer la santé d'un écosystème, qualifier la légitimité sociale d'un projet) (Boiral, 2016). Plus généralement, l'extension de l'usage de la RSE est liée à la transformation des relations entre États et entreprises dans les projets extractifs. C'est que ce met en évidence Bonnie Campbell dans ses analyses de la dé-régulation du secteur minier dans les pays africains suite aux privatisations à partir des années 1980, puis de l'introduction d'une « re-régulation » via l'introduction de normes et de standards internationaux sur lesquels les États ont peu de prise (Ta & Campbell, 2023).

En résumé, 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). 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 du « risque social » tout en gardant la main sur les modalités de la mise en œuvre de cet engagement. La RSE est devenue un élément incontournable des projets miniers. Elle repose sur plusieurs outils et principes, comme la norme ISO 26000, la doctrine de l'ONU ou 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 onusiens ou sectoriels visant à définir des « bonnes pratiques ». Des initiatives structurantes comme le projet *Mining, Minerals and Sustainable Development* (1999) ont permis de créer des indicateurs et standards qui sont aujourd'hui très utilisés. D'autres 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. Un concept central désormais est celui de la *licence sociale d'opérer* (SLO), soit l'acceptation par les communautés locales, devenue aussi déterminante que la licence légale délivrée par l'État.

Ainsi, de nombreux travaux mettent en évidence les limites des normes, standards et « bonnes pratiques » utilisés dans le secteur extractif, à partir d'études réalisées sur des cas qui dépassent celui des terres rares. Les cadres existants souffrent souvent d'un manque d'intégration systémique, de la difficulté à prendre en compte les effets à long terme (comme l'épuisement des ressources), et d'un focus trop restreint sur la performance organisationnelle sans prise en compte des spécificités territoriales. Les initiatives menées au nom de la responsabilité ou de la durabilité reposent fréquemment sur des indicateurs souvent simplificateurs, qui tendent à rendre mesurables des problématiques systémiques, aux dépens d'une réelle transformation sociale et environnementale. Des 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. Certains articles du corpus 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. Par ailleurs, la question de l'adaptation des indicateurs et standards au cas particulier des terres rares est posée par certains auteurs. 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 leur adaptation aux spécificités locales. En conséquence, les approches menées au nom de la responsabilité ou de la durabilité demeurent contestées.

En conclusion, si le secteur extractif s'est saisi 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 », cette évolution reste 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 souvent à travers des normes qu'ils définissent eux-mêmes, ce qui leur permet de garder le contrôle sur les modalités d'application. Loin d'apaiser les controverses, les initiatives menées au nom de la responsabilité et de la durabilité en suscitent de nouvelles, en raison de leurs effets parfois simplificateurs, exclusifs ou contre-productifs. Il est donc essentiel de ne pas naturaliser ces termes ni de les considérer comme neutres ou consensuels. Au contraire, il importe de les interroger, de les replacer dans leur contexte politique et social, et d'explorer les voies d'une extraction qui assumerait pleinement ses enjeux et ses implications, en se confrontant explicitement à la conflictualité des projets miniers.

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

Les objectifs liés à la transition énergétique réactualisent les problématiques de la RSE en les déplaçant à travers une mise en récit autour de la transition et une juridification de la « responsabilité sociale » en « droit dur » (« *hard law* ») qui est juridiquement contraignante. Cette mise en récit n'est pas spécifique aux ETR, mais concerne tous les minéraux critiques définis par l'Union européenne.

En effet, les conflits miniers se multiplient à travers le monde, traduisant un rejet croissant des modèles extractifs traditionnels. Selon le rapport de l'*Environmental Justice Atlas*, plus de 300 conflits majeurs liés à l'extraction des ressources naturelles ont été recensés à l'échelle mondiale depuis 2010. En Europe, le projet minier de Montagne d'Or en Guyane illustre bien ces tensions. Malgré un cadre légal favorable, l'exploitation aurifère a été massivement contestée par les communautés locales et les organisations environnementales, qui dénonçaient une destruction massive de la biodiversité et des impacts sociaux négatifs (Lhuillier & Thibault, 2020). Sous la pression de la société civile, le projet a finalement été abandonné en 2019. Autre exemple, Dunlap et Riquito examinent 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 (Dunlap & Riquito, 2023). 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. 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 & Carvalho, 2023). Ces exemples montrent que les tensions autour de l'extraction ne sont pas seulement environnementales, mais aussi politiques et sociales, ce qui souligne l'échec des dispositifs d'acceptabilité sociale existants. Ces échecs relèvent principalement de l'absence de consultation et de compensation adéquate, malgré le cadre souple qui avait été mis en place dans une logique de RSE.

Ces diverses contestations ont alors justifié un durcissement du droit international, avec une traduction des règles souples de la RSE en règles juridiques contraignantes. La directive européenne relative au devoir de vigilance, malgré son assouplissement récent, tout comme la loi française de 2017 relative au devoir de vigilance, marque en effet une véritable rupture, en ce qu'elle renvoie désormais à une série d'obligations devant s'appliquer tout au long de la chaîne de valeur, et ce même sur le territoire d'États qui n'ont pas ratifié ou introduit les conventions dont sont issues ces obligations le cas échéant dans leur droit national avec effet direct (Lhuillier, 2022). La directive 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 (sur le devoir de vigilance en général, voir notamment (d'Ambrosio, 2021).

En faisant des entreprises des sujets de droit international en charge de son application, il s'agit à la fois d'écarter « l'écran » que constituait la RSE à l'application du droit international, mais aussi « l'écran » que représentent les États, destinataires traditionnels du droit international. Si l'on prend par exemple le principe de droit international de la démocratie environnementale, la consultation du public, au cœur de

la notion souple de « mine durable »¹⁴ « recouvre généralement les principes de l'accès à l'information, la participation à la prise de décisions et l'accès à la justice environnementale » selon le Rapport du Secrétaire général des Nations Unies sur les Lacunes du droit international de l'environnement et des textes relatifs à l'environnement : vers un pacte mondial pour l'environnement, 13 décembre 2018.

1. Premièrement, ce principe implique une obligation pour les États de rendre publiques les informations sur l'environnement détenues par les autorités publiques.
2. Deuxièmement, de permettre au public de participer à l'élaboration des décisions, mesures, plans, programmes, activités, politiques et instruments normatifs des pouvoirs publics qui pourraient avoir un effet sensible sur l'environnement.
3. Troisièmement d'assurer un accès effectif et abordable aux procédures administratives et judiciaires pour contester les actes ou omissions des autorités publiques ou des particuliers qui contreviennent au droit de l'environnement.

En France, la Convention d'Aarhus sur l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement, adoptée le 25 juin 1998, en ce qu'elle confère au public un droit à l'information et à la participation en matière environnementale, a un effet direct reconnu par le Conseil d'État¹⁵. La Charte de l'environnement de 2004 — qui possède une valeur constitutionnelle¹⁶ — dispose ainsi en son article 7 que « toute personne a le droit, dans les conditions et les limites définies par la loi, d'accéder aux informations relatives à l'environnement détenues par les autorités publiques et de participer à l'élaboration des décisions publiques ayant une incidence sur l'environnement ». La « démocratie environnementale » est donc un droit fondamental invocable par les requérants. **La France a introduit l'obligation de réaliser des études d'impact environnemental des projets susceptibles d'avoir une incidence sur l'environnement dès la loi de protection de la nature du 10 juillet 1976.** Deux directives communautaires, la Directive 85/337/CEE du Conseil du 27 juin 1985 relative à l'évaluation des incidences des projets sur l'environnement et la Directive 2001/42/CE du parlement européen et du conseil du 27 juin de 2001 relative à l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement ont été complétées en 2005 par l'introduction de **l'évaluation environnementale des plans et programmes avec la loi n° 2005-1319 du 26 octobre 2005 portant diverses dispositions d'adaptation au droit communautaire dans le domaine de l'environnement.** Le 3 août 2016 a été promulguée une ordonnance portant réforme des procédures destinées à assurer l'information et la participation du public à l'élaboration de certaines décisions susceptibles d'avoir une incidence sur l'environnement. L'ordonnance définit le droit d'accéder aux informations pertinentes, de demander la mise en œuvre d'une procédure de participation préalable (droit d'initiative citoyenne pour l'organisation d'une concertation), de bénéficier de délais suffisants pour formuler des observations ou propositions ou encore le droit d'être informé de la manière dont ont été prises en compte les contributions du public. Les décrets de 2022 donnent un pouvoir aux préfets d'exempter d'évaluation environnementale certains projets, anticipant ainsi sur le Règlement européen sur les matières premières critiques. La loi française est donc très restrictive.

La « vigilance » impose désormais directement aux entreprises extractives des normes issues de la RSE (transparence, « *mapping remediation* », dialogue avec les parties prenantes, transparence), mais les oblige aussi, virtuellement, à appliquer le droit international sur des territoires d'autres États, qu'il ait été transposé ou non. Ainsi, en fondant l'analyse sur des travaux traitant des minéraux critiques de manière plus générale, il est souvent fait mention de la nécessité de mettre en place des évaluations plus

¹⁴ Inscrite notamment dans le Principe 10 de la Déclaration de Rio, la Convention européenne pour la protection des droits de l'homme et des libertés fondamentales, art. 13 ; la Convention d'Aarhus, art. 9, les Principes de Johannesburg, préambule ou encore le Projet de pacte de l'UICN, art. 15 5.

¹⁵ Voir notamment les affaires CE, 12 avril 2013, n° 342409 (Assemblée), CE, 15 novembre 2021, n° 434742 ou encore CE, 6 octobre 2021, n° 446302.

¹⁶ Conseil d'État, décision d'assemblée du 3 octobre 2008, Commune d'Annecy (n° 297931).

rigoureuses et plus cohérentes des chaînes d'approvisionnement (Ali et al., 2017; J. Lee et al., 2020). La littérature propose une approche critique des méthodes actuelles d'évaluation des impacts environnementaux et des pratiques de gouvernance dans le secteur minier pour faire face à la demande exponentielle des minéraux critiques. Les effets négatifs de l'extraction minière au niveau social et en ce qui concerne les droits humains sont bien documentés (R. (Kevin) Zhou & Brown, 2024). Il existe un consensus pour considérer que l'extraction des métaux pourrait d'abord accentuer les vulnérabilités et maintenir voir accentuer les inégalités en créant de nouvelles injustices sociales. Plus de la moitié des projets miniers actuels se trouvent en effet à proximité ou sur des terres de populations autochtones (Ash, 2024; R. (Kevin) Zhou & Brown, 2024). La gouvernance et la transparence doivent également être repensées du fait de l'absence de cadre universel pour évaluer et rapporter les impacts environnementaux et sociaux des chaînes d'approvisionnement. Cela conduit ainsi à une disparité entre les entreprises et les pays. (Verrax, 2014) montre qu'il existe un déficit de coordination internationale : les efforts pour réguler l'exploitation et la distribution des terres rares restent fragmentés. Aucune structure globale de gouvernance n'est compétente pour harmoniser les normes environnementales et sociales tout en sécurisant les chaînes d'approvisionnement. Les rapports de durabilité actuels, bien que nombreux, manquent de cohérence et ne permettent pas de suivre avec précision les progrès des entreprises en matière de durabilité (Buu-Sao, 2021; Laurent & Merlin, 2021; Massé, 2021). Par exemple, le manque de standardisation des indicateurs dans les rapports des entreprises minières empêche de comparer leurs performances environnementales.

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

4.3.3.1 Transformation de la problématique de la « responsabilité », qu'elle soit « soft » ou « hard », par la transition énergétique

Dans le corpus analysé comme dans les discours publics consacrés à la question minière contemporaine (cf. introduction du rapport), la transition énergétique est un contexte qui explique le regain d'intérêt pour l'exploitation minière et sa relocalisation éventuelle, y compris en ce qui concerne les terres rares. Roche et al. ont réalisé une revue de la manière dont les médias abordent la question des impacts sociaux du secteur de l'extraction pour les besoins de la transition énergétique (Roche et al., 2023). Le premier impact concerne les communautés locales visant à mettre en balance l'accès à l'eau potable des populations et la quantité d'eau utilisée par les mines. Sont ensuite abordés le consentement libre et éclairé et la participation des populations locales ainsi que le respect des droits des populations autochtones. Apparaissent ensuite des interrogations sur la relocalisation forcée de personnes, les pollutions potentielles, le niveau d'emploi local généré par l'activité minière, les salaires décents et les bénéfices sociaux. Ainsi, les discours médiatiques reprennent les grandes priorités des démarches de RSE, réactualisées avec les nouveaux objectifs et règles de droit liés à la transition.

Les initiatives récentes comme le Règlement européen de 2024 sur les matières premières critiques soulignent la demande croissante en minéraux pour introduire des mesures censées faciliter l'approvisionnement européen, dont l'ouverture de mines en Europe. Dans ce texte comme dans l'ensemble du *Green Deal* européen, cette facilitation est associée à des exigences environnementales et sociales, souvent en référence aux cadres de la responsabilité et de la durabilité examinés dans la section précédente, et ne sont donc pas exempts des limites et critiques mentionnées plus haut (da Silva Hyldmo et al., 2024; Tröster et al., 2024). La présence de ces exigences n'empêche pas que des initiatives réglementaires liées à la transition affaiblissent par ailleurs des mécanismes issus du droit de

l'environnement. Ainsi, le règlement européen de 2024 sur les matières premières critiques modifie l'ordonnance n°2016-1058 du 3 août 2016 et le décret n°2016-1110 du 11 août 2016 relatifs aux règles applicables à l'évaluation environnementale des projets, plans et programmes et transposant la directive européenne relative à l'évaluation des incidences sur l'environnement (directive 2011/92/UE) posant le principe selon lequel les projets susceptibles d'avoir des effets importants sur l'environnement doivent faire l'objet d'une évaluation des incidences sur l'environnement et d'une information et consultation des populations impactées. Le règlement modifie aussi l'Ordonnance n° 2022-1423 du 10 novembre 2022 portant diverses dispositions relatives au code minier, qui avait étendu à de nouveaux cas le principe de la consultation publique.

Les analyses critiques des initiatives liant les objectifs de transition énergétique avec la relance de l'extraction mettent en évidence l'association entre des « transitions » multiples, notamment les transitions énergétiques et numériques (*dual transition* dans le vocabulaire européen) qui pourraient bien s'avérer contradictoires entre elles (par exemple si la transition numérique suscite un accroissement de la demande en énergie impossible à satisfaire sans conséquences environnementales et sociales négatives), qui révèle un parti pris centré sur la croissance continue des usages (pour un exemple récent d'une analyse critique dans ces termes : (Izoard, 2024)).

Dans le corpus analysé, des articles mettent en évidence l'ambivalence de l'association entre activités minières et transition énergétique. Si ces articles ne traitent pas spécifiquement des terres rares, ils invitent néanmoins à ne pas accepter comme une évidence l'association entre la transition et l'impératif de relocalisation, et à prendre en compte les tensions, voire les contradictions, entre les projets extractifs menés au nom de la transition et les objectifs environnementaux et sociaux. Ainsi, des études des projets de mine de lithium au Portugal menés dans le cadre d'une stratégie de souveraineté énergétique et de transition verte montrent que le développement des activités minières a lieu malgré l'absence de réglementations strictes sur les droits des communautés locales et les défauts des études d'impacts environnementaux souvent perçues comme biaisées en faveur des entreprises minières (Chaves et al., 2021; L. Silva & Sareen, 2023). En France, le regain d'intérêt pour les activités minières dans les années 2010 dans un contexte comme étant celui de la transition a conduit les acteurs publics et privés à promouvoir la notion de « responsabilité », pensée comme une condition nécessaire à la relance minière, et qui s'est traduit notamment par une initiative visant à produire un livre blanc définissant les bonnes pratiques de la « mine responsable ». Les travaux de sciences sociales qui ont étudié le renouveau minier français ont décrit les controverses associées à cette initiative (Chailleux et al., 2022; Laurent & Merlin, 2021; Merlin et al., 2021). Ils montrent que dans le contexte français, l'objectif de responsabilité et l'ambition de contribution à la transition se heurte à la prise en compte des conséquences environnementales encore présentes des activités minières passées, à la difficulté à réformer le code minier, et, plus généralement, à la difficulté à associer l'ambition de prise en compte des implications sociales et environnementales de projets miniers avec la mise en objectif des contributions des activités minières à une politique de transition environnementale partagée.

Les ambivalences de l'association entre transition énergétique et extraction sont visibles dans les discours publics qui opposent la vision du développement économique et de l'indépendance financière à celle de la protection de la communauté et de l'environnement. (Lill Rastad Bjorst, 2016) met en avant un exemple de conflit interne dans la communauté de Narsaq dans la région de Kujalleq au Groenland autour de l'extraction d'uranium : le syndicat des travailleurs groenlandais (SIK) soutient le projet minier dans l'espoir de créer des emplois et de revitaliser le marché du travail local. À cette vision, d'autres acteurs soutiennent que le sud du Groenland pourrait tirer parti du changement climatique en développant une agriculture durable, diversifiant les sources de revenus de la région. La temporalité sur le long terme est une donnée importante pour contrebalancer les promesses économiques immédiates.

Ces ambivalences permettent d'expliquer que les objectifs liés à la transition n'empêchent pas les conflits autour des activités minières. En Suède, les peuples autochtones samis s'opposent à plusieurs projets d'exploitation de terres rares et de lithium, qui menacent leurs écosystèmes traditionnels et leur mode de

vie basé sur l'élevage de rennes (Bogojević, 2024). Ces populations dénoncent un processus de consultation biaisé et l'absence de prise en compte réelle de leurs droits territoriaux. Dans les pays du Sud, la contestation est encore plus marquée. Au Chili, l'exploitation du lithium dans le désert d'Atacama a provoqué des conflits avec les communautés autochtones, qui dénoncent la surexploitation des ressources en eau, dans une région déjà touchée par un stress hydrique sévère (Hailes, 2022). L'entreprise SQM, principal acteur de l'exploitation du lithium chilien, est accusée de consommer plus de 1 700 litres d'eau par seconde, menaçant directement les réserves en eau potable des populations locales. Le cas de l'extraction du lithium au Chili a été analysé comme une illustration de ce que certains auteurs désignent comme « l'extractivisme vert » (Jerez et al., 2021) et que nous discutons dans la section suivante.

4.3.3.2 De nouvelles formes d'extractivisme et de colonialisme vert

Les conflits miniers mettent en évidence le fait que les objectifs liés à la transition, loin de produire un consensus autour de la nécessité des activités extractives, tendent à produire de nouvelles asymétries, entre bénéficiaires réels ou supposés de la transition (par exemple les utilisateurs présents ou futurs des véhicules électriques) et les victimes des conséquences environnementales et sociales négatives des projets miniers. Cette asymétrie est renforcée par le fait que la répartition des métaux critiques et la distribution des bénéfices sont inéquitables puisqu'une grande partie se trouve sur le territoire des pays du Sud et leur exploitation est réalisée par certains pays du Nord (États-Unis, Europe, Australie, Chine).

La référence au colonialisme est souvent utilisée dans le corpus analysé pour rendre compte de ces asymétries, qui touchent souvent des communautés autochtones dont les relations problématiques avec l'extraction des ressources sont anciennes et connaissent une nouvelle actualité avec le regain d'intérêt pour l'extraction dans un contexte de transition. La reprise de la dynamique coloniale associée aux objectifs de transition, qui est souvent décrite par l'expression « colonialisme vert », est étudiée dans plusieurs sites à travers le monde. Le paradigme de la transition énergétique et la demande exponentielle en matières premières attirent en effet des investissements internationaux aussi bien au Nord qu'au Sud. Le Groenland, récemment mis en lumière par la géopolitique mondiale, attire les convoitises en raison de la présence de métaux critiques et stratégiques comme le néodyme, utilisé pour les éoliennes et d'autres technologies bas-carbone. **Cet intérêt ravive les tensions coloniales à travers la mise en place de différentes formes de violences.** Canelas et Carvalho montrent que les populations locales, et en particulier les communautés autochtones, sont confrontées à la reproduction des inégalités historiques du modèle extractif colonial (Canelas & Carvalho, 2023). Dans le même sens, Ash et Dou et al. dénoncent le fait que la charge sociale de la transition énergétique est portée de manière disproportionnée par les populations autochtones (Ash, 2024; Dou et al., 2023). Boetzkes et Diamanti montrent comment l'entreprise australienne Greenland Minerals Ltd (GML), tente de s'appropriier les ressources groenlandaises à travers l'exploitation de la montagne Kuannersuit, en dépit des protestations de la population locale (Boetzkes & Diamanti, 2023). 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 semblent inoffensifs, mais 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 terres rares comme des commodités neutres, 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 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 (Boetzkes & Diamanti, 2023). 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. GML a engagé des consultants britanniques, qui n'ont jamais visité Narsaq, pour produire des rapports d'émissions de poussière.

Cette externalisation des évaluations environnementales sans implication locale est une forme de violence, car elle marginalise les connaissances et les préoccupations des résidents. Ash montre également que les impacts sociaux peuvent en fait débiter à partir du moment où des rumeurs circulent quant à un projet minier (Ash, 2024). Le caractère technique, le cadre de connaissances et les mots clés sont créés par des scientifiques, spécialistes des grands groupes, ou encore des États du Nord, ce qui fait que de toute façon il est difficile d'inclure les populations autochtones dans les discussions. On peut donc noter la nécessité de réévaluer la manière dont la connaissance et les savoirs sont intégrés dans le secteur des métaux critiques. La difficulté des groupes autochtones à influencer la production de savoirs à l'échelle internationale peut être illustrée par la prise en compte encore très limitée des connaissances autochtones en particulier lors de l'évaluation de l'impact et la planification. Leurs savoirs sont souvent mis de côté et ne sont pas aussi valorisés que les savoirs techniques et technologiques. Par exemple, en Suède, pour la mine Kaunisvaara and Stihke les connaissances du peuple sami ont été ignorées en grande partie, en particulier lors de l'évaluation des impacts. Cette sous-représentation a non seulement entraîné des erreurs de calcul sur les zones de perturbation minière estimées dans la région, qui ont été considérablement étendues de 500 m à 10 km, mais a également précipité une série d'impacts socioculturels, notamment le déplacement de communautés, la destruction de vestiges culturels et la perturbation de la transmission des connaissances traditionnelles. Zhou et Brown **plaident pour développer des stratégies plus inclusives de reconnaissance de la légitimité de divers systèmes de savoirs, en particulier ceux des communautés autochtones qui sont directement affectées par les projets d'extraction** (R. (Kevin) Zhou & Brown, 2024).

Toutefois, le colonialisme vert n'est pas réservé aux relations entre États du Nord bénéficiant des ressources et États du sud subissant les conséquences de l'extraction. D'une part, les relations coloniales peuvent exister au sein d'un même pays en lien avec l'exploitation des ressources. On peut le constater en Australie, où l'analyse spatiale des minéraux critiques et des données socio-économiques montre que certaines des régions les plus défavorisées d'Australie abritent le plus grand nombre de mines et de gisements de minéraux critiques - et que la répartition inéquitable des impacts et des bénéfices de l'exploitation minière persiste en l'absence de réformes majeures des politiques et des pratiques (Burton et al., 2024). C'est également le cas en Suède, où le projet Kallak a été étudié pour mettre en évidence la perpétuation de relations coloniales asymétriques avec le *Green Deal* Européen (Bogojević, 2024). D'autre part, et comme le montre le cas suédois, de nombreux travaux présents dans le corpus étudié montre que le colonialisme vert se déploie également dans les outremer et dans les territoires périphériques de l'Europe, mais aussi dans les États membres de l'Union. Dunlap et Riquito examinent ainsi 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 (Dunlap & Riquito, 2023). 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 d'extractivisme vert 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 & 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.

Cet exemple souligne la contradiction entre les objectifs écologiques affichés et les pratiques extractives destructrices sur le terrain. De fait, Pim explore les formes de contestation non-violente contre l'extractivisme en Galice depuis 50 ans, dont un projet de mine de terres rares à Galinheiro (Joam Evans Pim, 2021). En reprenant le cadre théorique de l'environnementalisme des pauvres (Martinez-Alier, 2002) et celui d'écologie de libération (Peet & Watts, 2010; R. (Kevin) Zhou & Brown, 2024), il insiste sur le lien intrinsèque qui existe entre l'environnement et la subsistance des communautés rurales, dont les pratiques sont ancrées dans des pratiques collectives de défense des communs, des territoires et des identités locales. La mise en danger de l'un par des projets miniers est donc nécessairement une mise en danger de l'autre. Ainsi Pim montre que ces conflits ne sont ni nouveaux ni isolés, mais s'inscrivent dans une histoire longue de résistances rurales à l'extractivisme. Ces luttes s'opposent à un extractivisme promu comme solution au chômage et au déclin rural, mais qui renforce la dépossession au profit des grandes entreprises transnationales. Elles dénoncent également l'instrumentalisation de la transition pour légitimer la destruction écologique au nom d'une « croissance verte ». L'usage des ressources transversales telles que l'eau, l'énergie et le foncier en grandes quantités au détriment des populations locales est également dénoncé réduisant les ressources disponibles en quantité ou en qualité, affectant directement ou indirectement les écosystèmes locaux et aggravant les tensions, voire les conflits autour de l'eau, avec des impacts à long terme sur l'agriculture et les habitats naturels. Ces luttes sont vues comme catalyseurs d'un projet politique post-extractiviste, fondé sur la justice environnementale, la défense des communs et la démocratie territoriale. Il est également intéressant de noter le renversement des rapports de pouvoir dans l'activisme. Contrairement aux mouvements passés dépendant des ONG ou de partis politiques, les luttes récentes sont autogérées, horizontales et expertes.

En résumé, la transition énergétique ravive l'intérêt pour l'extraction minière, notamment en lien avec les minéraux critiques. La transition énergétique est au cœur du discours de la relance minière en Europe, mais cette association produit des ambivalences. D'une part la transition énergétique est régulièrement associée à la transition numérique, alors même que le développement des technologies numériques a des conséquences fortes en termes de croissance de la demande énergétique. D'autre part, l'association entre les activités minières et la transition est problématique si elle ignore les tensions environnementales et sociales que génère l'extraction. Les politiques comme le Green Deal européen, bien qu'encadrées par des normes de durabilité, montrent des contradictions entre objectifs écologiques et réalités extractives. Le cas du lithium au Portugal tel qu'analysé par plusieurs articles du corpus 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.

À l'échelle globale, la transition verte 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 sur ceux des territoires exploités. Au Groenland, en Suède ou au Chili, les conflits miniers montrent 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.

En réaction, de nombreux mouvements sociaux émergent, portés par des communautés locales qui dénoncent l'instrumentalisation de la transition écologique pour justifier la poursuite de modèles extractifs destructeurs. 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. Elles remettent en question l'idée que la croissance verte passe nécessairement par l'intensification de l'exploitation des ressources naturelles.

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, 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 ? Ces interrogations appellent à dépasser les cadres existants de la responsabilité ou de la durabilité, pour imaginer des formes de gouvernance capables de rendre véritablement collectives et démocratiques les décisions relatives à l'extraction des ressources.

4.3.4 Comment mieux faire pour extraire autrement

4.3.4.1 La prise en compte des populations locales : une question de justice sociale et environnementale

Un ensemble de travaux offre des pistes pour penser les relations aux ressources minérales dans des termes différents de ceux du colonialisme vert. Pour ce faire, un premier enjeu est celui de la justice environnementale, notamment autour des inégalités d'exposition aux risques de pollution sans qu'elles bénéficient réellement des retombées économiques. Lhuilier, dans son analyse des injustices socio-environnementales associées à l'extraction des minéraux critiques (Lhuilier, 2024), introduit **l'idée de justice épistémique comme dimension essentielle d'une transition juste et inclusive, en se concentrant sur les injustices épistémiques discriminatoires et distributives. Un consensus peut être noté également sur le fait que les connaissances ancrées dans les communautés locales et autochtones devraient être mieux reconnues et intégrées dans les politiques et bonnes pratiques de transitions justes**. Zhou et Brown évoquent ainsi le risque que les charges les plus lourdes de la transition vers l'énergie propre pèsent sur les groupes marginalisés et sur les dimensions intersectionnelles de la race, de la classe et du genre, reproduisant les injustices de l'ère des combustibles fossiles sous la forme de « zones de sacrifice vertes » (R. (Kevin) Zhou & Brown, 2024).

Les auteurs identifient deux types d'injustices épistémiques : l'injustice discriminatoire, où les savoirs locaux sont ignorés, et l'injustice distributive, qui limite l'accès à l'information pour les communautés locales. Les populations autochtones possèdent une connaissance profonde des écosystèmes locaux, mais cette expertise est rarement intégrée dans la gouvernance minière, réduisant leur capacité à influencer sur les décisions qui les concernent directement. L'injustice distributive, qui désigne la répartition inéquitable de l'information, est un obstacle majeur pour les communautés affectées. Les résidents locaux manquent souvent de données environnementales sur les projets miniers en raison d'une fragmentation

de l'information. Cette inégalité empêche les résidents de s'engager activement dans le débat et de défendre leurs intérêts dans les négociations. La justice environnementale dans l'industrie des minéraux critiques ne se limite pas aux impacts locaux, mais elle s'étend également à des préoccupations de cosmopolitanisme et d'externalités négatives (Canelas & Carvalho, 2023). La justice cosmopolite repose sur le principe de la reconnaissance de la citoyenneté mondiale, qui nous oblige à envisager la justice au-delà des frontières et des chaînes de valeur. Des modèles de cogestion sont proposés avec un rôle consultatif obligatoire des communautés locales dans l'évaluation environnementale notamment.

La justice épistémologique est quant à elle définie comme une catégorie appartenant à la justice environnementale qui repose sur la prise en compte des populations souvent invisibilisées, dans une conception non coloniale, non orientée vers l'occident et le libéralisme. Elle peut s'étudier au travers de deux éléments : la discrimination et la redistribution (R. (Kevin) Zhou & Brown, 2024). **La question de la justice environnementale intègre également les questions de justice restaurative qui prennent en compte la réhabilitation des écosystèmes affectés par l'extraction des minéraux critiques, tout en offrant des compensations pour les dommages subis.** « Il est nécessaire de prendre davantage conscience du fait que ces avantages socio-économiques et environnementaux ont été construits sur la base des charges sociales et environnementales auxquelles sont confrontés les communautés et les pays d'origine. En l'absence de possibilités d'apprentissage social, les consommateurs d'énergie restent largement inconscients des effets négatifs que l'extraction et le traitement des minerais peuvent avoir sur les communautés locales, les écosystèmes et les travailleurs » (Q. Liu et al., 2022). Au-delà des compensations financières, des programmes de restauration basés sur les connaissances locales, permettant ainsi aux communautés d'être impliquées dans la revitalisation de leur propre environnement, devraient être proposés. **Ash abonde dans le même sens : les impacts sociaux de l'extraction minière ne sont pas suffisamment pris en compte actuellement dans les projets, il n'y a pas d'exigence juridique ou politique d'identifier et gérer les impacts sociaux des activités minières** (Ash, 2024).

Du côté de la justice distributive, qui concerne en particulier le partage des connaissances, de l'information et de l'éducation, l'injustice survient lorsque des populations sont mises de côté des processus de diffusion du savoir. D'après Zhou et Brown, « l'apprentissage social sur les métaux critiques, y compris les ETR, est rarement présent en dehors des contextes de l'enseignement supérieur. Contrairement à l'industrie des combustibles fossiles, qui a été reconnue publiquement pour ses impacts socio-environnementaux négatifs sur les émissions de gaz à effet de serre et le réchauffement climatique, le public dispose de peu d'informations, y compris de données provenant d'entreprises en amont telles que Tesla et Apple, sur les implications socio-environnementales et économiques complexes de l'industrie des CM (Flexer et al., 2018; Kramarz et al., 2021). Cela constitue un obstacle important à la compréhension du public » (nous traduisons) (R. (Kevin) Zhou & Brown, 2024). **Ce manque de connaissances et transparence ne permet pas une prise de décision éclairée et alignée sur les besoins et préoccupations de l'ensemble des parties prenantes : les décideurs n'ont pas accès à l'ensemble des éléments qui leur permettraient de prendre des décisions cohérentes, ce qui peut exacerber de nouveaux conflits sociaux et environnementaux.**

Suivre les approches ancrées dans la justice environnementale, distributive et épistémique suppose de penser l'extraction dans des termes différents du respect des principes de « responsabilité » ou de « durabilité » décrits en 4.1.1, afin de prendre en compte l'histoire longue des sites miniers, mais aussi les connexions sociales, économiques et matérielles qui lient le site minier d'une part aux collectivités affectées, d'autre part à toutes les composantes des chaînes de valeur. On peut lire en ces termes une proposition (Laurent, 2023) qui critique la manière dont les projets miniers sont territorialement réencastrés. Loin d'être neutre, la territorialisation des projets extractifs repose souvent **sur une « politique contextuelle du territoire », qui considère le territoire comme un simple cadre passif à connaître, maîtriser et aménager, plutôt que comme un produit des rapports sociaux, juridiques et techniques.** Cette approche conduit à minimiser les conflits et les incertitudes, tout en renforçant une vision technocratique et dépolitisée de l'extraction. Trois opérations sont néanmoins fondamentales : **maintenir, mettre en valeur et élaborer un destin commun** (Laurent, 2023). Cela implique d'abord de

reconnaître les effets durables des activités minières sur les milieux et les sociétés. Ensuite, il s'agit de valoriser les ressources en tenant compte de la pluralité des usages et des acteurs. Enfin, une mise en politique du territoire est nécessaire et ne se limite pas à la seule « acceptabilité » sociale, mais repose sur la confrontation des intérêts, des mémoires et des aspirations dans une logique de co-construction des territoires pensés comme un assemblage dynamique, traversé par des relations de pouvoir, des affects et des temporalités hétérogènes. L'idée de « produire autrement » pourrait ici se traduire par une approche plus inclusive et transparente dans la gestion des risques et des impacts de la mine, avec un accent sur l'information et la participation de la communauté ainsi que la prise en compte d'alternatives économiques à la mine.

En mettant l'accent sur les choix politiques liés à l'extraction et dont les frontières dépendent des collectifs affectés, ces approches invitent à considérer qu'extraire autrement ne passe pas nécessairement par des décisions prises par les acteurs miniers (y compris au nom de la responsabilité ou de la durabilité) au sein du périmètre temporel et spatial de leurs projets. Evans Pim souligne ainsi la capacité des mouvements de contestation à étendre leur base sociale et à internationaliser les conflits, à l'instar du réseau ContraMINAcción ou de l'inscription des terres communes (*montes veciñais*) dans les registres internationaux de conservation (ICCA, IUCN). Il met en évidence une transformation des dynamiques de pouvoir : ce ne sont plus les ONG ou partis qui guident les luttes, mais les communautés elles-mêmes, capables de mobiliser des savoirs techniques et juridiques dans une perspective d'autonomie politique.

4.3.4.2 Extraire autrement : des approches à explorer

Si on considère 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), alors la conduite des projets miniers doit s'inscrire dans une politique de la transition — au sens où les projets doivent être 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. Le corpus analysé permet d'identifier plusieurs approches susceptibles de contribuer à cette perspective.

4.3.4.2.1 Évaluation environnementale et prise en compte des dommages culturels et sociaux

L'intégration des savoirs autochtones dans les études d'impact est une demande croissante, mais rarement appliquée de manière effective. Un exemple parlant dans le corpus analysé (Burtseva & Bysyina, 2019) met en lumière les insuffisances des processus d'**expertise ethnologique**, censés évaluer l'impact des projets extractifs sur les communautés locales. En théorie, ces expertises devraient permettre d'identifier **les dommages sociaux, culturels et économiques**, mais en pratique, elles se limitent souvent à des aspects techniques et environnementaux. Plus généralement, c'est la science elle-même qui se révèle inadaptée, car les questions traitées par les méthodes d'évaluation et de consultation ne sont pas celles qui préoccupent réellement les populations, notamment les indemnisations. L'exemple des projets miniers en Yakoutie montre que **les mécanismes d'expertise actuels ne permettent ni une véritable participation des populations locales ni une évaluation complète des pertes subies** (Burtseva & Bysyina, 2019).

Ce cas permet d'identifier l'intérêt de la production de connaissance impliquant les populations elles-mêmes, ceci non seulement pour améliorer les relations entre projets miniers et populations, mais aussi pour améliorer le contenu des évaluations d'impact environnemental, dont les limitations pour intégrer les effets indirects notamment sur la biodiversité et les chaînes d'approvisionnement sont connues

(Lasselin et al., 2024). Cela peut passer par la révision des méthodologies d'expertise pour intégrer pleinement les impacts sociaux et culturels, la création d'instances mixtes de suivi des projets avec participation autochtone et experts indépendants, des mécanismes de recours juridiques pour garantir que les recommandations des expertises soient appliquées, ou encore l'intégration des populations dans l'élaboration des méthodes d'évaluation des impacts, proche de la science participative. En bref, il est nécessaire de développer des méthodes régionales ou locales de calcul des pertes/dommages des populations locales et des peuples indigènes, qui organisent l'interaction des utilisateurs du sous-sol avec les autorités et les représentants des communautés claniques engagées dans l'artisanat traditionnel. La science et les procédures d'impact doivent ainsi intégrer dans ses méthodes des données comme les structures sociales et culturelles des populations locales, en les associant à leur élaboration. Pour Burtseva et Bysyina, ces propositions passent par des accords tripartites entre entreprises, autorités et communautés locales, inspirés des accords en vigueur au Canada et en Alaska, où les peuples autochtones participent à la gouvernance des projets extractifs et obtiennent une part directe des revenus générés (Burtseva & Bysyina, 2019). Ces accords font eux-mêmes l'objet d'une littérature critique soulignant leurs limites (voir *supra*). Les utiliser pour extraire autrement suppose une participation active des populations concernées, le maintien de la possibilité de concilier l'extraction avec d'autres activités économiques, voire de privilégier d'autres trajectoires de développement, et enfin la réduction de la dépendance aux matières premières.

4.3.4.2.2 Production, circulation et mise à disposition des données

L'un des principaux défis pour extraire autrement réside dans le manque de transmission efficace des connaissances scientifiques vers les décideurs politiques, les citoyens. Comme le soulignent Buschke et al.), les connaissances scientifiques sur l'extraction des matières premières sont souvent fragmentées et difficiles d'accès, limitant leur intégration dans la prise de décision politique (Buschke et al., 2023). L'accès à l'information est un facteur clé pour permettre une participation citoyenne éclairée. Or, les données sur les ressources minières et leurs impacts environnementaux restent principalement accessibles aux acteurs industriels et institutionnels (Jorgensen et al., 2023).

L'amélioration de l'accès aux informations pour permettre des formes de participation active pourrait se traduire par :

- L'intégration des technologies de suivi (imagerie satellite, données ouvertes) dans les évaluations environnementales et leur mise à disposition dans des plateformes publiques de suivi des impacts des projets extractifs accessibles aux communautés locales. Ainsi, l'utilisation des satellites Copernicus pour surveiller l'exploitation aurifère en République du Congo montre que **la technologie peut renforcer la transparence et la conformité aux réglementations environnementales** (Buschke et al., 2023).
- La création de **bases de données ouvertes et accessibles aux citoyens**, permettant un meilleur suivi des projets extractifs.
- La mise en place d'un cadre réglementaire obligeant les entreprises à divulguer leurs impacts environnementaux et sociaux et leur méthodologie de manière transparente. Des outils comme la norme ITE peuvent être des dispositifs pertinents à cet égard (voir zoom ci-dessous).

ZOOM. La norme ITIE

La Norme ITIE 2023 est définie par ses créateurs comme « est la référence mondiale en matière de transparence et de redevabilité dans les secteurs pétrolier, gazier et minier » (<https://eiti.org/fr/norme-itie>). Elle introduit des exigences visant à accroître la compréhension publique quant à l'impact de la transition énergétique sur les secteurs pétrolier, gazier et minier et à éclairer l'élaboration des politiques. Elle renforce les exigences visant à lutter contre les risques de corruption, à améliorer la collecte des recettes et à promouvoir l'égalité entre les genres. Les groupes multipartites jouent un rôle clé en veillant à ce que la mise en œuvre de l'ITIE aborde les défis les plus significatifs en matière de gouvernance du secteur extractif dans chaque pays mettant en œuvre l'ITIE. Les Exigences de l'ITIE sont des exigences minimales et les pays qui s'engagent à les mettre en œuvre sont encouragés à les dépasser lorsque les parties prenantes le jugent opportun. L'ITIE exige des divulgations sur la gestion du secteur extractif non seulement sur le territoire des États qui s'y soumettent, mais aussi tout au long de la chaîne de valeur, permettant aux parties prenantes de comprendre les lois et les procédures relatives à l'attribution de droits d'exploration et de production, le cadre juridique, réglementaire et contractuel s'appliquant au secteur extractif et les responsabilités institutionnelles de l'État dans la gestion du secteur (Lhuillier, 2024).

La création de procédures placed-based auxquels les instruments juridiques régionaux, internationaux devraient renvoyer comme standard d'application du droit. Par exemple, la plateforme Africa Knowledge Platform, développée par le Centre commun de recherche de la Commission européenne, vise à faciliter le dialogue entre les chercheurs et les décideurs grâce à des outils interactifs et des récits numériques. Cette plateforme¹⁷ très visuelle et facile à utiliser rassemble des ensembles de données, des récits, des outils interactifs et des partenariats dans plus de 60 disciplines et priorités politiques. La plateforme de connaissances sur l'Afrique contient par exemple des recherches pertinentes pour la politique sur les matières premières de l'Afrique, notamment les matières premières critiques. Des données interactives et un langage accessible permettent de communiquer des recherches - du CCR ou d'autres sources - situées dans les politiques telles la stratégie UE-Afrique, le Green Deal européen et son plan d'action pour l'économie circulaire, la vision minière de l'Union africaine et ses objectifs de développement durable, etc. (Buschke et al., 2023).

La mise en place de "courtiers du savoir" indépendants pour aider les communautés locales à comprendre et à utiliser les données scientifiques dans leurs revendications peut s'avérer pertinente. Les communautés locales qui sont touchées de manière disproportionnée par l'exploitation minière sont matériellement et cognitivement éloignées de ceux qui exercent une influence sur les pratiques, les politiques et les institutions de la chaîne d'approvisionnement. Il en résulte que ces communautés ne sont pas reconnues par les producteurs et les consommateurs qui bénéficient de l'extraction de minerais essentiels. Des médias sociaux peuvent être utilisés comme moyen d'aider les communautés locales éloignées à être reconnues comme des parties prenantes importantes et comme véhicule d'information du public consommateur de minerais, comme le montre des études de cas sur les impacts de l'extraction du lithium au Chili. Des flux d'informations « télécouplés » permettent de communiquer la nature des impacts de l'extraction du lithium pour faire progresser la "justice de reconnaissance". Des études montrent ainsi le rôle potentiel des médias sociaux en tant que mécanisme pour : (1) améliorer le flux d'informations et de connaissances des sites miniers vers les réseaux sociaux, (2) donner la parole aux parties prenantes locales qui ne sont pas entendues, (3) améliorer la justice de reconnaissance pour ces communautés éloignées (Agusdinata et al., 2023).

¹⁷ <https://africa-knowledge-platform.ec.europa.eu/>

4.3.4.2.3 Agir sur les chaînes de valeur

Dans le contexte de la transition énergétique, les terres rares occupent une place stratégique dans les chaînes d'approvisionnement mondiales. Toutefois, leur gouvernance ne peut se limiter aux seuls États producteurs ou aux mécanismes de marché traditionnels. La structuration contemporaine de la chaîne de valeur des ETR révèle un système de gouvernance complexe, dans lequel les acteurs non étatiques — entreprises multinationales, ONG, et organisations régionales — jouent un rôle croissant dans la définition des normes et des standards internationaux. Les multinationales minières, en position dominante, contrôlent la majorité des réserves et influencent l'ensemble des maillons de la chaîne : extraction, transformation, fixation des prix, certification. Parallèlement, les ONG ont acquis une capacité d'interpellation publique, imposant des exigences accrues en matière de transparence, de démocratie environnementale, et de justice sociale. Il devient ainsi indispensable d'adopter une approche systémique de la gouvernance des ETR, qui prenne en compte l'ensemble de la chaîne de valeur, depuis les conditions d'extraction jusqu'aux processus d'importation afin d'éviter toute externalisation des impacts sociaux et environnementaux. Dou et al. proposent une série de recommandations visant à renforcer la transparence, la redevabilité et la légitimité des chaînes d'approvisionnement (Dou et al., 2023). Ils appellent à la création d'un organisme global de coopération, dirigé par des ONG, afin de structurer une gouvernance internationale des métaux critiques fondée sur des principes environnementaux et de justice sociale. Un tel dispositif permettrait notamment de dépasser les approches fragmentées actuelles et de rééquilibrer les rapports de force entre États, industries et société civile. Les auteurs insistent également sur la nécessité de mettre en place une chaîne d'approvisionnement plus transparente, condition préalable à une véritable évaluation des impacts environnementaux et des atteintes aux droits humains. Dans cette optique, les auteurs suggèrent l'introduction d'une « *conflict mineral supply chain negative list* », sorte de liste négative des chaînes d'approvisionnement en minerais critiques identifiées comme problématiques afin de favoriser une régulation ciblée. Ces propositions font écho à la littérature sur la « licence sociale pour opérer », qui souligne le caractère subjectif de cette notion et son rôle dans la consolidation de la confiance entre les entreprises extractives et les parties prenantes (Kamenopoulos et al., 2015).

Toutefois, la littérature souligne la **résistance au changement des acteurs dominants, en particulier face à l'instauration d'indicateurs communs de durabilité**, pourtant essentiels pour anticiper les conflits et assurer une contribution effective du secteur à la société. Le cas de la Malaisie, où un projet d'usine de traitement des terres rares (ETR) est devenu un enjeu politique majeur lors des élections de 2013, illustre les tensions persistantes entre développement industriel, acceptabilité sociale et enjeux de souveraineté environnementale (Dou et al., 2023).

Les juristes travaillent ainsi sur le développement de mécanismes qui permettent une prise en compte de l'ensemble des parties prenantes, populations, mouvements collectifs, etc., dans la formation, mais aussi l'exécution des contrats extractifs, voire les litiges liés aux contrats extractifs. L'évolution des pratiques du monde de l'extraction se caractérise par une « co-construction » du projet, certains juristes reconnaissant alors à ces participants la qualité de « partie » au contrat extractif, à côté de l'entreprise extractive et de l'État hôte. L'une des voies explorées en ce sens est un « contrat de procédure environnemental » qui pourrait, par accord des parties, les faire participer aux décisions liées à l'ensemble du projet extractif. Ces contrats de procédure peuvent être différents selon les territoires, les continents, les produits miniers, régulant ainsi la chaîne de valeur en intégrant les singularités culturelles, politiques, géologiques, etc.

En résumé, l'extraction des minéraux critiques soulève des enjeux majeurs de justice sociale, environnementale et épistémique. Les populations locales et autochtones subissent souvent les effets négatifs de l'activité minière, sans en tirer les bénéfices économiques. Ces injustices prennent plusieurs formes : l'injustice épistémique, qui marginalise les savoirs locaux, et l'injustice distributive, marquée par un accès inégal à l'information et à la participation à la décision. Pour extraire autrement, il est nécessaire

d'envisager des moyens d'assurer la justice sociale, environnementale et épistémique. Ceci suppose de prendre en compte les savoirs traditionnels, profondément ancrés dans la connaissance des écosystèmes, mais pourtant rarement pris en compte dans la gouvernance minière. La reconnaissance de ces savoirs et la transparence de l'information sont essentielles pour permettre une participation active des communautés concernées et éviter la reproduction des inégalités.

Plus généralement, si on considère 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), alors la conduite des projets miniers doit s'inscrire dans une politique de la transition — au sens où les projets doivent être 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. Le corpus analysé propose des pistes dans cette direction. 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 valeurs. Au-delà de ces suggestions, le corpus analysé pointe vers la nécessité de repenser les modalités des choix relatifs aux projets miniers pour concevoir une extraction intégrée dans une politique 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.

Enfin, le corpus analysé amène à rappeler que la question extractive est une question en lien avec les logiques coloniales et post-coloniales: l'essentiel des articles étudiés concerne l'extraction dans les États du Sud pour des compagnies ou des marchés d'États du Nord, même si un marché Sud-Sud des minerais s'accroît (la mine dite alors « planétaire »). Ce constat est essentiel, car il pose la question de la « transposition » en Europe de ce savoir post-colonial sur les mines. En premier lieu, une transposition spatiale : des solutions concrètes pour « extraire autrement » bien qu'élaborées en Afrique ou au Canada dans un contexte post-colonial, peuvent être transposées telles quelles sur le territoire européen en cas de relocalisation de projets extractifs : l'Africa Knowledge Platform ou les « courtiers du savoir » ou encore les « ententes » avec les populations autochtones et les « contrats de procédures » inspirés d'expériences de quatre continents, peuvent inspirer une politique européenne des terres rares. En second lieu, une transposition conceptuelle : la question de la prise en compte des considérations des impacts humains et environnementaux est une question post-coloniale et la réponse a été historiquement la protection de plus en plus forte des hommes et de la nature par un droit qui tente de lutter contre la violence de ce que l'on nomme « l'extractivisme ». Or le droit européen relatif aux terres rares — au travers notamment du Règlement européen sur les matières premières critiques - semble prendre un chemin différent, en justifiant, au nom de la sécurité (et de la souveraineté) des atteintes au droit de l'environnement, et en particulier au droit des personnes affectées par un projet de participer aux décisions (cf. sectio, 2.3).

En conclusion, extraire autrement consiste nécessairement à associer la question « Comment extraire ? » avec les questions « Pour quoi et pour qui extraire ? ». Il convient d'observer, pour autant, que les solutions proposées par l'état de l'art pour répondre à l'ambition « d'extraire autrement » sont assez limitées. Cette sous-section ne fournit évidemment pas d'outils « clefs en main » pour assurer la justice environnementale et/ou une politique systémique du territoire, etc. La littérature analysée fournit peu d'outils prêts à l'emploi, mais ouvre des pistes qui sont souvent convergentes, et invite à des réflexions. Ainsi, l'évolution récente du droit extractif au Canada ou en Afrique, avec la mise en place de l'*Africa Knowledge Platform* ou de « courtiers du savoir », ou encore les « ententes » avec les populations autochtones, pourrait inspirer une politique européenne des terres rares.

4.3.5 Conclusion

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 — voire la reconfiguration — des logiques de dépossession et d'asymétrie de l'autre. Si le recours à des instruments juridiques plus contraignants, comme le devoir de vigilance, témoigne d'une reconnaissance croissante des impacts systémiques des chaînes d'approvisionnement, 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.

Dans le contexte d'une transition énergétique érigée en priorité politique et économique, l'extraction minière connaît un regain d'intérêt stratégique. Pourtant, cette transition, en se parant des vertus de la « croissance verte » et de la « souveraineté », tend 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, révélant les limites d'une gouvernance extractive fondée sur une participation réduite et une gestion technocratique des impacts.

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 re-politiser les choix technologiques et industriels, 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 des normes juridiques, mais aussi une refonte des modes de gouvernance des minerais stratégiques et plus particulièrement des terres rares, capable de restituer aux communautés concernées un pouvoir effectif de décision.

Autrement dit, « extraire autrement » ne peut se réduire 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 ne pourra advenir qu'en ancrant les projets extractifs dans une politique de la transition démocratique, construite avec et depuis les marges, 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.

4.4 Produire autrement des terres rares : vers une approche interdisciplinaire, contextualisée, territorialement et socialement ancrée

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). 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 récente en sciences humaines et sociales (SHS), tout comme les travaux en sciences de la durabilité (SD), converge ainsi vers la nécessité de repenser en profondeur les modalités d'extraction et de production des terres rares. Ces deux champs disciplinaires offrent des pistes prometteuses pour orienter les transitions à venir, mais soulignent également l'importance d'un croisement plus structuré de leurs approches. La revue de la littérature en SHS a montré l'importance d'augmenter la prise en compte et l'inscription sociale, territoriale et politique de l'extraction. Aux côtés de la priorisation des usages dans une perspective de sobriété, l'examen du corpus montre que les questions de démocratie participative, de co-construction des projets territoriaux en concertation avec les populations locales, l'augmentation des retombées positives pour le territoire et la prise en compte des externalités sont nécessaires à la réalisation de projets respectueux socialement et environnementalement. Les travaux existants suggèrent que l'exploitation de terres rares pour des objectifs de transition ne peut s'inscrire dans des territoires de façon robuste sans que ces objectifs ne soient partagés, sans pour autant fournir des outils clefs en main pour remplir cette condition. De leur côté, les SD apportent une vision des possibilités de transformation du secteur, notamment par la revalorisation des déchets miniers en ressources secondaires et des innovations des procédés d'extraction et transformation plus efficaces, moins coûteux énergétiquement et plus respectueux de l'environnement. En particulier, les déchets miniers de charbon et les résidus de bauxite présentent le plus gros potentiel en ETR par leurs volumes sur le territoire français (supérieurs à des dizaines de millions de tonnes). La transformation du statut de ces déchets en ressources secondaires pourrait limiter l'extraction de gisement primaire, en favorisant une approche circulaire du réemploi et de la réhabilitation des déchets miniers. Elle pourrait constituer un terrain à privilégier pour déployer de nouveaux types d'extractions basées par exemple sur des technologies très novatrices comme la biolixiviation. Bien qu'encore embryonnaire dans le secteur minier, l'exploitation de sources secondaires apparaît prometteuse dans différentes parties du monde, où des études pilotes se mettent en place.

Les auteurs de ce rapport, sur la base de la littérature étudiée dans tous les domaines, convergent vers la nécessité de dépasser les approches techniques ou techno-critiques pour articuler les avancées dans les domaines respectifs afin de rendre réelles des alternatives possibles à l'extraction des terres rares telle que nous la connaissons aujourd'hui. Ainsi, l'articulation de ces perspectives est indispensable pour

4.4 Produire autrement des terres rares : vers une approche interdisciplinaire, contextualisée, territorialement et socialement ancrée

concevoir une extraction véritablement « autre » — non pas seulement en termes technologiques, mais comme un projet collectif, orienté vers une durabilité partagée et encadrée par des institutions capables de réguler, d'arbitrer et de stabiliser des trajectoires territoriales durables.

Cette ambition soulève néanmoins une série de questions fondamentales vers lesquelles les recherches futures pourraient s'orienter afin de proposer des feuilles de route plus opérationnelles. Une piste de recherche consisterait à envisager les projets de territoire autour de nouvelles formes d'extraction comme la valorisation de sources secondaires ou de nouveaux procédés d'extraction. En effet, la littérature analysée en SHS montre que les études ne portent pas sur les méthodes d'extraction ou les sources alternatives proposées par la littérature en SD. De plus, la mise en concordance des temporalités — celle des dynamiques minières (cycles longs d'investissement et d'exploitation), du droit (souvent réactif), de la technique (rythmes d'innovation variables), du dialogue social (souvent discontinu), et de l'environnement (dégradation lente, effets différés), bien que complexe, constitue un levier de proposition d'une stratégie cohérente de production alternative plus à l'écoute des demandes sociales. Ce constat invite donc à une mise en dialogue, voire une articulation étroite entre les apports disciplinaires visant à intégrer davantage les aspects sociaux et territoriaux et pousse les SHS à penser l'extraction non comme un objet non figé, mais avec des formes d'extraction émergentes face auxquelles les problématiques sociales et environnementales évoluent, pouvant même aller jusqu'à l'amélioration de situations héritées d'une exploitation minière passée.

Parmi les alternatives explorées, l'exploitation des ressources secondaires, notamment la remobilisation des déchets miniers, offre un potentiel significatif. Elle permettrait de réduire les impacts environnementaux directs et les conflits sociaux liés à l'ouverture de nouveaux sites. Cependant, son passage à une réalité industrielle reste incertain. Bien que le potentiel apparait démontré en laboratoire, le degré de maturité technologique (*Technology Readiness Level*) n'a pas encore atteint la mise en œuvre opérationnelle. Sans cette démonstration et sans l'engagement du secteur minier, ces nouvelles pratiques pourraient être difficilement envisageables, car souvent éloignées des pratiques habituelles. De plus, les conditions de réalisation sont lourdes (accès aux ressources, stabilité réglementaire, acceptabilité sociale, coordination des parties prenantes), mais sont une opportunité pour (re)penser un système de régulation plus inclusif. Pour que les innovations techniques deviennent viables, elles doivent être adossées à un projet de territoire clair, impliquant les acteurs locaux, articulé à des politiques publiques de long terme et soutenu par un environnement institutionnel stable.

Ainsi, les travaux sur les formes de régulation de l'extraction centrés jusqu'ici sur les grandes exploitations invitent à engager des travaux sur les gisements secondaires, porteurs de réels enjeux de transformation. Ces terrains pourraient permettre de tester les conditions concrètes d'un changement de paradigme : gouvernance partagée, reconnaissance des passifs socio-environnementaux, co-construction des usages futurs. Le cas des boues rouges de Gardanne, par exemple, montre que les passifs miniers peuvent devenir les bases d'une remédiation environnementale, à condition d'être pris en charge collectivement. De même, les anciens sites charbonniers pourraient être requalifiés en y associant durablement populations locales, collectivités et entreprises.

Enfin, un dernier point critique porte sur la dimension économique. Les théories classiques des matières premières tendent à naturaliser la valeur des ressources, sans interroger ce qui la rend socialement et politiquement acceptable. Or, la construction de la valeur économique des terres rares est elle-même un objet de débat : elle peut, si elle est discutée à l'échelle du territoire ou du site, devenir un levier pour un débat démocratique sur les priorités d'usage, les formes de redistribution, ou les modalités de répartition des bénéfices. Ce champ reste encore peu exploré, mais mériterait d'être développé au croisement de l'économie politique, de la géographie économique et de l'anthropologie des ressources.

En somme, produire autrement des terres rares suppose un effort collectif d'interdisciplinarité, de territorialisation et de politisation. Il s'agit moins d'une simple transition technologique que d'un véritable projet de société, exigeant des formes nouvelles de coopération entre disciplines, entre institutions, industriels du secteur minier et des procédés, et entre acteurs des territoires concernés.

EXTRAIRE AUTREMENT

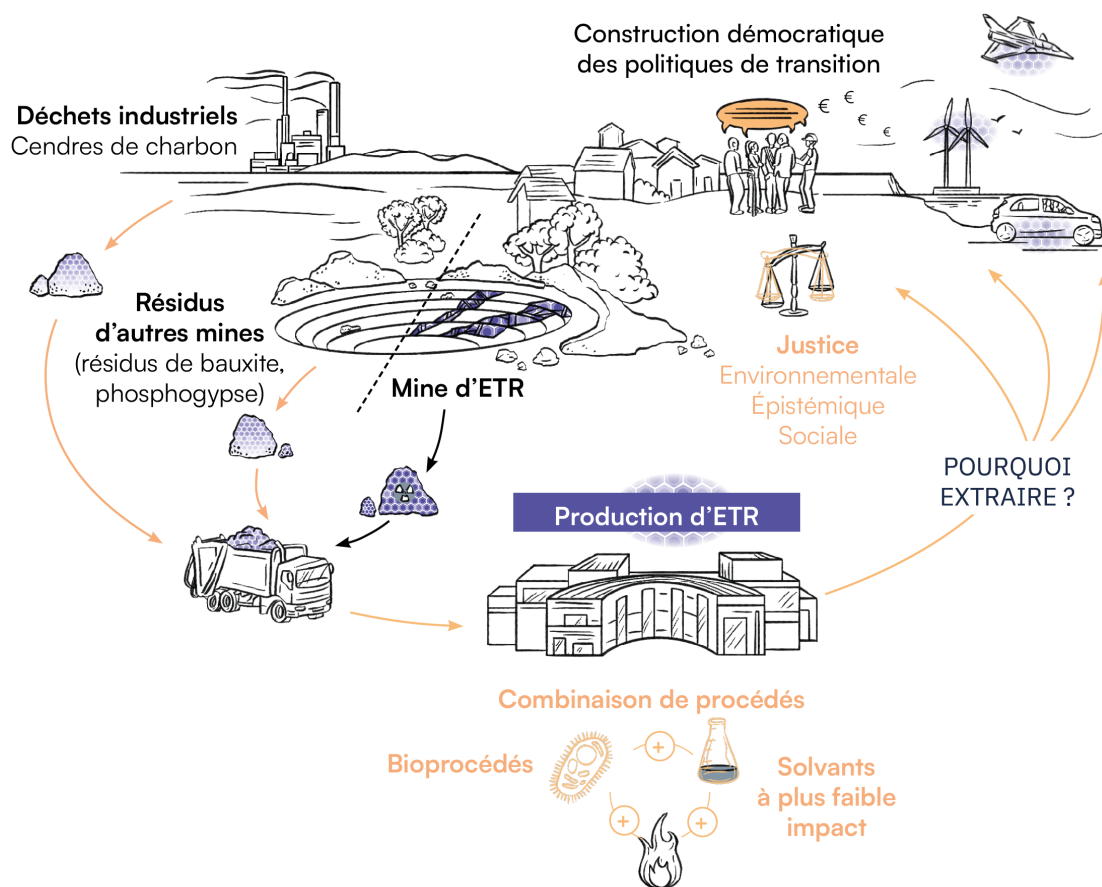


Figure 4.24 Conclusion du chapitre IV « Extraire autrement ». Les leviers sont en orange.

4.5 Liste des références du chapitre 4

- Abaka-Wood, G. B., Addai-Mensah, J., & Skinner, W. (2017). A study of flotation characteristics of monazite, hematite, and quartz using anionic collectors. *International Journal of Mineral Processing*, 158, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.11.012>
- Abaka-Wood, G. B., Xu, S., Ayedzi, L. D., Addai-Mensah, J., & Skinner, W. (2024). Flotation recovery of monazite from kaolinite using sodium oleate collector[]: Understanding mineral-collector interaction. *Minerals Engineering*, 209, 1-10. (rayyan-2243857). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108605>
- Abaka-Wood, G. B., Zanin, M., Addai-Mensah, J., & Skinner, W. (2018). The upgrading of rare earth oxides from iron-oxide silicate rich tailings[]: Flotation performance using sodium oleate and hydroxamic acid as collectors. *Advanced Powder Technology*, 29(12), 3163-3172. (rayyan-2245302). <https://doi.org/10.1016/j.appt.2018.08.019>
- Abdel-Rehim, A. M. (2002). An innovative method for processing egyptian monazite. *Hydrometallurgy*, 67(1-3), 9-17. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00134-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00134-2)
- Abeidu, A. M. (1972). OF MONAZITE FROM ZIRCON BY FLOTATrON. 1-7.
- Acosta-Gongora, P., Potter, E. G., Lawley, C. J. M., Petts, D., & Sparkes, G. (2022). Uraninite chemistry of the central mineral belt, labrador, canada[]: Application of grain-scale unsupervised machine-learning. *Journal of Geochemical Exploration*, 233, 1-27. (rayyan-2244389). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106910>
- Agusdinata, D. B., Eakin, H., Darnall, N., Jiang, B., & Romero, H. (2023). Advancing recognition justice in telecoupled critical mineral supply chains[]: The promise of social media. *Energy Research & Social Science*, 104. (rayyan-1279579547). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103264>
- 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(3). (rayyan-2244616). <https://doi.org/10.3390/min11030246>

- Alemrajabi, M., Rasmuson, A. C., Korkmaz, K., & Forsberg, K. (2017). Recovery of rare earth elements from nitrophosphoric acid solutions. *Hydrometallurgy*, 169, 253-262. (rayyan-2245380). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.01.008>
- Alemrajabi, M., Rasmuson, A. C., Korkmaz, K., & Forsberg, K. (2019). Processing of a rare earth phosphate concentrate obtained in the nitrophosphate process of fertilizer production. *Hydrometallurgy*, 189, 1-13. (rayyan-24596842). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105144>
- 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. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(50), 18475-18491. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c03268>
- Alguacil, F. J., & Robla, J. I. (2023). Recent work on the recovery of rare earths using ionic liquids and deep eutectic solvents. *Minerals*, 13(10), 1288. (rayyan-2244014). <https://doi.org/10.3390/min13101288>
- Ali, S. H., Giurco, D., Arndt, N., Nickless, E., Brown, G., Demetriades, A., Durrheim, R., Enriquez, M. A., Kinnaird, J., Littleboy, A., Meinert, L. D., Oberhänsli, R., Salem, J., Schodde, R., Schneider, G., Vidal, O., & Yakovleva, N. (2017). Mineral supply for sustainable development requires resource governance. *Nature*, 543(7645), 367-372. <https://doi.org/10.1038/nature21359>
- Aliena, A., Strehse, C., Munsch, M., Kosleck, S., Wierschem, A., & IEEE. (2023). Development of a differential pressure sensor for intelligent control of deep-sea mining applications. *Oceans 2023 - Limerick*, 1-5. (rayyan-2243933). <https://doi.org/10.1109/oceanslimerick52467.2023.10244515>
- Allegrini, E., Maresca, A., Mikael Emil Olsson, Maria Sommer Holtze, Boldrin, A., & Thomas Fruergaard Astrup. (2014). Quantification of the resource recovery potential of municipal solid waste incineration bottom ashes. *Waste Management*, 1-10. (rayyan-726049880). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.003>
- Alles, J., Ploch, A.-M., Schirmer, T., Nolte, N., Liessmann, W., & Lehmann, B. (2019). Rare-earth-element enrichment in post-variscan polymetallic vein systems of the harz mountains, germany. *Mineralium Deposita*, 54(2), 307-328. (rayyan-24596843). <https://doi.org/10.1007/s00126-018-0847-8>

- Anderson, C., Taylor, P., & Anderson, C. (2017). Rare earth flotation fundamentals[]: A review. *American Journal of Engineering Research*, 1-12.
- Antonick, P. J., Hu, Z., Fujita, Y., Reed, D. W., Das, G., Wu, L., Shivaramaiah, R., Kim, P., Eslamimanesh, A., Lencka, M. M., Jiao, Y., Anderko, A., Navrotsky, A., & Riman, R. E. (2019). Bio- and mineral acid leaching of rare earth elements from synthetic phosphogypsum paul. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 132, 491-496. (rayyan-2245096). <https://doi.org/10.1016/j.jct.2018.12.034>
- Anyik John Leo, Innocentia Gugulethu Erdogan, Waanders, F. B., Mkandawire, M., Nkambule, T. T. I., Mamba, B. B., & Fosso-Kankeu, E. (2022). Modified dendrimer nanoparticles for effective and sustainable recovery of rare earth element from acid rock drainage. *Application of Nanotechnology in Mining Processes: Beneficiation and Sustainability*. (rayyan-10656749). <https://doi.org/10.1002/9781119865360.ch1>
- Arichi, J., Goetz-Grandmont, G., & Brunette, J. P. (2006). Solvent extraction of europium(III) from nitrate medium with 4-acyl-isoxazol-5-ones and 4-acyl-5-hydroxy-pyrazoles. Effect of salts and diluents. *Hydrometallurgy*, 82(1-2), 100-109. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.04.004>
- Arrachart, G., Couturier, J., Dourdain, S., Levard, C., & Pellet-Rostaing, S. (2021). Recovery of rare earth elements (REEs) using ionic solvents. *Processes*, 9(7), 1202. (rayyan-726049115). <https://doi.org/10.3390/pr9071202>
- Ash, J. (2024). Social impacts of critical mineral exploration on indigenous peoples' lands[]: A case study from Solomon Islands. *Extractive Industries and Society*, 17, 1-8. (rayyan-1279579530). <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101439>
- Azapagic, A. (2004). Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *Journal of Cleaner Production, SME's and Experiences with Environmental Management Systems*, 12(6), 639-662. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(03\)00075-1](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(03)00075-1)
- Azizi, D., & Larachi, F. (2018). Immiscible dual ionic liquid-ionic liquid mineral separation of rare-earth minerals. *Separation and Purification Technology*, 191, 340-353. (rayyan-2245250). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.061>
- Azizi, D., Larachi, F., & Latifi, M. (2016). Ionic-liquid collectors for rare-earth minerals flotation-case of tetrabutylammonium bis(2-ethylhexyl)-phosphate for monazite and bastnasite recovery. *Colloids*

- and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 506, 74-86. (rayyan-2245456).
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.06.011>
- Azizi, D., Sarvaramini, A., & Larachi, F. (2017). Liquid-liquid mineral separation via ionic-liquid complexation of monazite and bastnasite-an alternate route for rare-earth mineral beneficiation. *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 520, 301-323. (rayyan-2245362). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.01.079>
- B. Nagender Nath, Balaram, V., Sudhakar, M., & Plüger, W. L. (1992). Rare earth element geochemistry of ferromanganese deposits from the Indian Ocean. *Marine Chemistry*, 38(3), 185-208. (rayyan-2245950). [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(92\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0304-4203(92)90034-8)
- 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. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104675. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104675>
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements[]: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 1-19. (rayyan-726051423). <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
- Balaram, V. (2021). Current and emerging analytical techniques for geochemical and geochronological studies. *Geological Journal*, 56(5), 2300-2359. <https://doi.org/10.1002/gj.4005>
- Balaram, V. (2022). Rare earth element deposits[]: Sources, and exploration strategies. *Journal of the Geological Society of India*, 98(9), 1210-1216. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-2154-3>
- Balaram, V. (2023). Advances in analytical techniques and applications in exploration, mining, extraction, and metallurgical studies of rare earth elements. *Minerals*, 13(8), 1-47. (rayyan-2244165). <https://doi.org/10.3390/min13081031>
- Balaram, V., & Sawant, S. S. (2022). Indicator minerals, pathfinder elements, and portable analytical instruments in mineral exploration studies. *Minerals*, 12(4), 1-35. (rayyan-2244356). <https://doi.org/10.3390/min12040394>
- 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 silus mine (SE sardinia, italy)]: A preliminary study. *Sustainability*, 1-18. (rayyan-10656620). <https://doi.org/10.3390/su132414000>
- Balinski, A., Atanasova, P., Wiche, O., Kelly, N., Markus Andreas Reuter, & Scharf, C. (2019a). Recovery of REEs, Zr(plus Hf), Mn and Nb by H₂ SO₄ leaching of eudialyte concentrate. *Hydrometallurgy*, 186, 176-186. (rayyan-2245175). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.04.007>
- Balinski, A., Atanasova, P., Wiche, O., Kelly, N., Markus Andreas Reuter, & Scharf, C. (2019b). Selective leaching of rare earth elements (REEs) from eudialyte concentrate after sulfation and thermal decomposition of non-REE sulfates. *Minerals*, 9(9), 1-12. (rayyan-2245184). <https://doi.org/10.3390/min9090522>
- Balinski, A., Wiche, O., Kelly, N., Markus Andreas Reuter, & Scharf, C. (2020). Separation of rare earth elements from contaminants and valuable components by in-situ precipitation during the hydrometallurgical processing of eudialyte concentrate. *Hydrometallurgy*, 194, 1-9. (rayyan-2245013). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105345>
- Banakar, V. K., Pattan, J. N., & Mudholkar, A. V. (1997). Palaeoceanographic conditions during the formation of a ferromanganese crust from the afanasiy-nikitin seamount, north central indian ocean]: Geochemical evidence. *Marine Geology*, 136(3), 299-315. (rayyan-2245959). [https://doi.org/10.1016/s0025-3227\(96\)00065-5](https://doi.org/10.1016/s0025-3227(96)00065-5)
- Banda, R., Jeon, H., & Lee, M. (2012). Solvent extraction separation of Pr and Nd from chloride solution containing La using cyanex 272 and its mixture with other extractants. *Separation and Purification Technology*, 98, 481-487. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.08.015>
- Banerjee, R., Mohanty, A., Chakravarty, S., Chakladar, S., & Biswas, P. (2021). A single-step process to leach out rare earth elements from coal ash using organic carboxylic acids. *Hydrometallurgy*, 1-15. (rayyan-726050412). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105575>
- Banks, G. J., Walter, B. E., Marks, M. A. W., & Siegfried, P. R. (2019). A workflow to define, map and name a carbonatite- or alkaline igneous-associated REE-HFSE mineral system]: A case study from SW germany. *Minerals*, 9(2). (rayyan-2244525). <https://doi.org/10.3390/min9020097>

- Bao, Z., & Zhao, Z. (2008). Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in south China. *Ore Geology Reviews*, 33(3-4), 519-535. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2007.03.005>
- Barbosa, S., Dias, A., Durao, D., Grilo, J., Baptista, G., Cagiza, J., Pessanha, S., Simao, J., & Almeida, J. (2022). Exploring high-resolution chemical distribution maps of incompatible and scarce metals in a nepheline syenite from the massif of « serra de monchique » (portugal, iberian peninsula). *Minerals*, 12(9), 1-20. (rayyan-2244114). <https://doi.org/10.3390/min12091178>
- Barrett, T. J., Jarvis, I., Hannington, M. D., & Thirlwall, M. F. (2021). Chemical characteristics of modern deep-sea metalliferous sediments in closed versus open basins, with emphasis on rare-earth elements and Nd isotopes. *Earth-Science Reviews*, 222. (rayyan-24596834). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103801>
- Basu, A. J., & Kumar, U. (2004). Innovation and technology driven sustainability performance management framework (ITSPM) for the mining and minerals sector. *International Journal of Surface Mining, Reclamation, and Environment*, 18(2), 135-149. <https://doi.org/10.1080/13895260412331295394>
- Batchu, N. K., & Binnemans, K. (2018). Effect of the diluent on the solvent extraction of neodymium(III) by bis(2-ethylhexyl)phosphoric acid (D2EHPA). *Hydrometallurgy*, 177, 146-151. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.03.012>
- Batchu, N. K., Jeon, H. S., & Lee, M. S. (2015). Solvent extraction of praseodymium(III) from chloride solutions by a mixture of cyanex 301 and LIX 63. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 26, 286-290. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.11.042>
- Batchu, N. K., Li, Z., Verbelen, B., & Binnemans, K. (2021). Structural effects of neutral organophosphorus extractants on solvent extraction of rare-earth elements from aqueous and non-aqueous nitrate solutions. *Separation and Purification Technology*, 255, 117711. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117711>
- Baturin, G. N., & Yushina, I. G. (2007). Rare earth elements in phosphate-ferromanganese crusts on pacific seamounts. *Lithology and Mineral Resources*, 42(2), 101-117. (rayyan-2245945). <https://doi.org/10.1134/s0024490207020010>

- Bautista, R. G. (1995). Chapter 139 separation chemistry. In *Handbook on the physics and chemistry of rare earths* (Vol. 21, p. 1-27). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0168-1273\(05\)80108-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1273(05)80108-4)
- Bea, F., Pereira, M., Corretge, L., & Fershtater, G. (1994). Differentiation of strongly peraluminous, perphosphorus granites—The pedrobernardo pluton, central Spain. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(12), 2609-2627. (rayyan-24596881). [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90132-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90132-5)
- Behzad Vaziri Hassas, Rezaee, M., & Pisupati, S. V. (2020). Precipitation of rare earth elements from acid mine drainage by CO₂ mineralization process. *Chemical Engineering Journal*, 399, 1-11. (rayyan-2244988). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125716>
- Behzad Vaziri Hassas, Shekarian, Y., & Rezaee, M. (2023). Selective precipitation of rare earth and critical elements from acid mine drainage-part I: kinetics and thermodynamics of staged precipitation process. *Resources, Conservation and Recycling*, 188. (rayyan-2244029). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106654>
- Belova, V. V. (2017). Development of solvent extraction methods for recovering rare earth metals. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 51(4), 599-609. (rayyan-2245330). <https://doi.org/10.1134/S004057951605002X>
- Belviso, C. (2018). State-of-the-art applications of fly ash from coal and biomass: A focus on zeolite synthesis processes and issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 65, 109-135. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.10.004>
- Bezzola, S., Günther, I., Brugger, F., & Lefoll, E. (2022). CSR and local conflicts in African mining communities. *World Development*, 158, 105968. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2022.105968>
- Bhattacharya, S., Agrawal, V., & Sharma, S. (2022). Association of rare earths in different phases of marcellus and haynesville shale: Implications on release and recovery strategies. *Minerals*, 12(9), 1-20. (rayyan-2244089). <https://doi.org/10.3390/min12091120>
- Bilal, E., Bellefqih, H., Bourgier, V., Mazouz, H., Dumitraş, D.-G., Bard, F., Laborde, M., Caspar, J. P., Guilhot, B., Iatan, E.-L., Bounakhla, M., Iancu, M. A., Marincea, Ş., Essakhraoui, M., Li, B., Diwa, R. R., Ramirez, J. D., Chernysh, Y., Chubur, V., ... Haneklaus, N. (2023). Phosphogypsum circular

- economy considerations[]: A critical review from more than 65 storage sites worldwide. *Journal of Cleaner Production*, 414, 137561. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137561>
- Binnemans, K., & Jones, P. T. (2023). The twelve principles of circular hydrometallurgy. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 9(1), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s40831-022-00636-3>
- Binnemans, K., Peter Tom Jones, Blanpain, B., Tom Van Gerven, & Pontikes, Y. (2015). Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues[]: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 1-89. (rayyan-726050364). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.089>
- Bishop, B. A., & Robbins, L. J. (2024). Using machine learning to identify indicators of rare earth element enrichment in sedimentary strata with applications for metal prospectivity. *Journal of Geochemical Exploration*, 258, 1-15. (rayyan-2243895). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107388>
- Boesche, N. K., Rogass, C., Mielke, C., Herrmann, S., Korting, F., Papenfuss, A., Lubitz, C., Brell, M., Tonn, S., & Altenberger, U. (2015). Hyperspectral Rare Earth Element Mapping of Three Outcrops at the Fen Complex, Norway[]: Calcitic, Dolomitic, and Ankeritic Carbonatites. In *Rare Earths Industry[]: Technological, Economic, and Environmental Implications* (p. 235-265). (rayyan-2244745). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802328-0.00016-4>
- Boetzkes, A., & Diamanti, J. (2023). Geofetishism and the tender violence of rare earths. *Sub-Stance*, 52(3), 1-23. (rayyan-1279579610). <https://doi.org/10.1353/sub.2023.a913888>
- Bogojević, S. (2024). The European Green Deal, the rush for critical raw materials, and colonialism. *Transnational Legal Theory*, 15(4), 600-615. <https://doi.org/10.1080/20414005.2024.2399408>
- Boiral, O. (2016). Accounting for the unaccountable[]: Biodiversity reporting and impression management. *Journal of Business Ethics*, 135(4), 751-768. <https://doi.org/10.1007/s10551-014-2497-9>
- Borra, C. R., Mermans, J., Blanpain, B., Pontikes, Y., Binnemans, K., & Tom Van Gerven. (2016). Selective recovery of rare earths from bauxite residue by combination of sulfation, roasting and leaching. *Minerals Engineering*, 92, 151-159. (rayyan-2245480). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.03.002>

- Borra, C. R., Pontikes, Y., Binnemans, K., & Van Gerven, T. (2015). Leaching of rare earths from bauxite residue (red mud). *Sustainable Minerals*, 76, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.01.005>
- Borra, Chenna Rao, Blanpain, B., Pontikes, Y., Binnemans, K., & Tom Van Gerven. (2016a). Comparative analysis of processes for recovery of rare earths from bauxite residue. *JOM*, 68(11), 2958-2962. (rayyan-2245428). <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2111-y>
- Borra, Chenna Rao, Blanpain, B., Pontikes, Y., Binnemans, K., & Tom Van Gerven. (2016b). Recovery of rare earths and other valuable metals from bauxite residue (red mud): A review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), 365-386. (rayyan-2245476). <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0068-2>
- Bouargane, B., Laaboubi, K., Mohamed Ghali Biyoune, Bakiz, B., & Atbir, A. (2023). Effective and innovative procedures to use phosphogypsum waste in different application domains: Review of the environmental, economic challenges and life cycle assessment. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 1-21. (rayyan-726050802). <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01617-8>
- Boulanger, J.-F., Bazin, C., & Turgeon, K. (2019). Effect of depressants and temperature on bastnaesite and monazite flotation separation from a canadian rare earth element (REE) ore. *Minerals*, 9(4), 225-240. <https://doi.org/10.3390/min9040225>
- Brisson, V. L., Wei-Qin Zhuang, & Lisa Alvarez-Cohen. (2016). Bioleaching of rare earth elements from monazite sand. *Biotechnology and Bioengineering*, 113(2), 339-348. (rayyan-2245865). <https://doi.org/10.1002/bit.25823>
- Brown, C. G., & Sherrington, L. G. (1979). Solvent extraction used in industrial separation of rare earths. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 29(4), 193-209. <https://doi.org/10.1002/jctb.503290402>
- Browning, C., Northey, S., Haque, N., Bruckard, W., & Cooksey, M. (2016). Life cycle assessment of rare earth production from monazite. *REWAS 2016: Towards Materials Resource Sustainability*, 1-8. (rayyan-10656743). https://doi.org/10.1007/978-3-319-48768-7_12

- Buccione, R., Mongelli, G., Sinisi, R., & Boni, M. (2016). Relationship between geometric parameters and compositional data[]: A new approach to karst bauxites exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 169, 192-201. (rayyan-2244679). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.08.002>
- Burlakovs, J., Jani, Y., Kriipsalu, M., Vincevica-Gaile, Z., Kaczala, F., Celma, G., Ozola, R., Rozina, L., Rudovica, V., Hogland, M., Viksna, A., Pehme, K.-M., Hogland, W., & Klavins, M. (2018). On the way to « zero waste » management[]: Recovery potential of elements, including rare earth elements, from fine fraction of waste. *Journal of Cleaner Production*, 186, 81-90. (rayyan-2245266). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.102>
- Burton, J., Kemp, D., Barnes, R., & Parmenter, J. (2024). A socio-spatial analysis of Australia's critical minerals endowment and policy implications. *Resources Policy*, 88, 1-13. (rayyan-1279579467). <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. *Resources-Basel*, 8(1). (rayyan-1279580128). <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. *Circular Economy and Sustainability*, 3(2), 1141-1154. (rayyan-1279579585). <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00198-2>
- Buu-Sao, D. (2021). Faire advenir la «[]mine durable[]» en Europe[]? Discours institutionnels et impératif de relance minière, de l'Union européenne à l'Andalousie. *Revue Gouvernance / Governance Review*, 18(2), 16-41. <https://doi.org/10.7202/1082500ar>
- Can, N. M., & Bayraktar, I. (2007). Effect of microwave treatment on the flotation and magnetic separation properties of pyrite, chalcopyrite, galena and sphalerite. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 24(3), 185-192. <https://doi.org/10.1007/BF03403214>
- Canelas, J., & Carvalho, A. (2023). The dark side of the energy transition[]: Extractivist violence, energy (in) justice and lithium mining in Portugal. *Energy Research & Social Science*, 100, 1-13. (rayyan-1279579681). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103096>

- Cánovas, C. R., Chapron, S., Arrachart, G., & Pellet-Rostaing, S. (2019). Leaching of rare earth elements (REEs) and impurities from phosphogypsum[]: A preliminary insight for further recovery of critical raw materials. *Journal of Cleaner Production*, 1-11. (rayyan-10656700). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.104>
- Cao, W., Huang, F., Wang, T., Ye, R., Lei, R., Tian, Y., Zhang, J., & Xu, S. (2018). 2.0 μm emission of Ho^{3+} doped germanosilicate glass sensitized by non-rare-earth ion Bi^{3+} : A new choice for 2.0 μm laser. *Optical Materials*, 75, 695-698. (rayyan-13568541). <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.11.033>
- Cao, Z., Cao, Y., Qu, Q., Zhang, J., & Mu, Y. (2019). Separation of bastnasite from fluorite using ethylenediamine tetraacetic acid as depressant. *Minerals Engineering*, 134, 134-141. (rayyan-2245189). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.01.030>
- Cao, Z., Cheng, Z., Wang, J., & Cao, Y. (2022). Synergistic depression mechanism of Ca^{2+} ions and sodium silicate on bastnaesite flotation. *Journal of Rare Earths*, 40(6), 988-995. (rayyan-2244296). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2021.04.006>
- Cao, Z., Wu, X., Sultan Ahmed Khoso, Zhang, W., Liu, Y., Tian, M., & Wang, J. (2022). Effect mechanism of nonane-1,1-bisphosphonic acid as an alternative collector in monazite flotation[]: Experimental and calculational studies. *Journal of Rare Earths*, 40(5), 822-830. (rayyan-2244109). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2021.05.004>
- Carcangiu, G., Palomba, M., Peretti, R., & Zucca, A. (1991). The heavy minerals of some coastal sand deposits in southwest sardinia. Application of electron microanalysis and beneficiation tests. *Ore Geology Reviews*, 6(4), 365-380. (rayyan-2245835). [https://doi.org/10.1016/0169-1368\(91\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0169-1368(91)90010-5)
- Carlos Ruiz Canovas, Macias, F., Olias, M., Maria Dolores Basallote, Perez-Lopez, R., Ayora, C., & Jose Miguel Nieto. (2020). Release of technology critical metals during sulfide oxidation processes[]: The case of the poderosa sulfide mine (south-west Spain). *Environmental Chemistry*, 17(2), 93-104. (rayyan-2245003). <https://doi.org/10.1071/en19118>
- Caroline Silva De Matos, Benites, M., Jovane, L., & Ulsen, C. (2023). Chemical-mineralogical characterization of critical elements into ferromanganese crusts. *Journal of Materials Research*

- and *Technology-Jmr&t*, 25, 5633-5649. (rayyan-2243923).
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.021>
- Castro, L., Gómez-Álvarez, H., Carmona, M., González, F., & Muñoz, J. A. (2023). Influence of biosurfactants in the recovery of REE from monazite using *Burkholderia thailandensis*. *Hydrometallurgy*, 222, 106178. <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. *Minerals Engineering*, 171, 1-12. (rayyan-17587657). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107081>
- Cen, P., Bian, X., & Wu, W. (2020). Isoconversional kinetic analysis of decomposition of bastnaesite concentrates with calcium hydroxide. *Journal of Rare Earths*, 38(12), 1361-1371. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2020.01.006>
- Cen, P., Bian, X., Wu, W., & Li, B. (2021). A sustainable green technology for separation and simultaneous recovery of rare earth elements and fluorine in bastnaesite concentrates. *Separation and Purification Technology*, 274, 1-15. (rayyan-2244321). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118380>
- Chailleux, S., Le Berre, S., & Gunzburger, Y. (2022). *Ressources minérales et transitions*. <https://www.peterlang.com/document/1280839>
- Chan, T. N. (1992). A new beneficiation process for the treatment of supergene monazite ore. In rare earths[]: Extraction, preparation and applications. San Diego, CA: TMS and AusIMM.
- Chanturiya, V. A. (2022). Scientific substantiation and development of innovative processes for the extraction of zirconium and rare earth elements in the deep and comprehensive treatment of eudialyte concentrate. *Journal Of Mining Institute*, 256, 505-516. (rayyan-2244229). <https://doi.org/10.31897/pmi.2022.31>
- Chapleski, Jr. R. C., Chowdhury, A. U., Wanhala, A. K., Bocharova, V., Roy, S., Keller, P. C., Everly, D., Jansone-Popova, S., Kisliuk, A., Sacci, R. L., Stack, A. G., Anderson, C. G., Doughty, B., & Bryantsev, V. S. (2020). A molecular-scale approach to rare-earth beneficiation[]: Thinking small to avoid large losses. *Iscience*, 23(9). (rayyan-2244700). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101435>

- Charles, N., Tuduri, J., Lefebvre, G., Pourret, O., Gaillard, F., & Goodenough, K. (2022). Balaram. In S. Decrée, *Ressources métalliques 1* (p. 1-137). ISTE Group. <https://doi.org/10.51926/ISTE.9135.ch1>
- Charles, N., Tuduri, J., Lefebvre, G., Pourret, O., Gaillard, F., & Goodenough, K. (2023). The Rare Earth Resources of Europe and Greenland. In *Metallic Resources 1* (p. 1-142). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781394264810.ch1>
- Chatterjee, S., Karacan, C. Ö., & Mastalerz, M. (2024). Exploring the uncertainty of machine learning models and geostatistical mapping of rare earth element potential in indian coals, USA. *International Journal of Coal Geology*, 282, 104419. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2023.104419>
- Chaves, W. A., Valle, D., Tavares, A. S., von Mühlen, E. M., & Wilcove, D. S. (2021). Investigating illegal activities that affect biodiversity: The case of wildlife consumption in the Brazilian Amazon. *Ecological Applications*, 31(7), e02402. <https://doi.org/10.1002/eap.2402>
- Chelgani, S. C., Rudolph, M., Leistner, T., Gutzmer, J., & Peuker, U. A. (2015). A review of rare earth minerals flotation: Monazite and xenotime. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(6), 877-883. (rayyan-2245499). <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2015.09.002>
- Chen, M., & Graedel, T. E. (2015). The potential for mining trace elements from phosphate rock. *Journal of Cleaner Production*, 1-10. (rayyan-10656705). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.042>
- Chen, Q., Yang, H., Tong, L., Niu, H., Zhang, F., & Chen, G. (2020). Research and application of a knelson concentrator: A review. *Minerals Engineering*, 152, 106339. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106339>
- Chen, W., Honghui, H., Bai, T., & Jiang, S. (2017). Geochemistry of monazite within carbonatite related REE deposits. *Resources-Basel*, 6(4), 1-15. (rayyan-2245862). <https://doi.org/10.3390/resources6040051>
- Chen, W., Jiang, J., Lan, X., Zhao, X., Mou, H., & Mu, T. (2019). A strategy for the dissolution and separation of rare earth oxides by novel brønsted acidic deep eutectic solvents. *Green Chemistry*, 21(17), 4748-4756. <https://doi.org/10.1039/C9GC00944B>
- Chen, Z. (2011). Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. *Journal of Rare Earths*, 29(1), 1-6. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60401-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60401-2)

- 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. *Journal of Environmental Management*, 371, 123217. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123217>
- Cheng, G., Ban, Y., Deng, X., Li, H., Zhang, H., Li, G., Liao, L., & Khan, R. (2023). Research on quantitative inversion of ion adsorption type rare earth ore based on convolutional neural network. *Frontiers in Earth Science*, 10. (rayyan-2244262). <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1086325>
- Cheng, S., Li, W., Han, Y., Sun, Y., Gao, P., & Zhang, X. (2024). Recent process developments in beneficiation and metallurgy of rare earths[]: A review. *Journal of Rare Earths*, 42(4), 629-642. (rayyan-2243875). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2023.03.017>
- Cheng, T. W. (2000). The point of zero charge of monazite and xenotime. *Minerals Engineering*, 13(1), 105-109. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(99\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(99)00153-3)
- Cheng, T.-W., Holtham, P. N., & Tran, T. (1993). Froth flotation of monazite and xenotime. *Minerals Engineering*, 6(4), 341-351. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(93\)90014-E](https://doi.org/10.1016/0892-6875(93)90014-E)
- Cheng, T.-W., Partridge, A. C., Tran, T., & Wong, P. L. M. (1994). The surface properties and flotation behaviour of xenotime. *Minerals Engineering*, 7(9), 1085-1098. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(94\)90001-9](https://doi.org/10.1016/0892-6875(94)90001-9)
- Chernoburova, O., & Chagnes, A. (2021). The future of scandium recovery from wastes. *International Conference on Raw Materials and Circular Economy*, 55. <https://doi.org/10.3390/materproc2021005055>
- Chi, R., Zhang, X., Zhu, G., Zhou, Z. A., Wu, Y., Wang, C., & Yu, F. (2004). Recovery of rare earth from bastnasite by ammonium chloride roasting with fluorine deactivation. *Minerals Engineering*, 17(9-10), 1037-1043. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.04.010>
- Chistov, L. B., Barsukova, N. S., Georgiadi, E. K., Monastyrskii, I. B., Ratnikov, E. V., & Yufryakov, V. A. (1995). Effect of microwave treatment on physical and technological parameters of niobium/rare earth ores. *Journal of Mining Science*, 31(1), 69-74. <https://doi.org/10.1007/BF02046893>
- Chong, S., Riley, B. J., Lu, X., Du, J., Mahadevan, T., & Hegde, V. (2024). Synthesis and properties of anhydrous rare-earth phosphates, monazite and xenotime[]: A review. *RSC Advances*, 14(27), 18978-19000. <https://doi.org/10.1039/D4RA01142B>

- 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. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 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*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(4), 103961. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103961>
- Commission des communautés européennes, *LIVRE VERT Promouvoir un cadre européen pour la responsabilité sociale des entreprises*. 2001. (s. d.).
- Correa, P. V. F., Jovane, L., Murton, B. J., & Paulo Yukio Gomes Sumida. (2022). Benthic megafauna habitats, community structure and environmental drivers at rio grande rise (SW atlantic). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 186. (rayyan-2244094). <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2022.103811>
- Corrigan, C. C., & Ikonnikova, S. A. (2024). A review of the use of AI in the mining industry[]: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization. *Extractive Industries and Society*, 17, 101440. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101440>
- 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. *Journal of Geochemical Exploration*, 221, 1-14. (rayyan-1279579958). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106699>
- Couturier, J., Levard, C., Collin, B., Chaurand, P., Vidal, V., Mathon, O., Duvivier, A., Angeletti, B., Borschneck, D., Rose, J., Pellet-Rostaing, S., & Arrachart, G. (2025). Dissolution of rare earth elements[]: Exploring the ability of deep eutectic solvents and organic acid solutions, the case of lactic acid. *Separation and Purification Technology*, 366, 132740. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132740>
- 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. *Journal of Hazardous Materials*, 464, 1-38. (rayyan-2243897). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132941>
- Dai, J., Wang, D., Wang, R., & Chen, Z. (2013). Quantitative estimation of concentrations of dissolved rare earth elements using reflectance spectroscopy. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7, 1-15. (rayyan-2244793). <https://doi.org/10.1117/1.jrs.7.073513>
- Dallas, J. A., Raval, S., Saydam, S., & Dempster, A. G. (2021). Investigating extraterrestrial bodies as a source of critical minerals for renewable energy technology. *Acta Astronautica*, 186, 74-86. (rayyan-1279579930). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.05.021>
- d'Ambrosio, L. (2021). Le devoir de vigilance[]: Une innovation juridique entre continuités et ruptures: *Droit Et Société*, N° 106(3), 633-647. <https://doi.org/10.3917/drs1.106.0633>
- Danijela Ignjatovic Stupar, Ogrizovic, V., Roser, J., & Vizintin, G. (2022). Analytical and numerical solution for better positioning in mines with potential extending application in space mining. *Minerals*, 12(5), 1-17. (rayyan-2244083). <https://doi.org/10.3390/min12050640>
- Das, G., Lencka, M. M., Eslamimanesh, A., Wang, P., Anderko, A., Riman, R. E., & Navrotsky, A. (2019). Rare earth sulfates in aqueous systems[]: Thermodynamic modeling of binary and multicomponent systems over wide concentration and temperature ranges. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 131, 49-79. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2018.10.020>
- da Silva Hyldmo, H., Rye, S., & Vela Almeida, D. (2024). A globally just and inclusive transition? Questioning policy representations of the European green deal. *Global Environmental Change*, 89, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2024.102946>
- Davris, P., Balomenos, E., Panias, D., & Paspaliaris, I. (2016). Selective leaching of rare earth elements from bauxite residue (red mud), using a functionalized hydrophobic ionic liquid. *Hydrometallurgy*, 164, 125-135. (rayyan-2245478). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.06.012>
- 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. *Mineralogical Magazine*, 80(1), 43-43-61. Academic Search Ultimate (114324048). <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. *Geological Society, London, Special Publications*, 526(1), 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 Geology Reviews*, 104, 384-402. (rayyan-17587668). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.11.012>
- Dekov, V. M., Kamenov, G. D., Jens Stummeyer, Médard Thiry, Carlo Savelli, Shanks, W. C., Danielle Fortin, Ernő Kuzmann, & Attila Vértes. (2007). Hydrothermal nontronite formation at eolo seamount (aeolian volcanic arc, tyrrhenian sea). *Chemical Geology*, 245(1), 103-119. (rayyan-2245954). <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.08.006>
- Dekov, V. M., Sven Petersen, Garbe-Schönberg, C.-D., Kamenov, G. D., Mirjam Perner, Ernő Kuzmann, & Mark Schmidt. (2010). Fe—Si-oxyhydroxide deposits at a slow-spreading centre with thickened oceanic crust[]: The lilliput hydrothermal field (9°33'S, mid-atlantic ridge). *Chemical Geology*, 278(3), 186-200. (rayyan-2245953). <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.09.012>
- Demol, J., Ho, E., Soldenhoff, K., Karatchevtseva, I., & Senanayake, G. (2022). Beneficial effect of iron oxide/hydroxide minerals on sulfuric acid baking and leaching of monazite. *Hydrometallurgy*, 211, 1-16. (rayyan-2244093). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105864>
- 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, H., & Kendall, A. (2019). Life cycle assessment with primary data on heavy rare earth oxides from ion-adsorption clays. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-10. (rayyan-10656738). <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01582-1>
- Denys, A., Janots, E., Auzende, A.-L., Lanson, M., Findling, N., & Trcera, N. (2021). Evaluation of selectivity of sequential extraction procedure applied to REE speciation in laterite. *Chemical Geology*, 559, 119954. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119954>

- Diallo, M. S., Madhusudhana Rao Kotte, & Chot, M. (2015). Mining critical metals and elements from seawater[]: Opportunities and challenges. *Environmental Science & Technology*, 1-10. (rayyan-10656769). <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00463>
- Diehl, L. O., Gatiboni, T. L., Mello, P. A., Muller, E. I., Duarte, F. A., & Flores, E. M. M. (2018). Ultrasound-assisted extraction of rare-earth elements from carbonatite rocks. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 24-29. (rayyan-2245304). <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.04.012>
- Dill, H. G., Buzatu, A., Balaban, S.-I., & Ruesenberg, K. A. (2023). A mineralogical-geomorphological terrain analysis of hotspot volcanic islands—The missing link between carbonatite- and pegmatite Nb-F-Zr-Li-be-bearing REE deposits and new tools for their exploration (canary islands archipelago, spain). *Ore Geology Reviews*, 163, 1-60. (rayyan-2244161). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105702>
- Dill, H. G., & Dill, H. (2015). Pegmatitic rocks and their geodynamic setting in the central european variscides. *Hagendorf-Pleystein Province: The Center of Pegmatites in an Ensialic Orogen*, 15, 55-110. (rayyan-2244754). https://doi.org/10.1007/978-3-319-18806-5_2
- Dingwall, J. (2018). International investment protection in deep seabed mining beyond national jurisdiction. *Journal of World Investment & Trade*, 19(5), 890-929. (rayyan-1284422367). <https://doi.org/10.1163/22119000-12340114>
- Dingwall, J. (2020). Commercial Mining Activities in the Deep Seabed beyond National Jurisdiction[]: The International Legal Framework. In *Publications on Ocean Development* (Vol. 90, p. 139-162). (rayyan-1284578442). https://doi.org/10.1163/9789004391567_009
- Dingwall, J. (2021). *International Law and Corporate Actors in Deep Seabed Mining*. (rayyan-1279579929). <https://doi.org/10.1093/oso/9780192898265.001.0001>
- Dinh, T., Dobo, Z., & Kovacs, H. (2022). Phytomining of rare earth elements—A review. *Chemosphere*, 297, 1-13. (rayyan-2244203). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134259>
- Dong, Y., Li, S., Su, X., Wang, Y., Shen, Y., & Sun, X. (2017). Separation of thorium from rare earths with high-performance diphenyl phosphate extractant. *Hydrometallurgy*, 171, 387-393. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.06.013>

- Dou, S., Xu, D., Zhu, Y., & Keenan, R. (2023). Critical mineral sustainable supply[]: Challenges and governance. *Futures*, 146. (rayyan-1279579573). <https://doi.org/10.1016/j.futures.2023.103101>
- Duan, H., Liu, W., Wang, X., Gu, X., Sun, W., Peng, X., & Yue, H. (2021). Investigation on flotation separation of bastnaesite from calcite and barite with a novel surfactant[]: Octylamino-bis-(butanohydroxamic acid). *Separation and Purification Technology*, 256, 117792. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117792>
- Duan, H., Liu, W., Wang, X., Zhao, L., Fang, P., & Gu, X. (2020). Preparation of a novel bis hydroxamic collector and its impact on bastnaesite flotation. *Minerals Engineering*, 156, 1-8. (rayyan-2244990). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106496>
- Dunlap, A., & Riquito, M. (2023). Social warfare for lithium extraction[]? Open-pit lithium mining, counterinsurgency tactics and enforcing green extractivism in northern Portugal. *Energy Research & Social Science*, 95, 1-21. (rayyan-1279579672). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102912>
- Dutrizac, J. E. (2017). The behaviour of the rare earth elements during gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) precipitation. *Hydrometallurgy*, 174, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.09.013>
- Eckhardt, J., Glasby, G., Puchelt, H., & Berner, Z. (1997). Hydrothermal manganese crusts from enarete and palinuro seamounts in the tyrrhenian sea. *Marine Georesources and Geotechnology*, 15(2), 175-208. (rayyan-24596877). <https://doi.org/10.1080/10641199709379943>
- Economou-Eliopoulos, M., Eliopoulos, D. G., Mao, J., & Bierlein, F. (2005). Mineralogical and geochemical characteristics of the skouries porphyry-Cu-Au-pd-Pt deposit (greece)[]: Evidence for the precious metal. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge, Vols 1 and 2*, 935-938. (rayyan-2245049). https://doi.org/10.1007/3-540-27946-6_238
- Elerian, M., Cees Van Rhee, & Helmons, R. (2022). Experimental and numerical modelling of deep-sea-mining-generated turbidity currents. *Minerals*, 12(5), 1-21. (rayyan-2244112). <https://doi.org/10.3390/min12050558>
- El-Hefny, N. E., Gasser, M. S., Emam, Sh. Sh., Mahmoud, W. H., & Aly, H. F. (2018). Comparative studies on Y(III) and Dy(III) extraction from hydrochloric and nitric acids by cyanex 572 as a novel extractant. *Journal of Rare Earths*, 36(12), 1342-1350. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2018.04.012>

- Entezari-Zarandi, A., & Larachi, F. (2019). Selective dissolution of rare-earth element carbonates in deep eutectic solvents. *Journal of Rare Earths*, 37(5), 528-533. (rayyan-2245182). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2018.07.015>
- Eric Heinen De Carlo, & McMurtry, G. M. (1992). Rare-earth element geochemistry of ferromanganese crusts from the hawaiian archipelago, central pacific. *Chemical Geology*, 95(3), 235-250. (rayyan-2245951). [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(92\)90014-v](https://doi.org/10.1016/0009-2541(92)90014-v)
- Espiritu, E. R. L., G. R. Da Silva, Azizi, D., Larachi, E., & Waters, K. E. (2019). Flotation behavior and electronic simulations of rare earth minerals in the presence of dolomite supernatant using sodium oleate collector. *Journal of Rare Earths*, 37(1), 101-112. (rayyan-2245134). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2018.04.016>
- Espiritu, E. R. L., Naseri, S., & Waters, K. E. (2018). Surface chemistry and flotation behavior of dolomite, monazite and bastnasite in the presence of benzohydroxamate, sodium oleate and phosphoric acid ester collectors. *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 546, 254-265. (rayyan-2245292). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.03.030>
- Falconer, A. (2003). Gravity separation[]: Old technique/new methods. *Physical Separation in Science and Engineering*, 12(1), 31-48. <https://doi.org/10.1080/1478647031000104293>
- Fan, H., Tan, W., & Liu, G. (2021). 1-hydroxydodecylidene-1,1-diphosphonic acid flotation of bastnasite[]: Performance and mechanism. *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 609, 1-7. (rayyan-2244314). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125623>
- Fan, H., Yang, X., Qi, J., Liu, G., & Qin, J. (2021). A comparative investigation into floatability of bastnaesite with three di/trialkyl phosphate surfactants. *Journal of Rare Earths*, 39(11), 1442-1449. (rayyan-2244316). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2020.09.024>
- Fan, X., Xia, 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. *Journal of Hazardous Materials*, 437, 1-12. (rayyan-2244127). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129308>

- Fathollahzadeh, H., Eksteen, J. J., Kaksonen, A. H., & Watkin, E. L. J. (2019). Role of microorganisms in bioleaching of rare earth elements from primary and secondary resources. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103(3), 1043-1057. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9526-z>
- 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. *Bioresource Technology Reports*, 3, 109-118. (rayyan-2245225). <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.07.003>
- Ferron, C. J., Bulatovic, S. M., & Salter, R. S. (1991a). Beneficiation of Rare Earth Oxide Minerals. *Materials Science Forum*, 70-72, 251-270. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.70-72.251>
- Ferron, C. J., Bulatovic, S. M., & Salter, R. S. (1991b). Beneficiation of rare earth oxide minerals. *Materials Science Forum*, 71-72, 251-270. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.70-72.251>
- Filippov, L. O., Dehaine, Q., & Filippova, I. V. (2016). Rare earths (La, Ce, Nd) and rare metals (Sn, Nb, W) as by-products of kaolin production—Part 3: Processing of fines using gravity and flotation. *Minerals Engineering*, 95, 96-106. (rayyan-2245475). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.004>
- Fitzgibbon, K. E., & Veasey, T. J. (1990). Thermally assisted liberation—A review. *Minerals Engineering*, 3(1), 181-185. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(90\)90090-X](https://doi.org/10.1016/0892-6875(90)90090-X)
- Flexer, V., Baspineiro, C. F., & Galli, C. I. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment*, 639, 1188-1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
- Fonseca, A., McAllister, M. L., & Fitzpatrick, P. (2013). Measuring what? A comparative anatomy of five mining sustainability frameworks. *Minerals Engineering*, 46, 180-186. (rayyan-1279580530). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.008>
- Fonseka, C., Ryu, S., Choo, Y., Naidu, G., Kandasamy, J., Thiruvenkatachari, R., Foseid, L., Ratnaweera, H., & Vigneswaran, S. (2023). Selective recovery of europium from real acid mine drainage by using novel amine based modified SBA15 adsorbent and membrane distillation system. *Journal of Water Process Engineering*, 1-14. (rayyan-10656686). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104551>

- Frederiksen, T. (2018). Corporate social responsibility, risk and development in the mining industry. *Resources Policy*, 59, 495-505. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.09.004>
- Fritz, A. G., Tarka, T. J., & Mauter, M. S. (2021). Technoeconomic assessment of a sequential step-leaching process for rare earth element extraction from acid mine drainage precipitates. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(28), 9308-9316. (rayyan-1284422364). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02069>
- 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. *Progress in Energy and Combustion Science*, 88, 1-47. (rayyan-756951935). <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100954>
- Fuerstenau, D. W. (1983). Part i: Adsorption on barite, calcite and bastnaesite. 1-17.
- Fuerstenau, D. W. (1985). Adsorption of hydroxamate collectors on semi-soluble minerals part ii: Effect of temperature on adsorption. 1-10.
- Fuerstenau, D. W. & Pradip. (2019). A century of research leading to understanding the scientific basis of selective mineral flotation and design of flotation collectors. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 36(1), 3-20. (rayyan-2245078). <https://doi.org/10.1007/s42461-018-0042-6>
- Fuguo, L., Guohua, G., Li, H., Yanfei, X., Run, Y., & Kaizhong, L. (2018). Compound leaching of rare earth from the ion-adsorption type rare earth ore with magnesium sulfate and ascorbic acid. *Hydrometallurgy*, 179, 25-35. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.05.027>
- Gabriela Cordeiro Silva, Alexandre Carvalho Bertoli, Helio Anderson Duarte, & Ana Claudia Queiroz Ladeira. (2022). Recovery of rare earth elements from sulfate-rich acid mine water: Looking through the keyhole the exchange reaction for cationic resin. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 1-9. (rayyan-2244215). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108715>
- Galvin, J., & Safarzadeh, M. S. (2018). Decomposition of monazite concentrate in potassium hydroxide solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 1353-1363. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.042>
- Gao, B., Liu, X., Wu, Y., Cheng, H., Zhou, H., Wang, Y., & Chen, Z. (2024). Integration of lactic acid biorefinery with treatment of red mud from alumina refinery: Win-win paradigm for waste

- valorization. *Bioresource Technology*, 401, 1-8. (rayyan-2244141).
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130743>
- Gao, B., Sun, C., Yang, T., Cheng, H., Zhou, H., Wang, Y., & Chen, Z. (2024). Simultaneous dealcalization of red mud and recovery of valuable metals by a novel marine fungus tolerating high alkalinity and salinity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(1), 111775.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111775>
- Gasser, M. S., Ismail, Z. H., Abu Elgoud, E. M., Abdel Hai, F., Ali, O. I., & Aly, H. F. (2019). Process for lanthanides-Y leaching from phosphogypsum fertilizers using weak acids. *Journal of Hazardous Materials*, 378, 120762. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120762>
- Gasser, M. S., Ismail, Z. H., E. M. Abu Elgoud, F. Abdel Hai, Ali, I. O., & Aly, H. F. (2022). Alkali treatment-acid leaching of rare earth elements from phosphogypsum fertilizer[]: Insight for additional resource of valuable components. *BMC Chemistry*, 16(1), 1-10. (rayyan-2244078).
<https://doi.org/10.1186/s13065-022-00845-7>
- 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. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(1), 31-39-39. (rayyan-16055756).
<https://doi.org/10.1007/s11367-015-0917-4>
- Geneyton, A., Filippov, L. O., Heinig, T., Buaron, N., & Menad, N.-E. (2021). Towards the efficient flotation of monazite from silicate-rich tailings with fatty acids collectors using a lanthanum salt as a selective phosphate activator. *Minerals Engineering*, 160, 106704. (rayyan-2244693).
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106704>
- Geneyton, A., Foucaud, Y., Filippov, L. O., Menad, N.-E., Renard, A., & Badawi, M. (2020). Synergistic adsorption of lanthanum ions and fatty acids for efficient rare-earth phosphate recovery[]: Surface analysis and ab initio molecular dynamics studies. *Applied Surface Science*, 526, 146725. (rayyan-2245023). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.146725>
- Ghani, J., Toller, S., Dinelli, E., & Funari, V. (2023). Impact and recoverability of metals from waste[]: A case study on bottom ash from municipal solid waste incineration plants. *Frontiers in Environmental Science*, 1-12. (rayyan-726051190). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1252313>

- Giovannini, A. L., Bastos Neto, A. C., Porto, C. G., Takehara, L., Pereira, V. P., & Bidone, M. H. (2021). REE mineralization (primary, supergene and sedimentary) associated to the morro dos seis lagos Nb (REE, Ti) deposit (amazonas, brazil). *Ore Geology Reviews*, 137, 104308. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104308>
- Gomez-Flores, A., Ilyas, S., Heyes, G. W., & Kim, H. (2022). A critical review of artificial intelligence in mineral concentration. *Minerals Engineering*, 189, 107884. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107884>
- Gonzalez, F. J., Medialdea, T., Schiellerup, H., Zananiri, I., Ferreira, P., Somoza, L., Monteys, X., Alcorn, T., Marino, E., Lobato, A. B., Zalba-Balda, I., Kuhn, T., Nyberg, J., Malyuk, B., Magalhaes, V., Hein, J. R., & Cherkashov, G. (2023). MINDeSEA: exploring seabed mineral deposits in European seas, metallogeny and geological potential for strategic and critical raw materials. *Geological Society Special Publication*, 526(1), 289-317. (rayyan-17587565). <https://doi.org/10.1144/sp526-2022-150>
- Goodenough, K. M., Schilling, J., Jonsson, E., Kalvig, P., Charles, N., Tuduri, J., Deady, E. A., Sadeghi, M., Schiellerup, H., Müller, A., Bertrand, G., Arvanitidis, N., Eliopoulos, D. G., Shaw, R. A., Thrane, K., & Keulen, N. (2016). Europe's rare earth element resource potential[]: An overview of REE metallogenetic provinces and their geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 72, 838-856. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.09.019>
- 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. *Environmental Chemistry*, 17(2), 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 M. Chalot (Éd.), *Advances in Botanical Research* (Vol. 109, p. 19-61). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2023.10.005>
- Grosse, F. (2014). Les limites du recyclage dans un contexte de demande croissante de matières premières. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 76(4), 58-63. <https://doi.org/10.3917/re.076.0058>

- Grosse, F. (2023). *Croissance soutenable*/? La société au défi de l'économie circulaire. PUG.
- Grzesik, K., Kossakowska, K., Bieda, B., & Kozakiewicz, R. (2019). Screening life cycle assessment of beneficiation processes for rare earth elements recovery from secondary sources. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1-12. (rayyan-1284578454). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012068>
- Guo, L., Chen, J., Shen, L., Zhang, J., Zhang, D., & Deng, Y. (2014). Highly selective extraction and separation of rare earths(III) using bifunctional ionic liquid extractant. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(8), 1968-1975. <https://doi.org/10.1021/sc400541b>
- Guo, X., Xu, B., Yu, H., Burnett, W. C., Li, S., Lian, E., Zhu, Z., Zhao, S., Chen, G., Duan, X., Dimova, N., Wang, Y., Zhuang, G., & Yu, Z. (2022). Exploration of deep ocean ferromanganese nodule fields using radon as a tracer. *Geophysical Research Letters*, 49(22), 1-8. (rayyan-2244113). <https://doi.org/10.1029/2022gl100726>
- Guo, Z., Sultan Ahmed Khoso, Wang, J., Zhang, C., Gao, Z., Sun, W., Tian, M., & Liu, Y. (2022). Interaction mechanism of 2-hydroxy-3-naphthyl hydroxamic acid and 1-hydroxy-2-naphthyl hydroxamic acid in the flotation separation of bastnaesite/fluorite[]: Experiments and first-principles calculations. *Separation and Purification Technology*, 285, 1-15. (rayyan-2244189). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120307>
- Guo, Z., Tian, M., Qian, G., Zhou, Y., Gao, Z., & Sun, W. (2022). Flotation separation of bastnaesite and fluorite using styrylphosphonic acid and cinnamohydroxamic acid as collectors. *Journal of Molecular Liquids*, 362, 1-11. (rayyan-2244121). <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119766>
- Gupta, C. K., & Krishnamurthy, N. (1992). Extractive metallurgy of rare earths. *International Materials Reviews*, 37, 1-52. <https://doi.org/10.1179/imr.1992.37.1.197>
- Gupta, C. K., & Krishnamurthy, N. (2013). Oxide reduction processes in the preparation of rare-earth metals. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 30(1), 38-44. <https://doi.org/10.1007/BF03402339>
- Gupta, C., & Krishnamurthy, N. (2005). *Extractive metallurgy of rare earths*. CRC Press.
- Habashi, F. (1985). The recovery of the lanthanides from phosphate rock. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology. Chemical Technology*, 35(1), 5-14. <https://doi.org/10.1002/jctb.5040350103>

- Habashi, F. (2013). Extractive metallurgy of rare earths. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 52(3), 224-233. (rayyan-2245594). <https://doi.org/10.1179/1879139513Y.0000000081>
- Habibi, H., Pirouzan, D., Shakibania, S., Pourkarimi, Z., & Mokmeli, M. (2022). Physical and chemical separation of Ti, rare earth elements, Fe, and Al from red mud by carbothermal reduction, magnetic separation, and leaching. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(42), 62952-62972. (rayyan-2244202). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20244-8>
- Hailes, O. (2022). Lithium in international law[]: Trade, investment, and the pursuit of supply chain justice. *Journal of International Economic Law*, 25(1), 148-170. (rayyan-1279579783). <https://doi.org/10.1093/jiel/jgac002>
- Han, Y., Chen, J., Deng, Y., Liu, T., Li, H., & Li, D. (2022). An innovative technique for the separation of ion-adsorption high yttrium rare earth ore by Er (III) / Tm (III) grouping first. *Separation and Purification Technology*, 280, 119929. (rayyan-2244081). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119929>
- Han, Y., & Lin, M. (2022). *Design and analysis of a novel hybrid permanent-magnet machine with less rare earth materials*. (rayyan-13566281). SCEMS 2022 - 2022 IEEE 5th Student Conference on Electric Machines and Systems. <https://doi.org/10.1109/scems56272.2022.9990700>
- 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. *Resources, Conservation and Recycling*, 205, 1-18. (rayyan-1279579497). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107572>
- Hauton, C., Brown, A., Thatje, S., Mestre, N. C., Bebianno, M. J., Martins, I., Bettencourt, R., Canals, M., Sanchez-Vidal, A., Shillito, B., Ravaux, J., Zbinden, M., Duperron, S., Mevenkamp, L., Vanreusel, A., Gambi, C., Dell'Anno, A., Danovaro, R., Gunn, V., & Weaver, P. (2017). Identifying toxic impacts of metals potentially released during deep-sea mining-a synthesis of the challenges to quantifying risk. *Frontiers in Marine Science*, 4, 1-13. (rayyan-1284578444). <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00368>
- He, X., Xu, C., & Chen, J. (2014). Extraction of trivalent lanthanides with purified Cyanex 302[]: Determination of distribution coefficients and structural characterization of extracted species.

- Separation and Purification Technology*, 132, 317-322.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.05.032>
- 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. *Chemical Geology*, 661, 122186.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122186>
- Hedin, B. C., Capo, R. C., Stewart, B. W., Hedin, R. S., Lopano, C. L., & Stuckman, M. Y. (2019). The evaluation of critical rare earth element (REE) enriched treatment solids from coal mine drainage passive treatment systems. *International Journal of Coal Geology*, 208, 54-64. (rayyan-17587675). <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.04.007>
- Hein, A. M., Matheson, R., & Fries, D. (2020). A techno-economic analysis of asteroid mining. *Acta Astronautica*, 168, 104-115. (rayyan-1284471561).
<https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.05.009>
- Hein, J. R., Koschinsky, A., & Kuhn, T. (2020). Deep-ocean polymetallic nodules as a resource for critical materials. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(3), 158-169. (rayyan-1279580017).
<https://doi.org/10.1038/s43017-020-0027-0>
- Hengkai, L., Feng, X., & Qin, L. (2020). Remote sensing monitoring of land damage and restoration in rare earth mining areas in 6 counties in southern jiangxi based on multisource sequential images. *Journal of Environmental Management*, 267, 1-9. (rayyan-2244518).
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110653>
- Hetherington, C. J., Jercinovic, M. J., Williams, M. L., & Mahan, K. (2008). Understanding geologic processes with xenotime[]: Composition, chronology, and a protocol for electron probe microanalysis. *Chemical Geology*, 254(3-4), 133-147.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.05.020>
- Hidayah, N. N., & Abidin, S. Z. (2018). The evolution of mineral processing in extraction of rare earth elements using liquid-liquid extraction[]: A review. *Minerals Engineering*, 121, 146-157.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.018>

- Higashiyama, Y., & Asano, K. (1998). Recent progress in electrostatic separation technology. *Particulate Science and Technology*, 16(1), 77-90. <https://doi.org/10.1080/02726359808906786>
- Honaker, R. Q., Groppo, J., Yoon, R.-H., Luttrell, G. H., Noble, A., & Herbst, J. (2017). Process evaluation and flowsheet development for the recovery of rare earth elements from coal and associated byproducts. *Minerals and Metallurgical Processing*, 34(3), 107-115. (rayyan-2245373). <https://doi.org/10.19150/mmp.7610>
- Honaker, R. Q., Zhang, W., Werner, J., Noble, A., Luttrell, G. H., & Yoon, R. H. (2020). Enhancement of a process flowsheet for recovering and concentrating critical materials from bituminous coal sources. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 37(1), 3-20. (rayyan-2244837). <https://doi.org/10.1007/s42461-019-00148-x>
- 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. *Journal of Geochemical Exploration*, 267, 107581. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107581>
- Honour, V. C., Goodenough, K. M., Shaw, R. A., Gabudianu, I., & Hirtopanu, P. (2018). REE mineralisation within the ditrau alkaline complex, romania[]: Interplay of magmatic and hydrothermal processes. *Lithos*, 314, 360-381. (rayyan-2245280). <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.05.029>
- Horiuchi, Y., Ohno, T., Hoshino, M., Shin, K.-C., Murakami, H., Tsunematsu, M., & Watanabe, Y. (2014). Geochemical prospecting for rare earth elements using termite mound materials. *Mineralium Deposita*, 49(8), 1013-1023. (rayyan-2244769). <https://doi.org/10.1007/s00126-014-0550-3>
- Hou, S., Wang, W., Zhang, B., Li, W., Guo, C., Li, Q., & Li, E. (2024). Separation of iron and rare earths from low-intensity magnetic separation (LIMS) tailings through magnetization roasting-magnetic separation. *ChemistryOpen*, 13(2), 1-7. (rayyan-2243887). <https://doi.org/10.1002/open.202300059>
- Hower, J. C., Ruppert, L. F., & Eble, C. F. (1999). Lanthanide, yttrium, and zirconium anomalies in the fire clay coal bed, eastern kentucky. *International Journal of Coal Geology*, 39(1), 141-153. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(98\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00043-3)

- Huang, L., Gao, G., Wu, R., Zhang, Q., Lai, F., & Xiao, Y. (2019). Non-ammonia enrichment of rare earth by magnesium oxide from rare earth leaching liquor in magnesium salt system. *Journal of Rare Earths*, 37(8), 886-894. (rayyan-2245155). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2018.10.007>
- Huang, X.-W., Long, Z.-Q., Wang, L.-S., & Feng, Z.-Y. (2015). Technology development for rare earth cleaner hydrometallurgy in China. *Rare Metals*, 34(4), 215-222. <https://doi.org/10.1007/s12598-015-0473-x>
- Hund, K. L., Arrobas, Daniele La Porta, Fabregas Masllovet, Thao Phuong, Laing, Timothy James, Drexhage, John. (2017). *Minerals for climate action*: The mineral intensity of the clean energy transition [Text/HTML]. World Bank. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099052423172525564>
- İnan, S., Tel, H., Sert, Ş., Çetinkaya, B., Sengül, S., Özkan, B., & Altaş, Y. (2018). Extraction and separation studies of rare earth elements using Cyanex 272 impregnated Amberlite XAD-7 resin. *Hydrometallurgy*, 181, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.09.005>
- Izoard, C. (2024). *La ruée minière au XXI^e siècle. Enquête sur les métaux à l'ère de la transition* (Éditions Seuil).
- Jalali, J., & Lebeau, T. (2021). The role of microorganisms in mobilization and phytoextraction of rare earth elements: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 1-19. (rayyan-2244690). <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. *Minerals Engineering*, 166, 1-35. (rayyan-2244317). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106879>
- Janots, E., Engi, M., Berger, A., Allaz, J., J. -O. Schwarz, & Spandler, C. (2008). Prograde metamorphic sequence of REE minerals in pelitic rocks of the central alps: Implications for allanite-monazite-xenotime phase relations from 250 to 610 °C. *Journal of Metamorphic Geology*, 26(5), 509-526. (rayyan-24596863). <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2008.00774.x>

- Jenkins, H. (2004). Corporate social responsibility and the mining industry[]: Conflicts and constructs. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 11(1), 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. *Corporate Responsibility Research Conference, Dublin*, 4-5.
- Jerez, B., Garcés, I., & Torres, R. (2021). Lithium extractivism and water injustices in the salar de atacama, chile[]: The colonial shadow of green electromobility. *Political Geography*, 87, 102382. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2021.102382>
- 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 Astronautica*, 166, 59-68. (rayyan-2244708). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.10.004>
- Jiang, X., XueHui Lin, De Yao, & WeiDong Guo. (2011). Enrichment mechanisms of rare earth elements in marine hydrogenic ferromanganese crusts. *Science China Earth Sciences*, 54(2), 197-203. (rayyan-2245659). <https://doi.org/10.1007/s11430-010-4070-4>
- Jianzhong, C., Yunbing, H., & Liping, C. (2007). Flotation separation on rare earth minerals and gangues. *Journal of Rare Earths*, 25, 62-66. (rayyan-2245900).
- Jiao, Y., Qiu, K.-H., Zhang, P.-C., Li, J.-F., Zhang, W.-T., & Chen, X.-F. (2020). Process mineralogy of dalucao rare earth ore and design of beneficiation process based on AMICS. *Rare Metals*, 39(8), 959-966. (rayyan-2244992). <https://doi.org/10.1007/s12598-020-01446-w>
- Joam Evans Pim. (2021). « Galiza is (not) a mine »[]: Rural responses to pro-extractivist policies. *Araucaria-Revista Iberoamericana De Filosofia Politica Y Humanidades*, 23(48), 441-466. (rayyan-1279579863). <https://doi.org/10.12795/araucaria.2021.i48.20>
- Johansson, O., & Pettersson, M. (2022). Environmental law issues in connection with landfill mining. *Detritus*, 1-8. (rayyan-1284422378). <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2022.15160>
- Jones, D. A., Kingman, S. W., Whittles, D. N., & Lowndes, I. S. (2005). Understanding microwave assisted breakage. *Minerals Engineering*, 18(7), 659-669. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.10.011>

- Jones, D. W., Abell, J. S., Fort, D., & Hulbert, J. K. (1982). Preparation of rare earth materials, crystals and specimens. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 29(1-3), 20-30. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(82\)90213-X](https://doi.org/10.1016/0304-8853(82)90213-X)
- 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. *Geological Society, London, Special Publications*, 526(1), 95-152. <https://doi.org/10.1144/SP526-2022-55>
- Jordens, A., Cheng, Y. P., & Waters, K. E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 41, 97-114. (rayyan-2245586). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.017>
- Jordens, A., Marion, C., Grammatikopoulos, T., Hart, B., & Waters, K. E. (2016). Beneficiation of the nechalacho rare earth deposit[]: Flotation response using benzohydroxamic acid. *Minerals Engineering*, 99, 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.08.024>
- Jorgensen, L. F., Wittenberg, A., Deady, E., Kumelj, S., & Tulstrup, J. (2023). European mineral intelligence—Collecting, harmonizing and sharing data on European raw materials. *Geological Society Special Publication*, 526(1), 51-67. (rayyan-1279579596). <https://doi.org/10.1144/sp526-2022-179>
- Joyce, P. J., & Björklund, A. (2019). Using life cycle thinking to assess the sustainability benefits of complex valorization pathways for bauxite residue. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 5(1), 69-84. <https://doi.org/10.1007/s40831-019-00209-x>
- Jyothi, A., & Rao, G. N. (1989). *Studies on extraction of lanthanum(iii), cerium(iii), europium(iii), thorium(iv) and uranium(vi) with 3-phenyl%acetyl-5isoxazolone (hpa)*. 1-6.
- Jyothi, A., & Rao, G. N. (1990). *Solvent extraction behaviour of lanthanum(iii), cerium(iii), europium(iii), thorium(iv) and uranium(vi) with 3-phenyl-4-benzoyl-5-isoxazolone*. 1-3.
- Kaksonen, A. H., Deng, X., Bohu, T., Zea, L., Khaleque, H. N., Gumulya, Y., Boxall, N. J., Morris, C., & Cheng, K. Y. (2020). Prospective directions for biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 195, 105376. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105376>

- Kalatha, S., Perraki, M., Economou-Eliopoulos, M., & Mitsis, I. (2017). On the origin of bastnaesite-
(La,Nd,Y) in the nissi (patitira) bauxite laterite deposit, lokris, greece. *Minerals*, 7(3). (rayyan-
2245369). <https://doi.org/10.3390/min7030045>
- 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 (p. 87-109). (rayyan-1279580462).
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802328-0.00006-1>
- Kanazawa, Y., & Kamitani, M. (2006). Rare earth minerals and resources in the world. *Journal of Alloys
and Compounds*, 408, 1339-1343. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.04.033>
- Karan, R., Sreenivas, T., & Singh, D. K. (2023). Studies on hydrometallurgical recovery of rare earth
elements as mixed fluoride compound from coal fly ash using environmentally friendly organic
acid. *Separation Science and Technology*, 58(15), 2856-2866. (rayyan-756951933).
<https://doi.org/10.1080/01496395.2023.2227758>
- Karimzadeh, S., & Tangestani, M. H. (2022). Potential of sentinel-2 MSI data in targeting rare earth
element (Nd³⁺) bearing minerals in esfordi phosphate deposit, iran. *Egyptian Journal of Remote
Sensing and Space Sciences*, 25(3), 697-710. (rayyan-2244367).
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.04.001>
- Katiyar, N., Kulshreshtha, A., & Singh, P. K. (2024). A Review of Integration Techniques of Multi-
Geoscience Data-Sets in Mineral Prospectivity Mapping. *Earth Sciences*, 13(4), Article 4.
<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.
Nature Geoscience, 4(8), 535-539. <https://doi.org/10.1038/ngeo1185>
- Kim, E., & Osseo-Asare, K. (2012). Aqueous stability of thorium and rare earth metals in monazite
hydrometallurgy[]: Eh—pH diagrams for the systems Th—, Ce—, La—, Nd— (PO₄)—(SO₄)—H₂O
at 25 °C. *Hydrometallurgy*, 113-114, 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.007>
- Kim, J. S., Kumar, B. N., Radhika, S., Kantam, M. L., & Reddy, B. R. (2012). Studies on selection of solvent
extractant system for the separation of trivalent Sm, Gd, Dy and Y from chloride solutions.

- International Journal of Mineral Processing*, 112-113, 37-42.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.07.004>
- Kim, K., & Jeong, S. (2019). Separation of monazite from placer deposit by magnetic separation. *Minerals*, 9(3), 1-12. (rayyan-2245191). <https://doi.org/10.3390/min9030149>
- Kim, W., Bae, I., Chae, S., & Shin, H. (2009). Mechanochemical decomposition of monazite to assist the extraction of rare earth elements. *Journal of Alloys and Compounds*, 486(1-2), 610-614.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.07.015>
- Kingman, S. W. (2006). Recent developments in microwave processing of minerals. *International Materials Reviews*, 51(1), 1-12. <https://doi.org/10.1179/174328006X79472>
- Klauber, C., Gräfe, M., & Power, G. (2011). Bauxite residue issues[]: II. options for residue utilization. *Hydrometallurgy*, 108(1-2), 11-32. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.007>
- Komnitsas, K. (2020). Social license to operate in mining[]: Present views and future trends. *Resources-Basel*, 9(6). (rayyan-1284031299). <https://doi.org/10.3390/resources9060079>
- Kon, Y., Hoshino, M., Sanematsu, K., Morita, S., Tsunematsu, M., Okamoto, N., Yano, N., Tanaka, M., & Takagi, T. (2014). Geochemical characteristics of apatite in heavy REE -rich deep-sea mud from M inami- T orishima area, southeastern J apan. *Resource Geology*, 64(1), 47-57.
<https://doi.org/10.1111/rge.12026>
- Kopackova-Strnadova, V., Rapprich, V., McLemore, V., Pour, O., & Magna, T. (2021). Quantitative estimation of rare earth element abundances in compositionally distinct carbonatites[]: Implications for proximal remote-sensing prospection of critical elements. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 103, 1-18. (rayyan-2244426).
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102423>
- Koschinsky, A., Heinrich, L., Boehnke, K., J. Christopher Cohrs, Markus, T., Shani, M., Singh, P., Karen Smith Stegen, & Werner, W. (2018). Deep-sea mining[]: Interdisciplinary research on potential environmental, legal, economic, and societal implications. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 14(6), 672-691. (rayyan-1279580219). <https://doi.org/10.1002/ieam.4071>
- Kozakiewicz, R., & Grzesik, K. (2017). Environmental impact of extraction of ree from mining waste and tailings—Screening stage. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying*

- Geology and Mining Ecology Management*, SGEM. (rayyan-1284471570).
<https://doi.org/10.5593/sgem2017/41/S18.012>
- Kozłowska-Roman, A., & Mikulski, S. Z. (2021). Chemical and morphological characterization of polymetallic (Mn-Fe) nodules from the Clarion - Clipperton zone in the Pacific Ocean. *Geological Quarterly*, 65(4), 1-18. (rayyan-2244443). <https://doi.org/10.7306/gq.1626>
- Kramarz, T., Park, S., & Johnson, C. (2021). Governing the dark side of renewable energy: A typology of global displacements. *Energy Research & Social Science*, 74, 101902. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101902>
- Krutilla, K., Good, D., Toman, M., & Arin, T. (2021). Addressing fundamental uncertainty in benefit-cost analysis: The case of deep seabed mining. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 12(1), 122-151. (rayyan-1284422363). <https://doi.org/10.1017/bca.2020.28>
- Kuhn, T., & Ruehlemann, C. (2021). Exploration of polymetallic nodules and resource assessment: A case study from the German contract area in the Clarion-Clipperton zone of the tropical northeast Pacific. *Minerals*, 11(6), 1-27. (rayyan-2244461). <https://doi.org/10.3390/min11060618>
- Kumar, P., Sahoo, B. K., De, S., Kar, D. D., Chakraborty, S., & Meikap, B. C. (2010). Iron ore grindability improvement by microwave pre-treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16(5), 805-812. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2010.05.008>
- Kumari, A., Panda, R., Jha, M. K., & Pathak, D. D. (2018). Extraction of rare earth metals by organometallic complexation using PC88A. *Comptes Rendus Chimie*, 21(11), 1029-1034. (rayyan-2245244). <https://doi.org/10.1016/j.crci.2018.09.005>
- Kumari, A., Panda, R., Manis Kumar Jha, J. Rajesh Kumar, & Jin Young Lee. (2015). Process development to recover rare earth metals from monazite mineral: A review. *Minerals Engineering*, 79, 102-115. (rayyan-2245520). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.05.003>
- Kursun, I., Terzi, M., & Ozdemir, O. (2019). Determination of surface chemistry and flotation properties of rare earth mineral allanite. *Minerals Engineering*, 132, 113-120. (rayyan-2245116). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.044>

- L. Ye Reykhard, & Shulga, N. A. (2019). Fe-Mn nodule morphotypes from the NE clarion-clipperton fracture zone, pacific ocean[]: Comparison of mineralogy, geochemistry and genesis. *Ore Geology Reviews*, 110, 1-15. (rayyan-2245133). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.102933>
- Lallemant, C., Ambrosi, J.-P., Borschneck, D., Angeletti, B., Chaurand, P., Campos, A., Desmau, M., Fehlaue, T., Auffan, M., Labille, J., Roche, N., Poizat, L., Collin, B., Rose, J., & Levard, C. (2022). Potential of ligand-promoted dissolution at mild pH for the selective recovery of rare earth elements in bauxite residue. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1-23. (rayyan-10656666). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c08081>
- Lambert, A., Anawati, J., Walawalkar, M., Tam, J., & Azimi, G. (2018). Innovative application of microwave treatment for recovering of rare earth elements from phosphogypsum. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. (rayyan-10656664). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03588>
- Langkau, S., & Erdmann, M. (2021). Environmental impacts of the future supply of rare earths for magnet applications. *Journal of Industrial Ecology*, 1-17. (rayyan-1284031338). <https://doi.org/10.1111/jiec.13090>
- Lasselin, C., Barot, S., & Barberousse, A. (2024). Value chains and environmental impact assessments[]: Lessons from two french legal cases on bioenergy facilities. *Transnational Environmental Law*, 1-24. <https://doi.org/10.1017/S2047102524000232>
- Laurent, B. (2023). Quelle politique du territoire face à l'extraction minière? In J. Cerceau & B. Laurent (Éds.), *Quand la mine déborde. Enquêtes sur la fabrique des territoires extractifs*. (p. 157-178). Presses des Mines. <https://hal.science/hal-04138644>
- Laurent, B., & Merlin, J. (2021). L'ingénierie de la promesse[]: Le nouveau minier français et la «[]mine responsable[]». *Natures Sciences Sociétés*, (Supp5), 55-68. <https://doi.org/10.1051/nss/2021046>
- Lee, J., Bazilian, M., Sovacool, B., & Greene, S. (2020). Responsible or reckless[]? A critical review of the environmental and climate assessments of mineral supply chains. *Environmental Research Letters*, 15(10). (rayyan-1279580079). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9f8c>
- Lee, J. C. K., & Wen, Z. (2017). Rare earths from mines to metals comparing environmental impacts from China's main production pathways. *Journal of Industrial Ecology*, 1-14. (rayyan-10656647). <https://doi.org/10.1111/jiec.12491>

- Lhuillier, G. (2022). La proposition de directive européenne sur le devoir de vigilance des entreprises en matière de durabilité. *Rdai/Iblj*, (5).
- Lhuillier, G. (2024). L'acceptabilité sociale «[à la française]»: Les cas du projet minier montagne d'or en guyane et du projet d'usine éolienne à saint-brieuc.
- Lhuillier, G., Krolík, C., & Tanchon. (2024). Introduction: Les bonnes pratiques concernant les ententes entre les entreprises minières et le milieu d'accueil. 1-12.
- Lhuillier, G., & Thibault, C. (2020). La méthode de la licence sociale et environnementale d'opérer (SDLO): Le cas de la participation des populations locales au projet «montagne d'or» en guyane. *Politiques Et Management Public*, 37(1), 103-128. <https://doi.org/10.3166/pmp.37.2020.0003>
- Li, D. (2019). Development course of separating rare earths with acid phosphorus extractants: A critical review. *Journal of Rare Earths*, 37(5), 468-486. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2018.07.016>
- Li, H., Wu, G., Xu, F., & Li, S. (2021). Landsat-8 and gaofen-1 image-based inversion method for the downscaled land surface temperature of rare earth mining areas. *Infrared Physics and Technology*, 113, 1-10. (rayyan-2244416). <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103658>
- Li, J. (2024). Leaching of ion adsorption rare earths and the role of bioleaching in the process: A review. *Journal of Cleaner Production*, 1-14.
- Li, J., Li, M., Zhang, D., Gao, K., Xu, W., Wang, H., Geng, J., & Huang, L. (2020). Clean production technology of baiyun obo rare earth concentrate decomposed by Al(OH)₃-NaOH. *Chemical Engineering Journal*, 382, 122790. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122790>
- Li, M., Gao, K., Zhang, D., Duan, H., Ma, L., & Huang, L. (2018). The influence of temperature on rare earth flotation with naphthyl hydroxamic acid. *Journal of Rare Earths*, 36(1), 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2017.07.004>
- Li, M., Li, J., Zhang, D., Gao, K., Wang, H., Xu, W., Geng, J., Zhang, X., & Ma, X. (2020). Decomposition of mixed rare earth concentrate by NaOH roasting and kinetics of hydrochloric acid leaching process. *Journal of Rare Earths*, 38(9), 1019-1029. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2019.06.012>

- Li, R., Marion, C., Espiritu, E. R. L., Multani, R., Sun, X., & Waters, K. E. (2021). Investigating the use of an ionic liquid for rare earth mineral flotation*. *Journal of Rare Earths*, 39(7), 866-874. (rayyan-2244479). <https://doi.org/10.1016/j.jre.2020.09.003>
- Li, S., Malik, M., & Azimi, G. (2022). Extraction of rare earth elements from phosphogypsum using mineral acids[]: Process development and mechanistic investigation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(1), 102-114. (rayyan-2244117). <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c03576>
- Li, W., Li, Z., Wang, N., & Gu, H. (2022). Selective extraction of rare earth elements from red mud using oxalic and sulfuric acids. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 1-8. (rayyan-2244284). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108650>
- Li, W., Wang, X., Meng, S., Li, D., & Xiong, Y. (2007). Extraction and separation of yttrium from the rare earths with sec-octylphenoxy acetic acid in chloride media. *Separation and Purification Technology*, 54(2), 164-169. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.08.029>
- Li, Y. H. M., Zhao, W. W., & Zhou, M.-F. (2017). Nature of parent rocks, mineralization styles and ore genesis of regolith-hosted REE deposits in south China[]: An integrated genetic model. *Journal of Asian Earth Sciences*, 148, 65-95. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.08.004>
- Lill Rastad Bjorst. (2016). Saving or destroying the local community[]? Conflicting spatial storylines in the greenlandic debate on uranium. *Extractive Industries and Society-an International Journal*, 3(1), 34-40. (rayyan-1279580411). <https://doi.org/10.1016/j.exis.2015.11.006>
- Lin, R., Howard, B. H., Roth, E. A., Bank, T. L., Granite, E. J., & Soong, Y. (2017). Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations. *Fuel*, 1-15. (rayyan-726051424). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.096>
- Liu, C., Xu, L., Deng, J., Tian, J., Wang, D., Xue, K., Zhang, X., Wang, Y., Fang, J., & Liu, J. (2023). A review of flotation reagents for bastnasite-(Ce) rare earth ore. *Advances in Colloid and Interface Science*, 321, 1-16. (rayyan-2243904). <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103029>
- Liu, H., Zhang, Y., Luan, Y., Yu, H., & Li, D. (2020). Research progress in preparation and purification of rare earth metals. *Metals*, 10(10), 1376. <https://doi.org/10.3390/met10101376>

- Liu, J., Huang, K., Wu, X., Liu, W., Song, W., & Liu, H. (2018). Extraction of rare earths using bubbling organic liquid membrane with un-saponified P507. *Hydrometallurgy*, 175, 340-347. (rayyan-2245245). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.12.015>
- Liu, K., Wang, Z., Mei, J., Lu, B., Wu, Y., Yang, S., & Lin, X. (2023). A green yttrium extraction system containing naphthenic acid, trioctyl/decylamine and isopropanol. *Journal of Cleaner Production*, 415, 137747. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137747>
- Liu, P., Guo, Z., Zhang, W., Tian, M., & Sun, W. (2024). N-[6-(hydroxyamino)-6-oxohexyl]octanamide[]: A collector derived from the structure of octyl hydroxamic acid and its application in bastnaesite flotation. *Separation and Purification Technology*, 331, 1-10. (rayyan-2243867). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125562>
- Liu, P., Huang, R., & Tang, Y. (2019). Comprehensive understandings of rare earth element (REE) speciation in coal fly ashes and implication for REE extractability. *Environmental Science & Technology*, 53(9), 5369-5377. (rayyan-756951952). <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00005>
- Liu, Q., Gao, P., Liu, J., Guo, C., & Wen, G. (2025). Flotation performance and adsorption mechanism of monazite after the transformation of hydrogen-based mineral phase by octyl hydroxamic acid. *Powder Technology*, 451, 120462. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120462>
- Liu, Q., Sun, K., Ouyang, X., Sen, B., Dai, T., Liu, L., & Liu, G. (2022). Tracking three decades of global neodymium stocks and flows with a trade-linked multiregional material flow analysis. *Environmental Science & Technology*, 56(16), 11807-11817-11817. (rayyan-1251264202). <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02247>
- Liu, S., Mao, Y., Luo, Y., Weng, X., Chen, Q., Li, H., Yi, H., Song, S., & He, D. (2022). Selective flotation separation of bastnaesite from dolomite using β -naphthyl sulfonate formaldehyde condensate as depressant[]: Experimental and calculational studies. *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 639, 1-9. (rayyan-2244285). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.128380>
- Liu, T., & Chen, J. (2021). Extraction and separation of heavy rare earth elements[]: A review. *Separation and Purification Technology*, 276, 119263. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119263>

- Liu, W., McDonald, L. W., Wang, X., & Miller, J. D. (2018). Bastnaesite flotation chemistry issues associated with alkyl phosphate collectors. *Minerals Engineering*, 127, 286-295. (rayyan-2245223). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.023>
- Liu, W., Wang, X., Wang, Z., & Miller, J. D. (2016). Flotation chemistry features in bastnaesite flotation with potassium lauryl phosphate. *Minerals Engineering*, 85, 17-22. (rayyan-2245441). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.10.010>
- Liu, W.-S., Van Der Ent, A., Erskine, P. D., Morel, J. L., Echevarria, G., Spiers, K. M., Montargès-Pelletier, E., Qiu, R.-L., & Tang, Y.-T. (2020). Spatially resolved localization of lanthanum and cerium in the rare earth element hyperaccumulator fern *Dicranopteris linearis* from China. *Environmental Science & Technology*, 54(4), 2287-2294. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05728>
- Liu, Y., & Naidu, R. (2014). Hidden values in bauxite residue (red mud)[]: Recovery of metals. *Waste Management*, 34(12), 2662-2673. (rayyan-2245553). <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.003>
- Liu, Y., & Yao, C. (2023). Development of an efficient numerical model for two-phase flows in air-lift pumps and its application to deep-sea mining. *Ocean Engineering*, 281, 1-13. (rayyan-2243934). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114897>
- Lo, T. C., Baird, M. H. I., & Hanson, C. (Éds.). (1983). *Handbook of solvent extraction*. Wiley.
- Lokshin, E. P., & Tareeva, O. A. (2023). Integrated technology for processing of apatite concentrate. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 57(5), 1154-1164. (rayyan-2243977). <https://doi.org/10.1134/s0040579523050172>
- Lorenz, T., & Bertau, M. (2020). 1.4 Rare earth metal production and refinement. In R. Pöttgen, T. Jüstel, & C. A. Strassert (Éds.), *Rare Earth Chemistry* (p. 49-54). De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110654929-004>
- Lu, S.-B., Warmadewanthi, & Liu, J.-C. (2023). Recovery of rare earth elements from phosphogypsum using subcritical water extraction. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 190, 1-7. (rayyan-2244020). <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109433>

- Lu, Y., Wei, H., Zhang, Z., Li, Y., Wu, G., & Liao, W. (2016). Selective extraction and separation of thorium from rare earths by a phosphorodiamidate extractant. *Hydrometallurgy*, 163, 192-197. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.04.008>
- Lu, Y., Zhang, Z., Li, Y., & Liao, W. (2017). Extraction and recovery of cerium(IV) and thorium(IV) from sulphate medium by an α -aminophosphonate extractant. *Journal of Rare Earths*, 35(1), 34-40. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(16\)60170-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(16)60170-9)
- Luo, N., Shi, J., Yan, B., & Wang, X. (2024). Flotation separation of magnesite from dolomite using sodium silicate modified with zinc sulfate as a selective depressant. *Minerals*, 14(4), 355-365. <https://doi.org/10.3390/min14040355>
- 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(5), 554-586. <https://doi.org/10.3390/min12050554>
- Luszczek, K., & Przylibski, T. A. (2019). Potential deposits of selected metallic resources on L chondrite parent bodies. *Planetary and Space Science*, 168, 40-51. (rayyan-2245159). <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.02.005>
- Lütke, S. F., Oliveira, M. L. S., Waechter, S. R., Silva, L. F. O., Cadaval, T. R. S., Duarte, F. A., & Dotto, G. L. (2022). Leaching of rare earth elements from phosphogypsum. *Chemosphere*, 301, 134661. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134661>
- Lutke, S. F., Pinto, D., Leticia Callegaro Brudi, Silva, L. F. O., Tito R. S. Cadaval Jr, Duarte, F. A., Ahmad, N., Nawaz, A., & Dotto, G. L. (2023). Ultrasound-assisted leaching of rare earth elements from phosphogypsum. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 1-12. (rayyan-10656720). <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109458>
- Ma, J., Li, S., Wang, J., Jiang, S., Panchal, B., & Sun, Y. (2023). Bioleaching rare earth elements from coal fly ash by aspergillus niger. *Fuel*, 354, 129387. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129387>
- Mackay, D. A. R., Simandl, G. J., Ma, W., Redfearn, M., & Gravel, J. (2016). Indicator mineral-based exploration for carbonatites and related specialty metal deposits—A QEMSCAN(R) orientation survey, british columbia, canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 165, 159-173. (rayyan-2244667). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.03.005>

- Maes, S., Zhuang, W.-Q., Rabaey, K., Alvarez-Cohen, L., & Hennebel, T. (2017). Concomitant leaching and electrochemical extraction of rare earth elements from monazite. *Environmental Science & Technology*, 1-21. (rayyan-10656668). <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03675>
- Malainine, C.-E., Raji, O., Ouabid, M., Khouakhi, A., Bodinier, J.-L., Laamrani, A., Hicham El Messbahi, Youbi, N., & Moulay Ahmed Boumehdi. (2022). An integrated ASTER-based approach for mapping carbonatite and iron oxide-apatite deposits. *Geocarto International*, 37(22), 6579-6601. (rayyan-2244278). <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1953617>
- Malinowski, B., Romaniuk, R., & Linczuk, M. (2019). On the legality of appropriation of space resources. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019*, 11176, 1-9. (rayyan-1279580165). <https://doi.org/10.1117/12.2537380>
- Manis Kumar Jha, Kumari, A., Panda, R., Jyothi Rajesh Kumar, Yoo, K., & Jin Young Lee. (2016). Review on hydrometallurgical recovery of rare earth metals. *Hydrometallurgy*, 165, 2-26. (rayyan-2245871). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.01.035>
- Marino, E., Francisco Javier Gonzalez, Kuhn, T., Madureira, P., V Anna Węgorzewski, Mirao, J., Medialdea, T., Oeser, M., Miguel, C., Reyes, J., Somoza, L., & Lunar, R. (2019). Hydrogenetic, diagenetic and hydrothermal processes forming ferromanganese crusts in the canary island seamounts and their influence in the metal recovery rate with hydrometallurgical methods. *Minerals*, 1-42. (rayyan-10656627). <https://doi.org/10.3390/min9070439>
- Marino, E., Gonzalez, F. J., Kuhn, T., Madureira, P., Somoza, L., Medialdea, T., Lobato, A., Miguel, C., Reyes, J., & Oeser, M. (2023). Factors controlling rare earth element plus yttrium enrichment in Fe-Mn crusts from canary islands seamounts (NE central atlantic). *Marine Geology*, 464, 1-21. (rayyan-2243954). <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2023.107144>
- Marion, C., Li, R., & Waters, K. E. (2020). A review of reagents applied to rare-earth mineral flotation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 279, 1-24. (rayyan-2244701). <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102142>
- Marion, C., Paris, J., Grammatikopoulos, T., Li, R., Kökçiliç, O., Langlois, R., Rowson, N. A., & Waters, K. E. (2023). Physical separations for rare-earth beneficiation of the nechalacho deposit. *Minerals*, 13(12), 1521. <https://doi.org/10.3390/min13121521>

- Mark William Kennedy, Sun, T., Yurramendi, L., Arnout, S., Aune, R. E., & Tranell, G. (2017). Pyrometallurgical treatment of apatite concentrate with the objective of rare earth element recovery: Part II. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(4), 846-857. (rayyan-2245376). <https://doi.org/10.1007/s40831-017-0148-y>
- Mars, J. C. (2018). Mineral and lithologic mapping capability of WorldView 3 data at mountain pass, california, using true- and false-color composite images, band ratios, and logical operator algorithms. *Economic Geology*, 113(7), 1587-1601. (rayyan-2244565). <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4604>
- Martin, P. G., Connor, D. T., Estrada, N., El-Turke, A., Megson-Smith, D., Jones, C. P., Kreamer, D. K., & Scott, T. B. (2020). Radiological identification of near-surface mineralogical deposits using low-altitude unmanned aerial vehicle. *Remote Sensing*, 12(21), 1-17. (rayyan-2244515). <https://doi.org/10.3390/rs12213562>
- Martinez-Alier, J. (2002). *The environmentalism of the poor a study of ecological conflicts and valuation*. Edward elgar, cheltenham. - References—Scientific research publishing. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=423728>
- Martinez-Jimenez, M., Moyano-Camero, C. E., Trigo-Rodriguez, J. M., Alonso-Azcarate, J., Llorca, J., TrigoRodriguez, J., Gritsevich, M., & Palme, H. (2017). Asteroid mining: Mineral resources in undifferentiated bodies from the chemical composition of carbonaceous chondrites. *Assessment and Mitigation of Asteroid IMPACT Hazards*, 46, 73-101. (rayyan-2245318). https://doi.org/10.1007/978-3-319-46179-3_5
- Masmoudi-Soussi, A., Hammas-Nasri, I., Horchani-Naifer, K., & Férid, M. (2020). Rare earths recovery by fractional precipitation from a sulfuric leach liquor obtained after phosphogypsum processing. *Hydrometallurgy*, 191, 105253. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105253>
- Massé, P. (2021). Des instruments (insuffisants) pour gouverner les critiques adressées au «renouveau minier» en France métropolitaine. Une articulation autour des référentiels de l'environnement et du territoire. *Revue Gouvernance / Governance Review*, 18(2), 110-135. <https://doi.org/10.7202/1082504ar>

- Mathur, J. N., & Khopkar, P. K. (1988). USE OF CROWN ETHERS AS SYNERGISTS IN THE SOLVENT EXTRACTION of TRIVALENT ACTINIDES AND LANTHANIDES BY 1—PHENYL—3—METHYL—4 TRIFLUOROACETYL PYRAZOLONE—5. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 6(1), 111-124. <https://doi.org/10.1080/07366298808917926>
- 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(5), 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. *Resources-Basel*, 6(3), 1-28. (rayyan-2245391). <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(10), 1-24. (rayyan-2244572). <https://doi.org/10.3390/min8100455>
- Mehennaoui, K., Felten, V., Caillet, C., & Giamberini, L. (2024). Acute and chronic toxicity of rare earth elements-enriched sediments from a prospective mining area[]: Effects on life history traits, behavioural and physiological responses of gammarus fossarum (crustacea amphipoda). *Chemosphere*, 364, 143117. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143117>
- Menendez, A., James, R. H., Roberts, S., Peel, K., & Connelly, D. (2017). Controls on the distribution of rare earth elements in deep-sea sediments in the north Atlantic Ocean. *Ore Geology Reviews*, 87, 100-113. (rayyan-2245325). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.036>
- 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(5), 1-31. (rayyan-2245257). <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. *Minerals Engineering*, 189, 1-11. (rayyan-2244289). <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. *Science of The Total Environment*, 898, 165417. <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? *Geology Today*, 39(6), 225-230. (rayyan-2243950). <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. *Economy And Society*, 50(4), 590-617. <https://doi.org/10.1080/03085147.2021.1903772>
- Merroune, A., Ait Brahim, J., Berrada, M., Essakhraoui, M., Achiou, B., Mazouz, H., & Beniazza, R. (2024). A comprehensive review on solvent extraction technologies of rare earth elements from different acidic media: Current challenges and future perspectives. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 139, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.04.042>
- Middleton, M., Torppa, J., Wali, P. R., & Sutinen, R. (2018). Biogeochemical anomaly response of circumboreal shrubs and juniper to the juomasuo hydrothermal Au-Co deposit in northern Finland. *Applied Geochemistry*, 98, 141-151. (rayyan-2244553). <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.09.006>
- 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. *Frontiers in Marine Science*, 8, 1-7. (rayyan-1279579885). <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.706161>
- Mishra, B., & Anderson, A. (s. d.). *Extraction and recovery of rare earth metals: Challenges in processing*. 1-8.
- Mishra, S. L., Singh, H., & Gupta, C. K. (2000). Simultaneous purification of dysprosium and terbium from dysprosium concentrate using 2-ethyl hexyl phosphonic acid mono-2-ethyl hexyl ester as an extractant. *Hydrometallurgy*, 56(1), 33-40. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00064-5)
- Mohwinkel, D., Kleint, C., & Koschinsky, A. (2014). Phase associations and potential selective extraction methods for selected high-tech metals from ferromanganese nodules and crusts with

- siderophores. *Applied Geochemistry*, 43, 13-21. (rayyan-2245567).
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.01.010>
- Moldoveanu, G. A., & Papangelakis, V. G. (2013). Recovery of rare earth elements adsorbed on clay minerals: II. Leaching with ammonium sulfate. *Hydrometallurgy*, 131-132, 158-166.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.10.011>
- Moldoveanu, G. A., & Papangelakis, V. G. (2016). An overview of rare-earth recovery by ion-exchange leaching from ion-adsorption clays of various origins. *Mineralogical Magazine*, 80(1), 63-76. (rayyan-2245417). <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.051>
- Mongelli, G., Paternoster, M., Rizzo, G., & Sinisi, R. (2014). Trace elements and REE fractionation in subsoils developed on sedimentary and volcanic rocks: Case study of the Mt. Vulture area, southern Italy. *International Journal of Earth Sciences*, 103(4), 1125-1140. (rayyan-2244780).
<https://doi.org/10.1007/s00531-014-1003-z>
- Morf, L. S., Gloor, R., Haag, O., Haupt, M., Skutan, S., Fabian Di Lorenzo, & Böni, D. (2013). Precious metals and rare earth elements in municipal solid waste — sources and fate in a swiss incineration plant. *Waste Management*, 1-11. (rayyan-726049885).
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.010>
- Moustafa, M. I., & Abdelfattah, N. A. (2010). Physical and chemical beneficiation of the egyptian beach monazite. *Resource Geology*, 60(3), 288-299. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2010.00131.x>
- Mueller, S., Meima, J. A., & Rammelmair, D. (2021). Detecting REE-rich areas in heterogeneous drill cores from storkwitz using LIBS and a combination of k-means clustering and spatial raster analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 221, 1-16. (rayyan-2244399).
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106697>
- Mukaba, J.-L., Chuks Paul Eze, Pereao, O., & Leslie Felicia Petrik. (2021). Rare earths' recovery from phosphogypsum: An overview on direct and indirect leaching techniques. *Minerals*. (rayyan-10656631). <https://doi.org/10.3390/min11101051>
- Murrey, A., & Jackson, N. A. (2020). A decolonial critique of the racialized “localwashing” of extraction in central africa. *Annals of the American Association of Geographers*, 110(3), 917-940.
<https://doi.org/10.1080/24694452.2019.1638752>

- Nakamura, E., Hiruta, Y., Watanabe, T., Iwasawa, N., Citterio, D., & Suzuki, K. (2015). A fluorous biphasic solvent extraction system for lanthanides with a fluorophilic β -diketone type extractant. *Analytical Sciences*, 31(9), 923-928. <https://doi.org/10.2116/analsci.31.923>
- Nash, K. L. (1993). A REVIEW OF THE BASIC CHEMISTRY AND RECENT DEVELOPMENTS IN TRIVALENT f-ELEMENTS SEPARATIONS. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 11(4), 729-768. <https://doi.org/10.1080/07366299308918184>
- Nassar, N. T., Graedel, T. E., & Harper, E. M. (2015). By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science Advances*, 1(3), e1400180. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400180>
- Neave, D. A., Black, M., Riley, T. R., Gibson, S. A., Ferrier, G., Wall, F., & Broom-Fendley, S. (2016). On the feasibility of imaging carbonatite-hosted rare earth element deposits using remote sensing. *Economic Geology*, 111(3), 641-665. (rayyan-2244674). <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.3.641>
- Niu, B., Shanshan, E., Wang, X., Xu, Z., & Qin, Y. (2024). Intelligent leaching rare earth elements from waste fluorescent lamps. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1-9. (rayyan-726049556). <https://doi.org/10.1073/pnas.2308502120>
- Noriega, R., & Pourrahimian, Y. (2022). A systematic review of artificial intelligence and data-driven approaches in strategic open-pit mine planning. *Resources Policy*, 77, 102727. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102727>
- Nykanen, J., Laajoki, K., & Karhu, J. (1997). Geology and geochemistry of the early proterozoic kortejarvi and laivajoki carbonatites, central fennoscandian shield, finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 69(1), 5-30. (rayyan-24596876). <https://doi.org/10.17741/bgsf/69.1-2.001>
- 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. *Australian Journal of Earth Sciences*, 55(1), 25-38. (rayyan-2244885). <https://doi.org/10.1080/08120090701581372>
- O'Brien, H. (2015). Introduction to Carbonatite Deposits of Finland. In *Mineral Deposits of Finland* (p. 291-303). (rayyan-2244747). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-410438-9.00011-x>

- Ochsenkühn-Petropulu, M., Th. Lyberopulu, Ochsenkühn, K. M., & Parissakis, G. (1996). Recovery of lanthanides and yttrium from red mud by selective leaching. *Analytica Chimica Acta*, 319(1), 249-254. (rayyan-2245813). [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(95\)00486-6](https://doi.org/10.1016/0003-2670(95)00486-6)
- Orabi, A., El-Sheikh, E., Hassanin, M., El Kady, M., Abdel-Khalek, M., & Mowafy, A. (2018). Extraction of rare earth elements from abu—tartour wet process phosphoric acid using synthesized salicylaldehyde azine. *Minerals Engineering*, 122, 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.037>
- Orabi, A. H., Mohamed, B. T., & Elyan, S. S. (2021). Simultaneous separation of rare earths and valuable actinoid element from wet process phosphoric acid using N-propylpropan-1-amine extractant. *Hydrometallurgy*, 205, 105749. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105749>
- Orcutt, B. N., Bradley, J. A., Brazelton, W. J., Estes, E. R., Goordial, J. M., Huber, J. A., Jones, R. M., Mahmoudi, N., Marlow, J. J., Murdock, S., & Pachiadaki, M. (2020). Impacts of deep-sea mining on microbial ecosystem services. *Limnology and Oceanography*, 65(7), 1489-1510. (rayyan-2244848). <https://doi.org/10.1002/lno.11403>
- Oularé, P. T., Couturier, J., Collin, B., Assidjo, E., Rhazi, L., Causse, L., Zitoune, S., Traoré, S., Yao, K. A., & Levard, C. (2025). A la carte dissolution of rare earth elements from lateritic and karstic bauxite residues at mild pH: toward sustainable extraction processes. *Next Sustainability*, 5, 100066. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100066>
- Padhan, E., Nayak, A. K., & Sarangi, K. (2017). Recovery of neodymium and dysprosium from NdFeB magnet swarf. *Hydrometallurgy*, 1-6. (rayyan-726050425). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.10.015>
- Pak, S.-J., Seo, I., Lee, K.-Y., & Hyeong, K. (2019). Rare earth elements and other critical metals in deep seabed mineral deposits[]: Composition and implications for resource potential. *Minerals*, 9(1), 1-19. (rayyan-1284578443). <https://doi.org/10.3390/min9010003>
- Pan, J., Nie, T., Behzad Vaziri Hassas, Rezaee, M., Wen, Z., & Zhou, C. (2020). Recovery of rare earth elements from coal fly ash by integrated physical separation and acid leaching. *Chemosphere*, 248, 1-9. (rayyan-756951949). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126112>

- Panda, R., Kumari, A., Jha, M. K., Hait, J., Kumar, V., Rajesh Kumar, J., & Lee, J. Y. (2014). Leaching of rare earth metals (REMs) from korean monazite concentrate. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 2035-2042. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.09.028>
- Panda, S., Costa, R. B., Shah, S. S., Mishra, S., Bevilaqua, D., & Akcil, A. (2021). Biotechnological trends and market impact on the recovery of rare earth elements from bauxite residue (red mud) — a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 171, 105645. (rayyan-2244438). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105645>
- Parhi, P. K., Park, K. H., Nam, C. W., & Park, J. T. (2015). Liquid-liquid extraction and separation of total rare earth (RE) metals from polymetallic manganese nodule leaching solution. *Journal of Rare Earths*, 33(2), 207-213. (rayyan-2245514). [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60404-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60404-X)
- Park, S., & Liang, Y. (2019). Bioleaching of trace elements and rare earth elements from coal fly ash. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6(1), 74-83. <https://doi.org/10.1007/s40789-019-0238-5>
- Parsa, M., Lawley, C. J. M., Cumani, R., Schetselaar, E., Harris, J., Lentz, D. R., Zhang, S. E., & Bourdeau, J. E. (2024). Predictive modeling of canadian carbonatite-hosted REE +/- Nb deposits. *Natural Resources Research*, 33(5), 1941-1965. <https://doi.org/10.1007/s11053-024-10369-7>
- 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. *Journal of Industrial Ecology*, 26(6), 2154-2177. (rayyan-1279579739). <https://doi.org/10.1111/jiec.13225>
- Pavez, O., Brandao, P. R. G., & Peres, A. E. C. (1996). Adsorption of oleate and octyl-hydroxamate on to rare-earths minerals. *Minerals Engineering*, 9(3), 357-366. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(96\)00020-9](https://doi.org/10.1016/0892-6875(96)00020-9)
- Pavez, O., & Peres, A. E. C. (1993). Effect of sodium metasilicate and sodium sulphide on the floatability of monazite-zircon-rutile with oleate and hydroxamates. *Minerals Engineering*, 6(1), 69-78. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(93\)90164-I](https://doi.org/10.1016/0892-6875(93)90164-I)
- Pavez, O., & Peres, A. E. C. (1994). Technical note bench scale flotation of a brazilian monazite ore. *Minerals Engineering*, 7(12), 1561-1564. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(94\)90047-7](https://doi.org/10.1016/0892-6875(94)90047-7)

- Pavithran, R., Luxmi Varma, R., & Reddy, M. L. P. (2003). Synergistic solvent extraction of trivalent lanthanoids with mixtures of 1-phenyl-3-methyl-4-pivaloyl-5-pyrazolone and crown ethers. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 21(6), 797-813. <https://doi.org/10.1081/SEI-120025924>
- Pecoraro, A., Lily, H., & Singh, P. (2024). The international seabed authority and the push for exploitation of deep seabed minerals[]: Does the doctrine of legitimate expectations apply? *The Journal of World Investment & Trade*, 25(5-6), 698-741. <https://doi.org/10.1163/22119000-12340344>
- Pedro Paulo Da Costa Alves Filho, Wendel Valter Da Silveira Pereira, Yan Nunes Dias, Adriele Laena Ferreira De Moraes, Flavio Henrique Santos Rodrigues, Silvio Junio Ramos, Edna Santos De Souza, Anna Maria Fontes Do Amaral, & Antonio Rodrigues Fernandes. (2024). Artisanal mining of monazite and cassiterite in the Amazon[]: Potential risks of rare earth elements for the environment and human health. *Environmental Management*, 1-29. (rayyan-1279579473). <https://doi.org/10.1007/s00267-024-01964-8>
- Peelman, S., Sun, Z. h. i., Sietsma, J., & Yang, Y. (2016). Hydrometallurgical Extraction of Rare Earth Elements From Low Grade Mine Tailings. In *Rare Metal Technology 2016* (p. 17-29). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119274834.ch2>
- Peet, R., & Watts, M. (Éds.). (2010). *Liberation ecologies[]: Environment, development, social movements* (2. ed., digital print). Routledge.
- Peiravi, M., Ackah, L., Guru, R., Mohanty, M., Liu, J., Xu, B., Zhu, X., & Chen, L. (2017). Chemical extraction of rare earth elements from coal ash. *Minerals and Metallurgical Processing*, 34(4), 170-177. <https://doi.org/10.19150/mmp.7856>
- 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. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38(1), 1-26. (rayyan-2244319). <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00307-5>
- Percival, J. B., Bosman, S. A., Potter, E. G., Peter, J. M., Laudadio, A. B., Abraham, A. C., Shiley, D. A., & Sherry, C. (2018). Customized spectral libraries for effective mineral exploration[]: Mining national mineral collections. *Clays and Clay Minerals*, 66(3), 297-314. (rayyan-2244555). <https://doi.org/10.1346/ccmn.2018.064103>

- Pereira, C. A., & Peres, A. E. C. (1997). Flotation concentration of a xenotime pre-concentrate. *Minerals Engineering*, 10(11), 1291-1295. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(97\)00115-5](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(97)00115-5)
- Petterson, M. G., & Tawake, A. (2019). The Cook Islands (south pacific) experience in governance of seabed manganese nodule mining. *Ocean and Coastal Management*, 167, 271-287. (rayyan-1284422365). <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.09.010>
- Pourret, O., & Tuduri, J. (2017). Continental shelves as potential resource of rare earth elements. *Scientific Reports*, 7(1), 5857. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06380-z>
- Power, G., Gräfe, M., & Klauber, C. (2011). Bauxite residue issues[]: I. Current management, disposal and storage practices. *Hydrometallurgy*, 108(1-2), 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.02.006>
- Pradip, & Fuerstenau, D. W. (1991). The role of inorganic and organic reagents in the flotation separation of rare-earth ores. *International Journal of Mineral Processing*, 32(1), 1-22. (rayyan-2245836). [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(91\)90016-c](https://doi.org/10.1016/0301-7516(91)90016-c)
- Preez, A. C. D., & S Preston, J. (1992). The solvent extraction of rare-earth metals by carboxylic acids. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 10(2), 207-230. <https://doi.org/10.1080/07366299208918101>
- Presley, J. (2024). Exploring the unexpected[]: An AI model uncovers rare earth elements. *Journal of Petroleum Technology*, 76(1), 40-45. <https://doi.org/10.2118/0124-0040-JPT>
- Preston, J. S. (1994). Solvent extraction of the trivalent lanthanides and yttrium by some 2-bromoalkanoic acids. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 12(1), 29-54. <https://doi.org/10.1080/07366299408918198>
- Preston, J. S., Cole, P. M., Craig, W. M., & Feather, A. M. (1996). The recovery of rare earth oxides from a phosphoric acid by-product. Part 1[]: Leaching of rare earth values and recovery of a mixed rare earth oxide by solvent extraction. *Hydrometallurgy*, 41(1), 1-19. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(95\)00051-H](https://doi.org/10.1016/0304-386X(95)00051-H)
- Prno, J., & Scott Slocombe, D. (2012). Exploring the origins of 'social license to operate' in the mining sector[]: Perspectives from governance and sustainability theories. *Resources Policy*, 37(3), 346-357. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.04.002>

- Qi, J., Liu, G., & Dong, Y. (2020). Probing the hydrophobic mechanism of N -[(3-hydroxyamino)-propoxy]- N -octyl dithiocarbamate toward bastnaesite flotation by in situ AFM, FTIR and XPS. *Journal of Colloid and Interface Science*, 572, 179-189. (rayyan-2244991). <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.03.080>
- Qu, Y. & Bin Lian. (2013). Bioleaching of rare earth and radioactive elements from red mud using penicillium tricolor RM-10. *Bioresource Technology*, 136, 16-23. (rayyan-2245589). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.070>
- Qu, Y., Li, H., Tian, W., Wang, X., Wang, X., Jia, X., Shi, B., Song, G., & Tang, Y. (2015). Leaching of valuable metals from red mud via batch and continuous processes by using fungi. *Minerals Engineering*, 81, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.07.022>
- Qu, Y., Li, H., Wang, X., Tian, W., Shi, B., Yao, M., & Zhang, Y. (2019). Bioleaching of major, rare earth, and radioactive elements from red mud by using indigenous chemoheterotrophic bacterium acetobacter sp. *Minerals*, 9(2), 1-13. (rayyan-2245098). <https://doi.org/10.3390/min9020067>
- Quijada-Maldonado, E., & Romero, J. (2021). Solvent extraction of rare-earth elements with ionic liquids[]: Toward a selective and sustainable extraction of these valuable elements. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 27, 100428. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100428>
- R Chi, Z Li, C Peng, H Gao, & Z Xu. (2006). Preparation of enriched cerium oxide from bastnasite with hydrochloric acid by two-step leaching. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B-PROCESS METALLURGY AND MATERIALS PROCESSING SCIENCE*. <https://doi.org/10.1007/s11661-006-1068-9>
- Rabbani, M., Taqi Rabbani, M., Muthoni, F., Sun, Y., & Vahidi, E. (2024). Advancing phytomining[]: Harnessing plant potential for sustainable rare earth element extraction. *Bioresource Technology*, 401, 130751. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130751>
- Rabie, K. A. (2007). A group separation and purification of Sm, Eu and Gd from egyptian beach monazite mineral using solvent extraction. *Hydrometallurgy*, 85(2-4), 81-86. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.12.012>

- Rachel A Mills, Deborah M Wells, & Stephen Roberts. (2001). Genesis of ferromanganese crusts from the TAG hydrothermal field. *Chemical Geology*, 176(1), 283-293. (rayyan-2245941). [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(00\)00404-6](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(00)00404-6)
- Radhika, S., Kumar, B. N., Kantam, M. L., & Reddy, B. R. (2010). Liquid—liquid extraction and separation possibilities of heavy and light rare-earths from phosphoric acid solutions with acidic organophosphorus reagents. *Separation and Purification Technology*, 75(3), 295-302. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.08.018>
- Ratthanapra, D., & Suwanmanee, U. (2019). Life cycle assessment of separation methods of cerium oxide from monazite ore. *Chemical Engineering Transactions*, 1-6. (rayyan-10656636). <https://doi.org/10.3303/CET1974152>
- Reddy, B. R., & Kumar, J. R. (2016). Rare earths extraction, separation, and recovery from phosphoric acid media. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 34(3), 226-240. <https://doi.org/10.1080/07366299.2016.1169144>
- Reddy, B. R., Radhika, S., & Kumar, B. N. (2010). Liquid-liquid extraction studies of trivalent yttrium from phosphoric acid solutions using TOPS 99 as an extractant. *Separation Science and Technology*, 45(10), 1426-1432. <https://doi.org/10.1080/01496391003730365>
- Reddy, M. L. P., Prasada Rao, T., & Damodaran, A. D. (1993). Liquid-liquid extraction processes for the separation and purification of rare earths. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 12(2-4), 91-113. <https://doi.org/10.1080/08827509508935254>
- Reedy, R. C., Scanlon, B. R., Bagdonas, D. A., Hower, J. C., James, D., Kyle, J. R., & Uhlman, K. (2024). Coal ash resources and potential for rare earth element production in the United States. *International Journal of Coal Science & Technology*, 11(1), 74-84. <https://doi.org/10.1007/s40789-024-00710-z>
- Reid, S., Tam, J., Yang, M., & Azimi, G. (2017). Technospheric mining of rare earth elements from bauxite residue (red mud)[]: Process optimization, kinetic investigation, and microwave pretreatment. *Scientific Reports*, 7(1), 15252. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15457-8>

- Ren, J., Song, S., Lopez-Valdivieso, A., & Lu, S. (2000). Selective flotation of bastnaesite from monazite in rare earth concentrates using potassium alum as depressant. *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 237-245. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00075-7](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00075-7)
- Reveco, R. P. (2022). Legal-economic incentives for mining and local processing of rare earths; [Incentivos juridico-economicos a la mineria y procesamiento local de tierras raras]. *Revista De Derecho Ambiental(Chile)*, 1(17), 129-156-156. (rayyan-1284031296). <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2022.66408>
- Rey, J., Atak, S., Dourdain, S., Arrachart, G., Berthon, L., & Pellet-Rostaing, S. (2017). Synergistic extraction of rare earth elements from phosphoric acid medium using a mixture of surfactant AOT and DEHCNPB. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 1-12. (rayyan-726049533). <https://doi.org/10.1080/07366299.2017.1362852>
- Rivera, R. M., Xakalashe, B., Ounoughene, G., Binnemans, K., Friedrich, B., & Van Gerven, T. (2019). Selective rare earth element extraction using high-pressure acid leaching of slags arising from the smelting of bauxite residue. *Hydrometallurgy*, 184, 162-174. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.01.005>
- 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. *The Extractive Industries and Society*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101213>
- Rodrigues, M., & Mendes, L. (2018). Mapping of the literature on social responsibility in the mining industry[]: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 181, 88-101. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.163>
- Romero-Freire, A., Turlin, F., André-Mayer, A.-S., Pelletier, M., Cayer, A., & Giamberini, L. (2019). Biogeochemical cycle of lanthanides in a light rare earth element-enriched geological area (quebec, canada). *Minerals*, 9(10), 573-589. <https://doi.org/10.3390/min9100573>
- 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.

- Journal of Cleaner Production*, 407. (rayyan-17587539).
<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 Geology Reviews*, 19(1), 1-22. (rayyan-2244921). [https://doi.org/10.1016/s0169-1368\(01\)00037-3](https://doi.org/10.1016/s0169-1368(01)00037-3)
- Rybak, A., & Rybak, A. (2021). Characteristics of some selected methods of rare earth elements recovery from coal fly ashes. *Metals*, 1-28. (rayyan-743350809). <https://doi.org/10.3390/met11010142>
- Rychkov, V. N., Kirillov, E. V., Kirillov, S. V., Semenishchev, V. S., Bunkov, G. M., Botalov, M. S., Smyshlyaev, D. V., & Malyshev, A. S. (2018). Recovery of rare earth elements from phosphogypsum. *Journal of Cleaner Production*, 196, 674-681. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.114>
- Sadeghi, M., Arvanitidis, N., & Ladenberger, A. (2020). Geochemistry of rare earth elements in bedrock and till, applied in the context of mineral potential in Sweden. *Minerals*, 10(4), 1-23. (rayyan-2244502). <https://doi.org/10.3390/min10040365>
- Sadri, F., Amir Mohammad Nazari, & Ghahreman, A. (2017). A review on the cracking, baking and leaching processes of rare earth element concentrates. *Journal of Rare Earths*, 35(8), 739-752. (rayyan-2245312). [https://doi.org/10.1016/s1002-0721\(17\)60971-2](https://doi.org/10.1016/s1002-0721(17)60971-2)
- Sahoo, P., & Joseph, J. (2021). Radioactive hazards in utilization of industrial by-products[]: Comprehensive review. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 25(3). (rayyan-2244427). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hz.2153-5515.0000612](https://doi.org/10.1061/(asce)hz.2153-5515.0000612)
- Sajn, R., Alijagic, J., & Ristic, I. (2024). Secondary deposits as a potential REEs source in south-eastern Europe. *Minerals*, 14(2), 1-26. (rayyan-2243882). <https://doi.org/10.3390/min14020120>
- Sakellariadou, F., Gonzalez, F. J., Hein, J. R., Rincon-Tomas, B., Arvanitidis, N., & Kuhn, T. (2022). Seabed mining and blue growth[]: Exploring the potential of marine mineral deposits as a sustainable source of rare earth elements (MaREEs) (IUPAC technical report). *Pure and Applied Chemistry*, 94(3), 329-351. (rayyan-1284578438). <https://doi.org/10.1515/pac-2021-0325>

- Sanematsu, K., Kon, Y., Imai, A., Watanabe, K., & Watanabe, Y. (2013). Geochemical and mineralogical characteristics of ion-adsorption type REE mineralization in Phuket, Thailand. *Mineralium Deposita*, 48(4), 437-451. <https://doi.org/10.1007/s00126-011-0380-5>
- Sanematsu, K., Watanabe, Y., Verplanck, P., & Hitzman, M. (2016). Characteristics and genesis of ion adsorption-type rare earth element deposits. *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits*, 18, 55-79. (rayyan-2244979). <https://doi.org/10.5382/Rev.18.03>
- Santana, I. V., & Botelho, N. F. (2022). REE residence, behaviour and recovery from a weathering profile related to the Serra Dourada granite, Goiás/Tocantins states, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 143, 104751. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104751>
- Santhi, P. B., Reddy*, M. L. P., Ramamohan, T. R., Damodaran, A. D., Mathur, J. N., Murali, M. S., & Iyer, R. H. (1994). Synergistic solvent extraction of trivalent lanthanides and actinide by mixtures of 1-phenyl-3-methyl-4-benzoyl-pyrazolone-5 and neutral oxo-donors. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 12(3), 633-650. <https://doi.org/10.1080/07366299408918229>
- Santos, Ana Claudia, Guedes, A., French, D., Futuro, A., & Valentim, B. (2022). Integrative study assessing space and time variations with emphasis on rare earth element (REE) distribution and their potential on ashes from commercial (Colombian) coal. *Minerals*, 12(2), 1-32. (rayyan-2244188). <https://doi.org/10.3390/min12020194>
- Sarapaa, O., Thair Al Ani, Lahti, S. I., Lauri, L. S., Sarala, P., Torppa, A., & Kontinen, A. (2013). Rare earth exploration potential in Finland. *Journal of Geochemical Exploration*, 133, 25-41. (rayyan-2244794). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.05.003>
- Saratsis, G., Xiroudakis, G., Exadaktylos, G., Papaconstantinou, A., & Lazos, I. (2023). Use of UAV images in 3D modelling of waste material stock-piles in an abandoned mixed sulphide mine in Mathiatis-Cyprus. *Mining*, 3(1), 79-95. (rayyan-2244058). <https://doi.org/10.3390/mining3010005>
- Sarvaramini, A., Azizi, D., & Larachi, F. (2016). Hydroxamic acid interactions with solvated cerium hydroxides in the flotation of monazite and bastnasite-experiments and DFT study. *Applied Surface Science*, 387, 986-995. (rayyan-2245449). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.07.044>
- Sastri, V. S. (Éd.). (2003). *Modern aspects of rare earths and their complexes* (1^{re} éd.). Elsevier.

- Sato, T. (1989). Liquid-liquid extraction of rare-earth elements from aqueous acid solutions by acid organophosphorus compounds. *Hydrometallurgy*, 22(1-2), 121-140. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(89\)90045-5](https://doi.org/10.1016/0304-386X(89)90045-5)
- Satur, J. V., Calabia, B. P., Hoshino, M., Morita, S., Seo, Y., Kon, Y., Takagi, T., Watanabe, Y., Mutele, L., & Foya, S. (2016). Flotation of rare earth minerals from silicate-hematite ore using tall oil fatty acid collector. *Minerals Engineering*, 89, 52-62. (rayyan-2245444). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.01.004>
- Schacht, S., Schutt, C., Strehse, C., & Kosleck, S. (2023). *Minimally invasive vertical deep-sea mining*. (rayyan-2243989). *Oceans Conference Record* (IEEE). <https://doi.org/10.23919/oceans52994.2023.10337374>
- Scholtens, B. (2006). Finance as a driver of corporate social responsibility. *Journal of business ethics*, 19-33.
- Schreiber, A., Marx, J., & Zapp, P. (2021). Life cycle assessment studies of rare earths production-findings from a systematic review. *Science of the Total Environment*, 1-22. (rayyan-1284471577). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148257>
- 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*, 1-22. (rayyan-10656623). <https://doi.org/10.3390/resources5040032>
- Schulze, R., Lartigue-Peyrou, F., Ding, J., Schebek, L., & Buchert, M. (2017). Developing a life cycle inventory for rare earth oxides from ion-adsorption deposits[]: Key impacts and further research needs. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 1-20. (rayyan-1284471586). <https://doi.org/10.1007/s40831-017-0139-z>
- Sengupta, D., Bradley S. Van Gosen, Verplanck, P., & Hitzman, M. (2016). Placer-type rare earth element deposits. *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits*, 18, 81-100. (rayyan-2245032). <https://doi.org/10.5382/Rev.18.04>
- Shahrokhi, A., Tettey-Larbi, L., Akuo-ko, E. O., Tóth-Bodrogi, E., & Kovács, T. (2023). The new conception of radiological sustainability possibilities by reutilization of residues products and building materials. *Sustainability*, 15(13), 10647. <https://doi.org/10.3390/su151310647>

- Shakiba, G., Saneie, R., Abdollahi, H., Ebrahimi, E., Rezaei, A., & Mohammadkhani, M. (2023). Application of deep eutectic solvents (DESs) as a green lixiviant for extraction of rare earth elements from caustic-treated monazite concentrate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 1-13. (rayyan-2243911). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110777>
- Shalchian, H., Hajizadeh Navakh, M., Birloaga, I., Babakhani, A., & Vegliò, F. (2024). A comparison study on the recovery of REEs from red mud by sulfation roasting—water leaching and citric acid leaching. *Minerals*, 14(10), 1-20. <https://doi.org/10.3390/min14101044>
- Shen, L., Zhou, H., Shi, Q., Meng, X., Zhao, Y., Qiu, G., Zhang, X., Yu, H., He, X., He, H., & Zhao, H. (2023). Comparative chemical and non-contact bioleaching of ion-adsorption type rare earth ore using ammonium sulfate and metabolites of *aspergillus niger* and *yarrowia lipolytica* to rationalise the role of organic acids for sustainable processing. *Hydrometallurgy*, 216, 1-11. (rayyan-2243927). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106019>
- Shi, D., Li, W., & Han, Y. (2023). Fluorite flotation separation from bastnaesite via an eco-friendly polymer as a depressant and insight into its mechanism of adsorption. *Journal of Molecular Liquids*, 376, 1-9. (rayyan-2243962). <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121368>
- Shi, S., Pan, J., Dong, B., Zhou, W., & Zhou, C. (2023). Bioleaching of rare earth elements[]: Perspectives from mineral characteristics and microbial species. *Minerals*, 13(9), 1-17. (rayyan-2243918). <https://doi.org/10.3390/min13091186>
- Shirmard, H., Farahbakhsh, E., Müller, R. D., & Chandra, R. (2022). A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration. *Remote Sensing of Environment*, 268, 112750. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112750>
- Shivaramaiah, R., Lee, W., Navrotsky, A., Yu, D., Kim, P., Wu, H., Hu, Z., Riman, R., & Anderko, A. (2016). Location and stability of europium in calcium sulfate and its relevance to rare earth recovery from phosphogypsum waste. *American Mineralogist*, 101(7), 1854-1861. (rayyan-2245459). <https://doi.org/10.2138/am-2016-5684>
- Shuronjit Kumar Sarker, Bruckard, W., Haque, N., Roychand, R., Bhuiyan, M., & Biplob Kumar Pramanik. (2023). Characterization of a carbonatite-derived mining tailing for the assessment of rare earth

- potential. *Process Safety and Environmental Protection*, 1-9. (rayyan-10656682).
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.030>
- Silin, I., Guersel, D., Buechter, C., Weitkaemper, L., & Wotruba, H. (2022). Recovery of catapleiite and eudialyte from non-magnetic fraction of eudialyte ore processing of norra karr deposit. *Minerals*, 12(1), 1-16. (rayyan-2244213). <https://doi.org/10.3390/min12010019>
- Silva, C. M., Lode, S., Aasly, K., & Kowalczyk, P. B. (2023). Early-stage application of process mineralogy methodologies for mineral tracking in flotation of rare earth elements (REE)-bearing minerals from a deposit in Norway. *Minerals Engineering*, 202, 1-9. (rayyan-2243939).
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108268>
- Silva, L., & Sareen, S. (2023). The calm before the storm? The making of a lithium frontier in transitioning portugal. *Extractive Industries and Society*, 15, 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101308>
- Simandl, G. J., & Paradis, S. (2018). Carbonatites[]: Related ore deposits, resources, footprint, and exploration methods. *Applied Earth Science*, 127(4), 123-152.
<https://doi.org/10.1080/25726838.2018.1516935>
- Sinclair, L. K., Baek, D. L., Thompson, J., Tester, J. W., & Fox, R. V. (2017). Rare earth element extraction from pretreated bastnäs site in supercritical carbon dioxide. *Journal of Supercritical Fluids*, 124, 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.01.005>
- Singh, D. K., Kotekar, M. K., & Singh, H. (2008). Development of a solvent extraction process for production of nuclear grade dysprosium oxide from a crude concentrate. *Desalination*, 232(1-3), 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.10.036>
- Singh, D. K., Singh, H., & Mathur, J. N. (2006). Extraction of rare earths and yttrium with high molecular weight carboxylic acids. *Hydrometallurgy*, 81(3-4), 174-181.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.12.002>
- Sjöqvist, A., Cornell, D., Andersen, T., Erambert, M., Ek, M., & Leijd, M. (2013). Three compositional varieties of rare-earth element ore[]: Eudialyte-group minerals from the norra karr alkaline complex, southern Sweden. *Minerals*, 3(1), 94-120. <https://doi.org/10.3390/min3010094>

- Stark, T., Silin, I., & Wotruba, H. (2017). Mineral processing of eudialyte ore from norra karr. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(1), 32-38. (rayyan-2245366). <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0073-5>
- Stepanov, S., Hoa, N., Boyarintseva, E., Boyarintsev, A., Kostikova, G., & Tsivadze, A. (2022). Separation of rare-earth elements from nitrate solutions by solvent extraction using mixtures of methyltri-n-octylammonium nitrate and tri-n-butyl phosphate. *Molecules*, 27(2), 557-570. <https://doi.org/10.3390/molecules27020557>
- Stopic, S., & Friedrich, B. (2021). Advances in understanding of the application of unit operations in metallurgy of rare earth elements. *Metals*, 11(6), 1-20. (rayyan-2244326). <https://doi.org/10.3390/met11060978>
- Stouraiti, C., Angelatou, V., Petushok, S., Soukis, K., & Eliopoulos, D. (2020). Effect of mineralogy on the beneficiation of REE from heavy mineral sands[]: The case of nea peramos, kavala, northern Greece. *Minerals*, 10(5), 1-18. (rayyan-2244833). <https://doi.org/10.3390/min10050387>
- Su, H., Tan, F., & Lin, J. (2020). An integrated approach combines hydrothermal chemical and biological treatment to enhance recycle of rare metals from coal fly ash. *Chemical Engineering Journal*, 395, 124640. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124640>
- Surampally, R., Batchu, N. K., Mannepalli, L. K., & Bontha, R. R. (2012). Studies on solvent extraction of Dy(III) and separation possibilities of rare earths using PC-88A from phosphoric acid solutions. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43(6), 839-844. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2012.04.009>
- Swain, B. (2022). Red mud[]: An environmental challenge but overlooked treasure for critical rare earth metals. *MRS Bulletin*, 47(3), 289-302. (rayyan-1279579824). <https://doi.org/10.1557/s43577-022-00300-x>
- Swain, B., Akcil, A., & Lee, J. (2022). Red mud valorization an industrial waste circular economy challenge; review over processes and their chemistry. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1-52. (rayyan-10656653). <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1829898>
- Swider, S., Lam, S., Motakef, S., Donohoe, E., Coers, L., Taylor, S., & Spencer, S. (2015). Impurity segregation in zone-refined precursors for crystalline halide scintillators. *Nuclear Instruments and*

- Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 784, 5-8. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.11.048>
- Ta, L. H., & Campbell, B. (2023). Environmental protection in Madagascar[]: Biodiversity offsetting in the mining sector as a corporate social responsibility strategy. *Extractive Industries and Society*, 15, 101305.
- Taggart, R. K., Hower, J. C., Dwyer, G. S., & Hsu-Kim, H. (2016). Trends in the rare earth element content of US-based coal combustion fly ashes. *Environmental Science & Technology*, 50(11), 5919-5926. (rayyan-756951964). <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00085>
- Taggart, R. K., Hower, J. C., & Hsu-Kim, H. (2018). Effects of roasting additives and leaching parameters on the extraction of rare earth elements from coal fly ash. *International Journal of Coal Geology*, 196, 106-114. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.06.021>
- Takaya, Y., Yasukawa, K., Kawasaki, T., Fujinaga, K., Ohta, J., Usui, Y., Nakamura, K., Kimura, J.-I., Chang, Q., Hamada, M., Dodbiba, G., Nozaki, T., Iijima, K., Morisawa, T., Kuwahara, T., Ishida, Y., Ichimura, T., Kitazume, M., Fujita, T., & Kato, Y. (2018). The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements. *Scientific Reports*, 8, 1-8. (rayyan-2245301). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23948-5>
- Tamm, K., Zeinab Arab Zadeh, Kuusik, R., Kallas, J., Yang, J., Tonsuaadu, K., & Trikkel, A. (2021). Effect of flotation time and collector dosage on estonian phosphorite beneficiation. *Minerals*, 11(2), 1-18. (rayyan-2244455). <https://doi.org/10.3390/min11020114>
- Tayar, S. P., Palmieri, M. C., & Bevilaqua, D. (2022). Sulfuric acid bioproduction and its application in rare earth extraction from phosphogypsum. *Minerals Engineering*, 185, 107662. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107662>
- 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(5), 286-298. <https://doi.org/10.3390/min9050286>
- Tayibi, H., Choura, M., López, F. A., Alguacil, F. J., & López-Delgado, A. (2009). Environmental impact and management of phosphogypsum. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2377-2386. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.03.007>

- Thakur, N. V. (2000a). Separation of dysprosium and yttrium from yttrium concentrate using alkylphosphoric acid (DEHPA) and alkylphosphonic acid (EHEHPA PC 88A) as extractants. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 18(5), 853-875. <https://doi.org/10.1080/07366290008934711>
- Thakur, N. V. (2000b). Separation of rare earths by solvent extraction. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 21(1-5), 277-306. <https://doi.org/10.1080/08827500008914171>
- Thomas, G., Sheridan, C., & Holm, P. E. (2024). Co-cropping vetiver grass and legume for the phytoremediation of an acid mine drainage (AMD) impacted soil. *Environmental Pollution*, 341, 1-12. (rayyan-2243844). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122873>
- Thompson, V. S., Gupta, M., Jin, H., Vahidi, E., Yim, M., Jindra, M. A., Nguyen, V., Fujita, Y., Sutherland, J. W., Jiao, Y., & Reed, D. W. (2018). Techno-economic and Life Cycle Analysis for Bioleaching Rare-Earth Elements from Waste Materials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(2), 1602-1609. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02771>
- Tian, M., Jia, Q., & Liao, W. (2013). Studies on synergistic solvent extraction of rare earth elements from nitrate medium by mixtures of 8-hydroxyquinoline with cyanex 301 or cyanex 302. *Journal of Rare Earths*, 31(6), 604-608. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(12\)60328-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(12)60328-7)
- Toro, N., Galvez, E., Saldana, M., & Jeldres, R. I. (2022). Submarine mineral resources[]: A potential solution to political conflicts and global warming. *Minerals Engineering*, 179. (rayyan-2244292). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107441>
- Tröster, B., Papatheophilou, S., & Küblböck, K. (2024). *In search of critical raw materials[]: What will the EU critical raw materials act achieve? An analysis of legal and factual implications of the CRMA*. Austrian Foundation for Development Research. <https://doi.org/10.60637/2024-RR18>
- Tuduri, J., Pourret, O., Gloaguen, E., Lach, P., Janots, E., Colin, S., Gouin, J., Chevillard, M., & Bailly, L. (2023). Formation of authigenic grey monazite[]: A palaeo-thermal anomaly marker in very-low grade metamorphic rocks? *Ore Geology Reviews*, 160, 105583. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105583>
- Ueda, Y., Kikuchi, K., Tokunaga, K., Sugita, T., Aoyagi, N., Tanaka, K., & Okamura, H. (2021). A fluorine phosphate for the effective extraction of Ln^{III} from nitrate media[]: Comparison with a

- conventional organic phosphate. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 39(5-6), 491-511. <https://doi.org/10.1080/07366299.2021.1874115>
- Ujaczki, E., Feigl, V., Molnar, M., Cusack, P., Curtin, T., Courtney, R., O'Donoghue, L., Davris, P., Hugl, C., Evangelou, M. W. H., Balomenos, E., & Lenz, M. (2018). Re-using bauxite residues[]: Benefits beyond (critical raw) material recovery. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 93(9), 2498-2510-2510. (rayyan-1284578472). <https://doi.org/10.1002/jctb.5687>
- Ujaczki, É., Zimmermann, Y. S., Gasser, C. A., Molnár, M., Feigl, V., & Lenz, M. (2017). Red mud as secondary source for critical raw materials — extraction study. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 92(11), 2835-2844. <https://doi.org/10.1002/jctb.5300>
- Ulrich, M., Cathelineau, M., Muñoz, M., Boiron, M.-C., Teitler, Y., & Karpoff, A. M. (2019). The relative distribution of critical (Sc, REE) and transition metals (Ni, Co, Cr, Mn, V) in some Ni-laterite deposits of New Caledonia. *Journal of Geochemical Exploration*, 197, 93-113. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.11.017>
- Urbanski, T. S., Fornari, P., & Abbruzzese, C. (1996). The extraction of cerium (III) and lanthanum (III) from chloride solutions with LIX 54. *Hydrometallurgy*, 40(1-2), 169-179. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(94\)00082-E](https://doi.org/10.1016/0304-386X(94)00082-E)
- Vahidi, E., & Zhao, F. (2016). Life cycle analysis for solvent extraction of rare earth elements from aqueous solutions. *REWAS 2016: Towards Materials Resource Sustainability*, 1-8. (rayyan-10656741). https://doi.org/10.1007/978-3-319-48768-7_17
- 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? *Environmental Science & Technology*, 49(8), 4773-4780. <https://doi.org/10.1021/es506031u>
- Velasquez, G., Carrizo, D., Salvi, S., Vela, I., Pablo, M., & Perez, A. (2020). Tracking cobalt, REE and gold from a porphyry-type deposit by LA-ICP-MS: a geological approach towards metal-selective mining in tailings. *Minerals*, 1-17. (rayyan-10656633). <https://doi.org/10.3390/min10020109>

- Vera, M., Schippers, A., Hedrich, S., & Sand, W. (2022). Progress in bioleaching: Fundamentals and mechanisms of microbial metal sulfide oxidation — part a. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(21), 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 I Praksis*, 8(1), 41-51. (rayyan-1279580490). <https://doi.org/10.5324/eip.v8i1.1802>
- Vidal, O. (2018). *Matières premières et énergie, les enjeux de demain*. 1-35.
- Vilakazi, A. Q., Ndlovu, S., Chipise, L., & Shemi, A. (2022). The recycling of coal fly ash: A review on sustainable developments and economic considerations. *Sustainability*, 14(4), 1-32. (rayyan-756951940). <https://doi.org/10.3390/su14041958>
- Villanova-de-Benavent, C., Proenza, J. A., Torro, L., Aiglsperger, T., Domenech, C., Dominguez-Carretero, D., Llovet, X., Suner, P., Ramirez, A., & Rodriguez, J. (2023). REE ultra-rich karst bauxite deposits in the pedernales peninsula, dominican republic: Mineralogy of REE phosphates and carbonates. *Ore Geology Reviews*, 157, 1-16. (rayyan-17587587). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105422>
- Vind, J., Malfliet, A., Blanpain, B., Tsakiridis, P. E., Tkaczyk, A. H., Vassiliadou, V., & Panias, D. (2018). Rare earth element phases in bauxite residue. *Minerals*, 8(2), 1-32. <https://doi.org/10.3390/min8020077>
- Virginie Tassin Campanella. (2024). *ROUTLEDGE HANDBOOK OF SEABED MINING AND THE LAW OF THE SEA*. (rayyan-1279579526). <https://doi.org/10.4324/9780429426162>
- Virolainen, S., Repo, E., & Sainio, T. (2019). Recovering rare earth elements from phosphogypsum using a resin-in-leach process: Selection of resin, leaching agent, and eluent. *Hydrometallurgy*, 189, 1-10. (rayyan-2245171). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105125>
- Wall, F., Rollat, A., & Pell, R. S. (2017). Responsible sourcing of critical metals. *Elements*, 1-6. (rayyan-726049278). <https://doi.org/10.2138/gselements.13.5.313>
- Wan, C., Zhou, D., & Xue, B. (2022). LCA-based carbon footprint accounting of mixed rare earth oxides production from ionic rare earths. *Processes*, 1-10. (rayyan-1284471571). <https://doi.org/10.3390/pr10071354>

- Wang, H., Wang, X., Li, G., Ye, H., Zhang, C., & Zhou, L. (2023). Weakening of mechanical parameters of ion-absorbed rare-earth ores subjected to leaching. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. (rayyan-10656784). <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00661-w>
- Wang, J., Cheng, Z., Hu, Y., Cao, Y., Wang, P., & Cao, Z. (2021). Depression behavior and mechanism of sodium silicate on bastnaesite and parisite flotation. *Colloids and Surfaces, A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 631, 1-9. (rayyan-2244450). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127691>
- Wang, K., & Luo, G. (2017). Microflow extraction[]: A review of recent development. *Chemical Engineering Science*, 169, 18-33. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.10.025>
- Wang, L., Huang, X., Yu, Y., Zhao, L., Wang, C., Feng, Z., Cui, D., & Long, Z. (2017). Towards cleaner production of rare earth elements from bastnaesite in China. *Journal of Cleaner Production*, 165, 231-242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.107>
- Wang, L., Long, Z., Huang, X., Yu, Y., Cui, D., & Zhang, G. (2010). Recovery of rare earths from wet-process phosphoric acid. *Hydrometallurgy*, 101(1-2), 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.11.017>
- Wang, Y. G., Yue, S. T., Li, D. Q., Jin, M. J., & Li, C. Z. (2002). SOLVENT EXTRACTION OF SCANDIUM(III), YTTRIUM(III), LANTHANIDES(III), AND DIVALENT METAL IONS WITH **SEC**-NONYLPHENOXY ACETIC ACID. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 20(6), 701-716. <https://doi.org/10.1081/SEI-120016074>
- Wang, Y., Huang, C., Li, F., Dong, Y., & Sun, X. (2017). Process for the separation of thorium and rare earth elements from radioactive waste residues using cyanex® 572 as a new extractant. *Hydrometallurgy*, 169, 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.01.005>
- Wang, Y., Li, F., Zhao, Z., Dong, Y., & Sun, X. (2015). The novel extraction process based on CYANEX® 572 for separating heavy rare earths from ion-adsorbed deposit. *Separation and Purification Technology*, 151, 303-308. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.07.063>
- Wang, Y., Wang, G., Sun, M., Liang, X., He, H., Zhu, J., & Takahashi, Y. (2022). Environmental risk assessment of the potential « chemical time bomb » of ion-adsorption type rare earth elements

- in urban areas. *Science of the Total Environment*, 822, 1-10. (rayyan-17587626).
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153305>
- Wang, Z., Wu, H., Xu, Y., Shu, K., Fang, S., & Xu, L. (2020). The effect of dissolved calcite species on the flotation of bastnaesite using sodium oleate. *Minerals Engineering*, 145, 1-8. (rayyan-2245026).
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106095>
- Wang, Z., Wu, H., Xu, Y., Shu, K., Yang, J., Luo, L., & Xu, L. (2020). Effect of dissolved fluorite and barite species on the flotation and adsorption behavior of bastnaesite. *Separation and Purification Technology*, 237, 1-12. (rayyan-2244832). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116387>
- Wang, Z., Wu, H., Yang, J., Tang, Z., Luo, L., Shu, K., Xu, Y., & Xu, L. (2020). Selective flotation separation of bastnaesite from calcite using xanthan gum as a depressant. *Applied Surface Science*, 512, 1-9. (rayyan-2245011). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145714>
- Wen Qi, G. (1993). Use of the QEM*SEM analysis in flotation testwork on a phosphate ore containing monazite. *International Journal of Mineral Processing*, 37(1-2), 89-108.
[https://doi.org/10.1016/0301-7516\(93\)90007-W](https://doi.org/10.1016/0301-7516(93)90007-W)
- Wendel Valter Da Silveira Pereira, Silvio Junio Ramos, Leonidas Carrijo Azevedo Melo, Yan Nunes Dias, Gabriel Caixeta Martins, Luana Cristina Goncalves Ferreira, & Antonio Rodrigues Fernandes. (2023). Human and environmental exposure to rare earth elements in gold mining areas in the northeastern Amazon. *Chemosphere*, 340. (rayyan-17587556).
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139824>
- Weng, Z., Haque, N., Mudd, G. M., & Jowitt, S. M. (2016). Assessing the energy requirements and global warming potential of the production of rare earth elements. *Journal of Cleaner Production*, 139, 1282-1297. (rayyan-1284578439). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.132>
- Werker, J., Wulf, C., Zapp, P., Schreiber, A., & Marx, J. (2019). Social LCA for rare earth NdFeB permanent magnets. *Sustainable Production and Consumption*, 19, 257-269-269. (rayyan-1251265414). <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.07.006>
- Weszkalnys, G. (2014). Anticipating oil[]: The temporal politics of a disaster yet to come. *Sociological Review*, 62(1_suppl), 211-235. <https://doi.org/10.1111/1467-954X.12130>

- Wiche, O., Zertani, V., Hentschel, W., Achtziger, R., & Midula, P. (2017). Germanium and rare earth elements in topsoil and soil-grown plants on different land use types in the mining area of freiberg (germany). *Journal of Geochemical Exploration*, 175, 120-129. (rayyan-2245342). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.01.008>
- Wilfert, P., Kumar, P. S., Korving, L., Witkamp, G.-J., & Van Loosdrecht, M. C. M. (2015). The relevance of phosphorus and iron chemistry to the recovery of phosphorus from wastewater[]: A review. *Environmental Science & Technology*, 49(16), 9400-9414. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00150>
- Wu, C. (2008). Bayan obo controversy[]: Carbonatites versus iron oxide-Cu-Au-(REE-U). *Resource Geology*, 58(4), 348-354. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00069.x>
- Wu, F., Wang, D., Rao, Y., Zhang, M., Shi, L., Han, M., & Xu, W. (2023). Mesoscopic process simulation of In situ leaching of ionic rare earth based on NMRI technology. *Adsorption Science & Technology*. (rayyan-10656766). <https://doi.org/10.1155/2023/8348431>
- Wu, S., Wang, L., Zhang, P., El-Shall, H., Moudgil, B., Huang, X., Zhao, L., Zhang, L., & Feng, Z. (2018). Simultaneous recovery of rare earths and uranium from wet process phosphoric acid using solvent extraction with D2EHPA. *Hydrometallurgy*, 175, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.10.025>
- Wu, X., Hu, Y., Sultan Ahmed Khoso, & Cao, Z. (2023). Improve bastnaesite flotation via synergistic effect of octyl hydroxamic acid and octyl phenol ethoxylated surfactants. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. (rayyan-2243973). <https://doi.org/10.1080/08827508.2023.2222883>
- Wu, Z., Chen, Y., Wang, Y., Xu, Y., Lin, Z., Liang, X., & Cheng, H. (2023). Review of rare earth element (REE) adsorption on and desorption from clay minerals[]: Application to formation and mining of ion-adsorption REE deposits. *Ore Geology Reviews*, 157, 1-12. (rayyan-2244025). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105446>
- Wulf, C., Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., & Schloer, H. (2017). Lessons learned from a life cycle sustainability assessment of rare earth permanent magnets. *Journal of Industrial Ecology*, 21(6), 1578-1590-1590. (rayyan-1251263850). <https://doi.org/10.1111/jiec.12575>

- Xiao, Y.-F., Feng, Z.-Y., Hu, G.-H., Huang, L., Huang, X.-W., Chen, Y.-Y., & Li, M.-L. (2015). Leaching and mass transfer characteristics of elements from ion-adsorption type rare earth ore. *Rare Metals*, 34(5), 357-365. <https://doi.org/10.1007/s12598-015-0481-x>
- 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. *Journal of Hazardous Materials*, 443, 1-10. (rayyan-2244030). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130253>
- Xie, F., Ting An Zhang, Dreisinger, D., & Doyle, F. (2014). A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. *Minerals Engineering*, 56, 10-28. (rayyan-2245542). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.10.021>
- Xiong, W., Deng, J., Chen, B., Deng, S., & Wei, D. (2018). Flotation-magnetic separation for the beneficiation of rare earth ores. *Minerals Engineering*, 119, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.01.014>
- Xiong, W., Wang, M., Xiao, J., & Chen, D. (2022). Selective adsorption of 2-hydroxy-3-naphthalene hydroxamic acid on the surface of bastnaesite and calcite. *Minerals*, 12(11), 1-15. (rayyan-2244283). <https://doi.org/10.3390/min12111341>
- Xu, C., Kynický, J., Smith, M. P., Kopriva, A., Brtnický, M., Urubek, T., Yang, Y., Zhao, Z., He, C., & Song, W. (2017). Origin of heavy rare earth mineralization in south China. *Nature Communications*, 8(1), 14598. <https://doi.org/10.1038/ncomms14598>
- Xu, D., Shah, Z., Cui, Y., Jin, L., Peng, X., Zhang, H., & Sun, G. (2018). Recovery of rare earths from nitric acid leach solutions of phosphate ores using solvent extraction with a new amide extractant (TODGA). *Hydrometallurgy*, 180, 132-138. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.07.005>
- Xu, H., Zhang, L., Pang, Z., Wang, Z., Li, W., & Deng, J. (2022). The study on extraction behavior of [N1888][P507] and TRPO for heavy rare earths. *Minerals Engineering*, 176, 107339. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107339>

- Xu, Y., Xu, L., Wu, H., Tian, J., Wang, Z., & Gu, X. (2020). The effect of citric acid in the flotation separation of bastnaesite from fluorite and calcite using mixed collectors. *Applied Surface Science*, 529, 1-11. (rayyan-2245025). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147166>
- Xu, Y., Xu, L., Wu, H., Wang, Z., Shu, K., Fang, S., & Zhang, Z. (2020). Flotation and co—adsorption of mixed collectors octanohydroxamic acid/sodium oleate on bastnaesite. *Journal of Alloys and Compounds*, 819, 152948. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152948>
- Yanfei, X., Zongyu, F., Xiaowei, H., Li, H., Yingying, C., Xiangsheng, L., Liangshi, W., & Zhiqi, L. (2016). Recovery of rare earth from the ion-adsorption type rare earths ore[]: II. Compound leaching. *Hydrometallurgy*, 163, 83-90. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.03.016>
- Yang, W. (2008). Regulating electrical and electronic wastes in China. *Review of European Community & International Environmental Law*, 17(3), 335-344-344. (rayyan-1251265641). <https://doi.org/10.1111/j.1467-9388.2008.00608.x>
- Yang, X., Satur, J. V., Sanematsu, K., Laukkanen, J., & Saastamoinen, T. (2015). Beneficiation studies of a complex REE ore. *Minerals Engineering*, 71, 55-64. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.10.005>
- Yang, X., Zhang, Z., Kuang, S., Wei, H., Li, Y., Wu, G., Geng, A., Li, Y., & Liao, W. (2020). Removal of thorium and uranium from leach solutions of ion-adsorption rare earth ores by solvent extraction with cexrant 230. *Hydrometallurgy*, 194, 1-7. (rayyan-2245005). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105343>
- Yang, Z., Wu, W., & Bian, X. (2017). Synthesis of 3-hydroxy-2-naphthyl hydroxamic acid collector[]: Flotation performance and adsorption mechanism on bastnaesite. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(6), 592-597. (rayyan-2245394). <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n6a10>
- Yasukawa, K., Kino, S., Azami, K., Tanaka, E., Mimura, K., Ohta, J., Fujinaga, K., Nakamura, K., & Kato, Y. (2020). Geochemical features of Fe-Mn micronodules in deep-sea sediments of the western north Pacific Ocean[]: Potential for co-product metal extraction from REY-rich mud. *Ore Geology Reviews*, 127, 1-21. (rayyan-2244845). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103805>

- Yates, S., Bergeron, K.-M., Jébrak, M., Angers, P., Lehmann, V., Séguin, C., Durand, S., Meur, P.-Y. L., & Gendron, C. (2016). Indice du risque social¹: Un outil pour mieux saisir les enjeux, risques et opportunités des projets miniers. *Éthique Publique. Revue Internationale D'éthique Sociétale Et Gouvernementale*, (vol. 18, n° 1), 1-40. <https://doi.org/10.4000/ethiquepublique.2417>
- Yu, J.-W., Chung, Y.-J., & Wang, J.-P. (2025). Production of Nd and Nd—Fe alloys from NdCl₃ by calciothermic reduction. *Materials*, 18(5), 971-995. <https://doi.org/10.3390/ma18050971>
- Yu, Z., Wang, M., Wang, L., Zhao, L., Feng, Z., Sun, X., & Huang, X. (2020). Preparation of crystalline mixed rare earth carbonates by Mg(HCO₃)₂ precipitation method. *Journal of Rare Earths*, 38(3), 292-298. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2019.05.006>
- Yuan, H., Hong, W., Zhou, Y., Pu, B., Gong, A., Xu, T., Yang, Q., Li, F., Qiu, L., Zhang, W., & Liu, Y. (2018). Extraction and back-extraction behaviors of 14 rare earth elements from sulfuric acid medium by TODGA. *Journal of Rare Earths*, 36(6), 642-647. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2018.01.011>
- Zang, Z. B., Yi King, L. K., Chu, K., Cheng, W. W., & Cheng, W. W. (1982). Rare earth industry in China. *Hydrometallurgy*, 9(2), 205-210. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(82\)90017-2](https://doi.org/10.1016/0304-386X(82)90017-2)
- Zapp, P., Marx, J., Schreiber, A., Friedrich, B., & Vossenkaul, D. (2018). Comparison of dysprosium production from different resources by life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 1-12. (rayyan-1284578458). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.006>
- Zapp, P., Schreiber, A., Marx, J., & Kuckshinrichs, W. (2022). Environmental impacts of rare earth production. *MRS Bulletin*, 1-9. (rayyan-10656641). <https://doi.org/10.1557/s43577-022-00286-6>
- Zeng, Z., Gao, Y., Liu, C., & Sun, X. (2022). A novel functionalized ionic liquid [DOC4 mim][DEHG] for impurity removal of aluminum in rare earth leaching solution. *Separation and Purification Technology*, 296, 1-8. (rayyan-2244068). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121388>
- 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. *Separation and Purification Technology*, 317, 123901. (rayyan-2243982). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123901>

- Zeng, Z., Yao Ma, Xuebo Yin, David Selby, Fancui Kong, & Shuai Chen. (2015). Factors affecting the rare earth element compositions in massive sulfides from deep-sea hydrothermal systems. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(8), 2679-2693. (rayyan-2245939). <https://doi.org/10.1002/2015gc005812>
- Zglinicki, K., Malek, R., Szamalek, K., & Wolkowicz, S. (2022). Mining waste as a potential additional source of HREE and U for the European green deal: A case study of bangka island (indonesia). *Minerals*, 12(1). (rayyan-1279579796). <https://doi.org/10.3390/min12010044>
- Zhang, D., Chen, H., Nia, Z., Xia, J., Li, E., Fan, X., & Zheng, L. (2020). Extraction of Al and rare earths (Ce, Gd, Sc, Y) from red mud by aerobic and anaerobic bi-stage bioleaching. *Chemical Engineering Journal*, 401, 1-16. (rayyan-2244840). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125914>
- Zhang, D., Chen, H., Xia, J., Nie, Z., Zhang, R.-Y., & Pakostova, E. (2022). Efficient dealkalization of red mud and recovery of valuable metals by a sulfur-oxidizing bacterium. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.973568>
- 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. *Chemical Geology*, 483, 544-557. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.03.023>
- Zhang, M., Gong, Z., Li, J., Pan, Y., Jin, Q., & Huang, C. (2023). REE mineralization related to weathering of the late permian emeishan basalts. *Journal of Geochemical Exploration*, 245, 1-17. (rayyan-17587586). <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2022.107146>
- Zhang, N., Li, H.-X., & Liu, X.-M. (2016). Recovery of scandium from bauxite residue—red mud: A review. *Rare Metals*, 35(12), 887-900. <https://doi.org/10.1007/s12598-016-0805-5>
- Zhang, W., & Honaker, R. (2017). A fundamental study of octanohydroxamic acid adsorption on monazite surfaces. *International Journal of Mineral Processing*, 164, 26-36. (rayyan-2245309). <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.05.006>
- Zhang, X., Du, H., Wang, X., & Miller, J. D. (2013). Surface chemistry considerations in the flotation of rare-earth and other semisoluble salt minerals. *Minerals and Metallurgical Processing*, 30(1), 24-37. (rayyan-2245617). <https://doi.org/10.1007/bf03402338>

- Zhang, Y., & Anderson, C. (2017). A comparison of sodium silicate and ammonium lignosulfonate effects on xenotime and selected gangue mineral microflotation. *Minerals Engineering*, 100, 1-8. (rayyan-2245308). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.10.002>
- Zhang, Z., Allen, L., Podder, P., Free, M. L., & Sarswat, P. K. (2021). Recovery and enhanced upgrading of rare earth elements from coal-based resources[]: Bioleaching and precipitation. *Minerals*, 11(5), 484-499. <https://doi.org/10.3390/min11050484>
- Zhang, Z., Yuansheng Du, Lianfeng Gao, Ying Zhang, Guoyuan Shi, Changshui Liu, Peng Zhang, & Xingkuan Duan. (2012). Enrichment of REEs in polymetallic nodules and crusts and its potential for exploitation. *Journal of Rare Earths*, 30(6), 621-626. (rayyan-2245942). [https://doi.org/10.1016/s1002-0721\(12\)60101-x](https://doi.org/10.1016/s1002-0721(12)60101-x)
- Zhao, L., Wang, L., Shuai, G., Long, Z., Cui, D., & Huang, X. (2018). Thermal decomposition and oxidation of bastnaesite concentrate in inert and oxidative atmosphere. *Journal of Rare Earths*, 36(7), 758-764. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2018.01.008>
- Zhao, Y., Zhao, H., Shen, L., Qiu, G., & Wang, Y. (2024). Study on the role of microbial metabolites in in-situ noncontact bioleaching of ion-adsorption rare earth ore. *Journal of Environmental Management*, 368, 122184. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122184>
- Zheng, D., Gray, N. B., & Stevens, G. W. (1991). Comparison of naphthenic acid, versatic acid and d2ehpa for the separation of rare earths. *Solvent Extraction and Ion Exchange*, 9(1), 85-102. <https://doi.org/10.1080/07366299108918044>
- Zheng, Q., Qian, Y., Zou, D., Wang, Z., Bai, Y., & Dai, H. (2021). Surface mechanism of Fe³⁺ ions on the improvement of fine monazite flotation with octyl hydroxamate as the collector. *Frontiers in Chemistry*, 9, 700347. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.700347>
- Zhou, F., Wang, L., Xu, Z., Liu, Q., & Chi, R. (2014). Interaction of reactive oily bubble in flotation of bastnaesite. *Journal of Rare Earths*, 32(8), 772-778. (rayyan-2245555). [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(14\)60139-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(14)60139-3)
- Zhou, F., Wang, L., Xu, Z., Liu, Q., Deng, M., & Chi, R. (2014). Application of reactive oily bubbles to bastnaesite flotation. *Minerals Engineering*, 64, 139-145. (rayyan-2245543). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.022>

- Zhou, H., Liu, S., Yi, H., Song, S., & Jia, F. (2023). Flotation of bastnaesite by mixed collectors and adsorption mechanism. *Chemical Physics Letters*, 830, 1-10. (rayyan-2243959). <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2023.140793>
- Zhou, R. (Kevin), & Brown, D. (2024). Epistemic justice and critical minerals-towards a planetary just transition. *Extractive Industries and Society*, 18, 1-8. (rayyan-1279579491). <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101463>
- Zhu, G., Chi, R., Shi, W., & Xu, Z. (2003). Chlorination kinetics of fluorine-fixed rare earth concentrate. *Minerals Engineering*, 16(7), 671-674. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00129-8](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00129-8)
- Zhu, Y., Wang, G., & Jun, Y.-S. (2023). Supercritical carbon dioxide/nitrogen/air extraction with multistage stripping enables selective recovery of rare earth elements from coal fly ashes. *RSC Sustainability*, 1(2), 251-260. (rayyan-756951934). <https://doi.org/10.1039/d2su00033d>
- 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(2), 1-32. (rayyan-2244467). <https://doi.org/10.3390/recycling6020038>