



HAL
open science

Lumière sur la géologie des terres rares, pourquoi tant d'attraits ?

Johann Tuduri, Gaétan Lefebvre, Nicolas Charles, Zineb Nabyl, Fabrice Gaillard, Olivier Pourret

► To cite this version:

Johann Tuduri, Gaétan Lefebvre, Nicolas Charles, Zineb Nabyl, Fabrice Gaillard, et al.. Lumière sur la géologie des terres rares, pourquoi tant d'attraits?. 2020. hal-02519409

HAL Id: hal-02519409

<https://hal.science/hal-02519409v1>

Submitted on 26 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Lumière sur la géologie des terres rares, pourquoi tant d'attraits ?

Johann Tuduri^{1,2}, Gaétan Lefebvre¹, Nicolas Charles¹, Zineb Nabyl², Fabrice Gaillard² et Olivier Pourret³

¹BRGM, F-45060 Orléans, France

²ISTO, UMR7327, Université d'Orléans, CNRS, BRGM, F-45071 Orléans, France

³UniLaSalle, F- 60026, Beauvais, France

Introduction

Les terres rares (REE^{*}) constituent un groupe de 17 éléments chimiques métalliques, cohérents en termes de rayon ionique, charge et coordination. Elles comprennent : les lanthanides (de ⁵⁷La à ⁷¹Lu), l'yttrium (³⁹Y) et selon les définitions le scandium (²¹Sc). L'appartenance du Sc à ce groupe fait débat car son comportement dans les environnements géologiques est généralement différent de celui des autres REE. De même, le prométhium (⁶¹Pm) avec sa demi-vie extrêmement courte, est quasi-inexistant dans la nature. Selon les configurations électroniques, les REE peuvent être divisées en deux sous-groupes : les légères (LREE[†] : La-Ce-Pr-Nd-Sm-Eu-Gd) et les lourdes (HREE[‡] : Tb-Dy-Ho-Er-Tm-Yb-Lu-Y). L'appartenance de certaines REE à l'un des deux sous-groupes est sujette à de nombreuses incompréhensions. Il existe une classification propre à l'industrie minière différente de celle préconisée par l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (IUPAC). Pour des raisons économiques liées à l'abondance géologique, aux coûts du traitement du minerai, aux techniques de séparation, etc., de nombreux acteurs de l'industrie minière considèrent uniquement comme LREE : La-Ce-Pr-Nd. Ces mêmes acteurs industriels séparent et vendent leurs concentrés de REE sous forme d'oxydes, et il est d'usage de considérer ces éléments en termes d'oxydes de REE (REO). Du point de vue géologique, les REE ne sont pas rares. Leur abondance naturelle dans la croûte terrestre est au moins équivalente à celle des métaux de base (Zn, Cu, Pb, Ni, Co) et bien moins rare que des métaux précieux (Ag, Au). En revanche, les LREE étant les plus abondantes, elles se retrouvent à des concentrations parmi les plus élevées dans de nombreux gisements primaires. À l'inverse, les HREE sont nettement moins abondantes à l'instar des métaux rares (Sn, W, Ta) et sont donc bien plus rares y compris dans les gisements (excepté Y). Pour cette raison, les HREE sont considérées comme plus stratégiques que les LREE, d'où une valeur marchande bien plus élevée que celle des LREE. Ainsi, le rapport HREO / LREO est un paramètre critique pour l'évaluation d'un gisement.

En fait, c'est la faible quantité de minéraux naturels porteurs de REE qui justifie le terme « rare ». Bien que près de 200 espèces minérales de REE soient aujourd'hui connues (ce qui reste faible), seules certaines d'entre elles (Tableau 1) présentent un intérêt commercial (Gupta et Krishnamurthy, 2005). En effet, si les REE sont fréquemment incorporées dans le réseau cristallin de carbonates, d'oxydes, de silicates ou encore de phosphates en substitution d'autres éléments chimiques plus courants, l'industrie minière ne valorise qu'un très faible nombre de minerais de REE : la bastnäsite (fluorocarbonate), la monazite et le xénotime (phosphates), et la loparite (oxyde). Des REE ont également été extraites de l'apatite en Russie et en Afrique du Sud, mais cette production a été extrêmement limitée. Excepté le xénotime qui est enrichi en HREE, tous ces minéraux sont essentiellement caractérisés par leur grande richesse en LREE (Tableau 1). Puisque les lanthanides partagent des similitudes avec les éléments du groupe des actinides, les minéraux de REE renfermeront également et quasi-systématiquement des éléments radioactifs (e.g. Th et/ou U, tableau 1)). L'uraninite comme la thorite pourront également accompagner les minéraux de REE. La présence de ces éléments radioactifs constitue un frein au développement d'un projet minier. En effet, la radioactivité suit toutes les étapes du processus d'enrichissement des minerais jusqu'à la métallurgie. Ces minéraux et éléments radioactifs constituent un déchet qui doit être rigoureusement géré. Pour ces raisons, il faut s'intéresser aux teneurs en U et Th dans les gisements, particulièrement aux rapports ThO₂/REO et U₃O₈/REO des minéraux constituant le minerai.

* REE - de l'anglais Rare Earth Elements

† LREE - de l'anglais Light Rare Earth Elements

‡ HREE - de l'anglais Heavy Rare Earth Elements

Extraite des principales mines chinoises de Bayan Obo, Weishan et Maoniuoing ainsi qu'à Mountain Pass aux États-Unis, la bastnäsite est le principal minerai de REE. Depuis les années 1970, les argiles dites ioniques ou argiles latéritiques d'ion-adsorption, constituent une source importante de HREE (Bao et Zhao, 2008). Cette production, uniquement localisée dans le sud de la Chine (provinces du Jiangxi, Guangdong, et Guangxi) est favorisée par un coût de main d'œuvre bas, et des procédés d'extraction relativement simple par lixiviation *in situ* avec des solutions neutres ou acides. Cependant, avec des teneurs de minerai extrêmement faibles de 0,03 à 0,35% REO (Chi et Tian, 2008), de tels procédés questionnent sur l'équilibre entre faisabilité économique et protection de l'environnement. Néanmoins, la forte proportion de HREE couplée à la très faible concentration en éléments radioactifs (U, Th) associés à ce type de gisement, en font un défi attrayant dans l'exploration minière. Cette dernière décennie a vu l'émergence d'un important marché de l'exploration des REE dont l'un des objectifs était de définir des ressources hors Chine. Si différents projets sont ainsi en cours de valorisation, nombre d'entre eux constituent des projets innovants car non-conventionnels et donc risqués économiquement. Certains projets correspondent à de nouveaux modèles de gisement, d'autres cherchent à valoriser de nouveaux minéraux : pyrochlore, fergusonite, oxydes et nombreux silicates (e.g. allanite, eudialyte, steenstrupine). Ces phases minérales, notamment celles silicatées, présentent l'avantage d'être enrichies en HREO.

Il s'agit ici de mettre en regard l'augmentation de la demande mondiale et européenne en REE avec les perspectives voire les obstacles au développement du potentiel en REE du sous-sol européen.

Utilisation et évolution de la demande mondiale en terres rares

Les REE sont découvertes dès la fin du XVIII^e siècle, mais les différents éléments ne sont découverts et séparés que progressivement au cours du XIX^e siècle, le dernier élément à être isolé est le lutétium, en 1907. Leurs usages sont très limités jusqu'aux années 1960 (ferrocérium des pierres à briquet), puis plus diversifiés avec des applications technologiques à partir des années 1970 (écrans cathodiques couleur, lasers, etc.). Les REE ont des propriétés magnétiques, électroniques, optiques et catalytiques exceptionnelles, aujourd'hui particulièrement utiles pour des technologies de plus en plus diversifiées voire pointues, notamment l'industrie de la défense, l'électronique, ou les énergies renouvelables (Figure 1).

Les secteurs d'utilisations des REE ont largement évolué depuis 2010, année de la crise mondiale provoquée par la restriction des exportations chinoises et la baisse momentanée de la consommation mondiale (Bru et al., 2015). Dès 2012, la croissance de cette consommation a repris, et dépassé les 100 000 t REO, grâce notamment au secteur des aimants permanents. La principale technologie utilisée est celle des aimants NdFeB (néodyme-fer-bore), utilisant en particulier Nd et Pr avec en moindre mesure Dy et Tb pour les applications de haute performance. Les aimants NdFeB sont l'application la plus consommatrice de REE à l'échelle mondiale, avec environ 30 % en tonnage des usages de REE en 2018, et près de 53% de la valeur totale du marché des REE. Cette demande croît de 10% par an. Les secteurs d'usages de ces aimants sont multiples, comme dans les moteurs électriques à très haut rendement où ils permettent la miniaturisation (électronique, robotique) et l'allègement des équipements (générateurs d'éoliennes off-shore, moteurs des véhicules électriques, etc.).

Les autres secteurs d'usages des REE deviennent proportionnellement minoritaires (Bru et al., 2015), soit du fait d'usages restreints ou spécifiques (industrie de la défense, lasers médicaux, etc.) ou au contraire d'usages à plus faible valeur ajoutée pour des applications où les performances ont une moindre importance (poudres de polissage, catalyseurs automobiles, alliages métallurgiques). Ces secteurs utilisent des mélanges de REE relativement plus abondantes (La, Ce) et moins chers. En effet, une grande disparité existe entre les prix des LREE, très abondantes, et les HREE, réservées à des applications de niche du fait de leur rareté. Exprimés sous forme métal 99% FOB Chine, La et Ce sont restés à des niveaux quasi inchangés en 2018 et 2019, à 6 \$/kg en moyenne. Le prix du Tb, la plus chère des REE, s'établit aux alentours de 600 \$/kg, tandis que le Dy s'échange à 250 \$/kg en moyenne. Enfin, les prix du Nd et du Pr sont aujourd'hui stabilisés à 55 \$/kg et 100 \$/kg respectivement (contre 85 \$/kg en moyenne sur 2016 et 2017 pour Pr, illustrant son rôle croissant pour les aimants permanents).

En moyenne, la demande en REE progresse de 8 à 10% par an et devrait se poursuivre à ce rythme, tiré par l'essor des véhicules électriques et de l'éolien off-shore, ainsi que celui de l'électronique et de la robotique. À un tel rythme, la consommation mondiale de REE pourrait doubler en moins de 10 ans. Le cas des véhicules électriques est éloquent. Si les ventes étaient de l'ordre de 2 millions d'unités en 2018, beaucoup de scénarii prévoient une augmentation exponentielle estimée en 2030 entre 20 et 38 millions/an par l'Agence Internationale de l'Énergie (New Policies Scenarios et EV30@30). Or, selon les données du consultant Roskill (2018), les nouveaux véhicules électrifiés étaient à 90% équipés de moteurs à aimants permanents à REE (dominés par les modèles chinois, mais aussi Tesla pour son Model 3 Long Range) contre la technologie des moteurs à induction, notamment choisie par BMW pour s'affranchir des REE. Ainsi, avec une valeur moyenne de 2 kg d'aimants permanents embarqués par véhicule, soit 750 g d'alliage Nd-Pr, ce nouveau marché attendrait entre 15 000 et 28 500 t d'alliage Nd-Pr, contre 3 000 t en 2018, une augmentation considérable qui pourrait représenter 60% de la demande totale en aimants contre 10% actuellement.

L'Europe est l'un des marchés les plus prometteurs pour le développement de la mobilité électrique et pour l'installation d'éoliennes off-shore. Des questions légitimes se posent sur les sources potentielles de REE pour assurer ses besoins.

En 2018, la production mondiale est estimée à 170 000 t REO. Ce chiffre représente une fourchette basse, car seuls les quotas officiels du gouvernement chinois sont considérés (120 000 t en 2018, en augmentation de 14% par rapport à 2017) et non la production illégale du pays (entre 40 000 et 50 000 t). La part de la Chine sur la production mondiale serait comprise entre 70 et 90 % selon les estimations.

L'intégration verticale de toute la chaîne de production des REE jusqu'aux aimants permanents est un avantage compétitif majeur de la Chine, et soulève l'importante question de la vulnérabilité de l'approvisionnement pour l'industrie européenne, non seulement de la matière première mais également des produits en découlant. Afin d'atténuer les risques industriels concomitants, l'UE encourage les États-membres à développer et à diversifier leurs sources d'approvisionnement, qu'elles soient primaires (minières) ou secondaires grâce à la réutilisation, au recyclage et à la réduction des déchets (Guyonnet et al., 2015; Rollat et al., 2016). Un tour d'horizon des sources primaires s'impose.

Gîtologie des terres rares – un contexte européen très fertile

Les gisements de REE peuvent être divisés en deux grandes catégories (Figure 2) : i) les gîtes primaires ou endogènes associés aux processus magmatiques et hydrothermaux et ii) les gîtes secondaires ou exogènes liés à des processus sédimentaires et/ou climatiques (Chakhmouradian et Wall, 2012; Chakhmouradian et Zaitsev, 2012; Charles et al., 2013 ; Goodenough et al., 2016 ; Tuduri et al., 2015). Malgré la grande variété de gisements, seuls 5 types sont exploités : les carbonatites (48% de la production mondiale), les gîtes du magmatisme alcalin (2%), les gîtes à argiles ioniques (36%) les gîtes latéritiques (12%) et les placers (2%).

- Les gîtes affiliés aux processus endogènes

Les carbonatites à REE sont caractérisées par des corps intrusifs constitués de roches carbonatées pauvres en silice (<10%pds SiO₂), mais fréquemment enrichies en REE et accompagnées de minéraux accessoires à Nb, Ba, Sr, F, U, Th, Ti, Zr, P ainsi qu'en métaux de base (Cu, Pb, Zn). Les teneurs en REO des carbonatites sont généralement supérieures à 1% et peuvent dépasser 5% comme à Bayan Obo en Chine ou Mountain Pass aux États-Unis. L'enrichissement en REE est marqué par les LREE contenues dans : bastnäsite, monazite, apatite et allanite. Le ratio HREO/LREO est faible et généralement inférieure à 0,1 (Figure 2).

Les gisements de REE peuvent également être associés à des complexes alcalins constitués de roches magmatiques alcalines s.s., généralement sous-saturées et modérément enrichies en silice (35-60%pds SiO₂). Ces types de roches (e.g. syénite néphélinique) sont généralement caractérisés par une minéralogie abondante et exotique qui en sus des REE et du Nb, sont enrichis en Zr, Ta, Be, Ti, Li, U et Th. A contrario, les teneurs en REE associées aux complexes alcalins sont plus faibles que

dans les carbonatites et généralement <2%. (e.g. Norra Kärr en Suède et Kringlerne au Groenland @ 0,6% REO). Ces types de gisement sont fréquemment enrichis en HREE (par comparaison avec les carbonatites). Ainsi le ratio HREO/LREO, bien que très variable est généralement >0,15 et parfois >1 (Figure 2). Les principaux minéraux utiles sont la loparite, l'eudialyte, la gadolinite ou encore la steenstrupine, et sont souvent associés à des noms de roches « exotiques » (ijolites, lujavrites, kakortokites, urtites ou melteigites...).

Les rifts des domaines cratoniques constituent des zones à fort potentiel économique comme le bouclier Baltique incluant la péninsule de Kola en Russie ou le Groenland (Goodenough et al., 2016, Figure 3). Seuls les complexes alcalins à loparite de la péninsule de Kola sont aujourd'hui exploités pour leurs REE et ne représentent que 2% de la production mondiale. Bien que sous exploités, les complexes alcalins constituent l'essentiel des nouveaux projets d'exploration de REE. En 2015, Norra Kär (Suède) a été le premier gisement situé dans l'UE à certifier des ressources et des réserves évaluées à près de 55 Mt @ 0,55% REO. D'autres gîtes liés à des intrusions alcalines montrent un fort potentiel (Figure x). En outre, les complexes de Khibina et Lovozero dans la péninsule de Kola renferment des « monstres » avec des réserves estimées à plus de 2 Gt @ 0,6% REO. Dans le sud du Groenland, la province magmatique de Gardar est probablement la plus extraordinaire. Il s'agit d'un ancien rift (1,35 à 1,12 Ga) à l'aplomb duquel s'est mis en place un important cortège de complexes alcalins (Grønnedal-Ika, Igaliko, Ilímaussaq, Nunarssuit ou Tugtutôg) à fort potentiel car tous minéralisés en REE mais également en Nb, Zr ± U. Chaque intrusion recèle un gisement potentiel de classe mondiale tel que le complexe d'Ilímaussaq (Figure 4) comprenant les gîtes de Kvanefjeld (> 1 Gt @ 1,1% REO soit près de 11 Mt de REO couplé avec des ressources en U), et le gîte de Kringlerne (> 4,7 Gt @ 0,65% REO soit près de 29 Mt de REO). Ces complexes alcalins sont principalement constitués de syénite néphélinique, localement associée à des carbonatites. Concernant les gîtes associés aux carbonatites, la Norvège, la Finlande et la péninsule de Kola en Russie renferment le potentiel le plus intéressant. Les REE sont principalement portées par des minéraux tels que l'apatite, la bastnäsite, la monazite et le pyrochlore avec parfois de l'allanite, de la parisite et de l'ancylite. Les principales cibles sont Fen en Norvège (84 Mt @ 1,08% REO) et enfin les "monstres" russes tels que Afrikanda (627 Mt @ 0,78%REO) et Kovdor (915 Mt @ 0,48% REO). Dans certains gîtes, d'importantes accumulations d'apatite peuvent constituer des corps massifs (apatite) au sein de carbonatites. C'est le cas de la carbonatite de Sokli (Finlande) qui avec 250 Mt @ 0,5% REO de minerai d'apatite pourrait également constituer une cible importante pour prospecter les REE.

De façon moins conventionnelle, la célèbre mine d'Ytterby en Suède appartient au modèle de pegmatites de type NYF (Nb, Y, F). Ce site initialement exploité pour produire de la porcelaine au XVIII^e siècle est le lieu où a débuté l'histoire des REE en 1787, avec la découverte d'un minéral inconnu par C. A. Arrhenius et son analyse en 1794 par J. Gadolin qui a trouvé une « nouvelle terre ». En 1797, A. G. Ekeberg a donné le nom « yttrium » à ce nouvel élément qui était en fait un mélange de plusieurs REE. Ce minéral a par la suite été nommé gadolinite. De même, il convient de distinguer les gîtes associés aux skarns. Bien qu'initialement exploité pour le fer et le cuivre, le skarn de Bastnäs a également connu une production historique où ca. 160 t de minerai de bastnäsite ont été produites entre 1860 et 1919.

- Les gîtes affiliés aux processus exogènes

Les gisements secondaires représentaient la majeure partie de la production de REE avant les années 1970, avec l'exploitation de placers à monazite. Aujourd'hui, les gîtes secondaires peuvent être subdivisés en deux groupes : les gisements associés aux processus de surface et appartenant au régolithe et les gisements de bassins associés aux environnements sédimentaires (Figure 2).

Les processus de surface provoquent par réactions d'hydrolyse et d'oxydation, d'hydratation, voire de décarbonatation une altération chimique des roches et minéraux en complément des phénomènes physiques. Ainsi, les éléments solubles (Mg, Ca) sont en partie lessivés en partie, ou parfois en totalité sous des climats très agressifs. Les parties insolubles (Fe, Al, une partie des REE) restent sur place pour se recombinaison en minéraux néoformés, principalement des argiles, des hydro-phosphates ou des carbonates. En contexte latéritique, l'altération de roches initialement riches en REE (e.g. carbonatite) pourra donc produire des gisements secondaires de REE encore plus riches. C'est le cas

du gisement latéritique de REE de Mount Weld (Australie) développé aux dépens d'une carbonatite et dont la teneur d'exploitation est aujourd'hui supérieure à 8% (Lottermoser, 1990). Le cas des gîtes d'argiles ioniques (argiles latéritiques d'ion-adsorption) est souvent associé à l'altération de granites. Les REE peu solubles sont adsorbées à la surface d'argiles néoformées (halloysite/kaolinite). Ces gisements sont certes nombreux mais de très petite taille (quelques dizaines de milliers de tonnes) et sont exploités malgré leurs très faibles teneurs.

Le sud-est de l'Europe renferme de nombreuses occurrences de REE associées à des processus d'altération et liées à des bauxites et latérites (Figure 3). Ces occurrences offrent un potentiel qui reste à déterminer dans les Balkans et en Grèce (Grebnik, Vlasenica, Marmara).

Dans des bassins sédimentaires, les gîtes de type placer correspondent à des accumulations de minéraux lourds dans des sables et graviers séparés par des processus de gravité lors de leur transport par l'eau ou le vent. La diagenèse consolide ces placers les transformant en paléoplacers. Les principaux minéraux de REE sont ; monazite, xénotime, fergusonite, euxenite et allanite. Ces gisements représentaient la majeure partie de la production de REE avant les années 1970, en particulier par l'exploitation de placers à monazite. Ils sont toujours exploités (2% de la production mondiale en 2018). Un autre processus d'accumulation, de micro-organismes et d'algues en contexte marin cette fois, pourra produire grâce à la diagenèse des concentrations de phosphates appelées phosphorites. Ces roches constituées exclusivement d'apatite peuvent dans certains contextes renfermer des REE comme à Tåsjö en Norvège. Enfin, concernant les gîtes authigéniques, la diagenèse de certaines roches silico-clastiques enrichies en matière organique pourra dans certains cas, sous l'élévation de la température, produire des concentrations notables en REE (Donnot et al., 1973; Pourret et Tuduri, 2017).

En Europe (Figure 3), les gisements secondaires de type paléoplacers sont généralement d'âge Cénozoïque, même si quelques-uns sont datés du Précambrien (e.g. Péninsule de Nordkinn en Norvège et Trostad en Suède). Le principal minéral rencontré est la monazite, avec parfois du xénotime, de l'allanite, de l'apatite, de l'euxenite, de la fergusonite, de la loparite et du zircon. En Europe occidentale, ces paléoplacers sont principalement caractérisés par la monazite grise enrichie en REE intermédiaires (Sm-Eu-Gd), et avec de très faibles concentrations en U et Th. Ces monazites sont issues de l'érosion de roches sédimentaires des anciens bassins du Paléozoïque inférieur de l'ouest de l'Europe (France, Pays de Galles, Belgique, République Tchèque, Ibérie). Ces derniers restent de petite taille et sans intérêt économique (Donnot et al., 1973; Tuduri et al., 2013). Les grès phosphatés de l'Ordovicien constituent également des cibles intéressantes comme Tåsjö (Suède), avec des ressources estimées à 112,5Mt @ 0,18% REO.

Métallogénie des terres rares : quid de la fertilité en terres rares des carbonatites ?

L'origine des carbonatites et leur association avec les magmas alcalins demeurent débattues et des questions fondamentales sur le cycle profond du carbone persistent (Hammouda et Keshav, 2015). Si la provenance mantellique de ces magmas est globalement acceptée, l'essentiel des carbonatites semble se séparer des magmas silicatés alcalins par des processus d'immiscibilité au cours de la différenciation crustale (Kjarsgaard et al., 1995; Weidendorfer et al., 2017). Or, aucune étude n'a pu résoudre l'énigme du fractionnement des carbonatites et leur enrichissement en REE, en raison de la difficulté à décrypter la minéralogie, les géométries et les relations pétrologiques de ces roches très altérées sur le terrain. Les enrichissements en REE dans les carbonatites sont souvent décrits comme issus de processus tardi-magmatiques et hydrothermaux ou encore postérieurs et surpergènes. Pourtant, il apparaît délicat de ne pas envisager des processus de pré-concentration dès le stade magmatique pouvant contribuer à la fertilisation en REE de ces carbonatites. Les récents travaux de pétrologie expérimentale réalisés par Nabyl et al. (2020) simule l'immiscibilité entre un magma alcalin et une carbonatite au cours de la cristallisation fractionnée. Ce travail en laboratoire propose un modèle prédictif sur le devenir des métaux rares dans le cycle de vie du système magmatique en reliant les teneurs en REE des carbonatites au degré de différenciation d'un magma alcalin. Les données expérimentales montrent que ce degré de différenciation, contrôlant la composition chimique des liquides silicatés résiduels, est un facteur-clé régissant la concentration en REE du liquide carbonaté non miscible coexistant. En effet, des concentrations en REE similaires à celles des

carbonatites économiques (>3,5% REO) peuvent être produites par immiscibilité avec des magmas de compositions phonolitique et phono-trachytique, tandis que les magmas alcalins plus primitifs (néphélinites) ne sont immiscibles qu'avec des carbonatites peu fertiles en REE. Il existe bien une fenêtre magmatique dans la formation des carbonatites donnant lieu à un optimum d'enrichissement en REE. Ce modèle devra être testé par des observations de terrain et d'autres travaux expérimentaux. Enfin, n'occultons pas qu'il existe de manière quasi-systématique une phase hydrothermale durant la mise en place des carbonatites, et cette phase contribue très certainement à la redistribution des REE héritées du stade magmatique.

Enjeux et obstacles

Malgré le potentiel, la concrétisation de projets miniers européens se fait attendre. En apparence prometteur, le projet de Norra Karr (Suède) est toujours en attente d'autorisations environnementales du gouvernement suédois en 2019. Au Groenland, le développement de Kvanefjeld a franchi d'importants jalons en 2018, sous l'impulsion de soutiens chinois. Shenghe Resources Holding Co. Ltd est le principal actionnaire de la junior australienne Greenland Minerals qui développe le projet. En janvier 2019, la formation d'une co-entreprise entre Shenghe et China National Nuclear Corp a été annoncée. Elle sera chargée de l'importation, l'exportation et le commerce de REO et U_3O_8 . Les acteurs chinois sont ainsi bien placés pour une mise en production d'ici 2022. Un accord d'enlèvement de 32 000 t/an de concentrés a été conclu, ainsi que la possibilité pour Shenghe de devenir l'actionnaire majoritaire (60 % des parts) en 2020. Le dernier verrou concerne les demandes de permis d'exploitation minière. En Russie, le développement de Tomtor en Yakoutie est poussé par les autorités et mené par ThreeArcMining, joint-venture entre Rostec et ICT Group. La construction pourrait avoir lieu en 2021, suivie d'une production d'environ 20 000t REO/an. Dans le reste du monde, ce sont les acteurs australiens et américains qui sont en pointe. En Australie, plusieurs projets entreraient en production d'ici 2021, sous réserve de financement. Ce sont notamment les projets Arafura, pour lequel l'usine pilote doit être finalisée, et Browns Range (Northern Minerals), avantagé par d'importantes ressources en Dy. En outre, des accords entre les gouvernements américains et australiens à l'été 2019 scellent des collaborations renforcées sur les REE et qui devraient se conclure par la construction d'une, ou plusieurs usines de séparation des REE, notamment au Texas par la société Lynas, le plus important producteur non chinois du marché.

Références

- Bao, Z., Zhao, Z., 2008. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China. *Ore Geol. Rev.* 33, 519-535.
- Bru, K., Christmann, P., Labbé, J.F., Lefebvre, G., 2015. Panorama mondial 2014 du marché des Terres Rares. Rapport public. BRGM/RP-64330-FR.
- Chakhmouradian, A.R., Wall, F., 2012. Rare earth elements: minerals, mines, magnets (and more). *Elements* 8, 333-340.
- Chakhmouradian, A.R., Zaitsev, A.N., 2012. Rare earth mineralization in igneous rocks: sources and processes. *Elements* 8, 347-353.
- Charles, N., Tuduri, J., Guyonnet, D., Melleton, J., Pourret, O., 2013. Rare earth elements in Europe and Greenland: a geological potential? An overview, in: Jonsson, E. (Ed.), *Proceedings of the 12th Biennial SGA Meeting, Uppsala, Sweden*, pp. 1698-1701.
- Chi, R., Tian, T., 2008. *Weathered crust elution-deposited rare earth ores*. Nova Science Publishers, Inc, New York, NY, US.
- Donnot, M., Guigues, J., Lulzac, Y., Magnien, A., Parfenoff, A., Picot, P., 1973. Un nouveau type de gisement d'euporium: la monazite grise à europium en nodules dans les schistes paléozoïques de Bretagne. *Miner. Deposita* 8, 7-18.
- Goodenough, K.M., Schilling, J., Jonsson, E., Kalvig, P., Charles, N., Tuduri, J., Dedy, 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 Geol. Rev.* 72, 838-856.
- Gupta, C.K., Krishnamurthy, N., 2005. *Extractive metallurgy of rare earths*. CRC Press, Boca Raton, FL, US.

Guyonnet, D., Planchon, M., Rollat, A., Escalon, V., Tuduri, J., Charles, N., Vaxelaire, S., Dubois, D., Fargier, H., 2015. Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe. *J. Clean. Prod.* 107, 215-228.

Hammouda, T., Keshav, S., 2015. Melting in the mantle in the presence of carbon: Review of experiments and discussion on the origin of carbonatites. *Chem. Geol.* 418, 171-188.

Kjarsgaard, B.A., Hamilton, D.L., Peterson, T.D., 1995. Peralkaline nephelinite/carbonatite liquid immiscibility: comparison of phase compositions in experiments and natural lavas from Oldoinyo Lengai, in: Bell, K., Keller, J. (Eds.), *Carbonatite Volcanism: Oldoinyo Lengai and the Petrogenesis of Natrocarbonatites*. Springer, Berlin, Heidelberg, DE, pp. 163-190.

Lottermoser, B.G., 1990. Rare-earth element mineralisation within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia. *Lithos* 24, 151-167.

Nabyl, Z., Massuyeau, M., Gaillard, F., Tuduri, J., Iacono-Marziano, G., Rogerie, G., Le Trong, E., Di Carlo, I., Melleton, J., Bailly, L., 2020. A window in the course of alkaline magma differentiation conducive to immiscible REE-rich carbonatites. *Geochim. Cosmochim. Acta*.

Pourret, O., Tuduri, J., 2017. Continental shelves as potential resource of rare earth elements. *Sci. Rep.* 7, 5857.

Rollat, A., Guyonnet, D., Planchon, M., Tuduri, J., 2016. Prospective analysis of the flows of certain rare earths in Europe at the 2020 horizon. *Waste Management* 49, 427-436.

Roskill, 2018. *Rare Earths: Outlook to 2029*, 19th edition ed. Roskill Information Services, London, UK.

Tuduri, J., Charles, N., Guyonnet, G., Melleton, J., Pourret, P., A, R., 2015. *Projet ANR ASTER. Rapport de Tâche 4. Potentialité de stocks géologiques de terres rares en Europe et au Groenland. Rapport final. BRGM/RP-64910-FR.*

Tuduri, J., Chevillard, M., Colin, S., Gloaguen, E., Gouin, J., Potel, S., Pourret, O., 2013. Formation of monazite-(MREE) from Paleozoic shales: role of host rock chemical composition and organic material. *Mineral. Mag.* 77, 2362.

Upton, B.G.J., 2013. Tectono-magmatic evolution of the younger Gardar southern rift, South Greenland. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin* 29, 124.

Weidendorfer, D., Schmidt, M.W., Mattsson, H.B., 2017. A common origin of carbonatite magmas. *Geology* 45, 507-510.

Tableau 1 - Chimie des principaux minéraux de terres rares (Tuduri et al., 2015). En gras, sont mentionnés les minéraux valorisés par l'industrie extractive.

Minéral	Formule chimique	Concentration en		
		RE ₂ O ₃	ThO ₂	UO ₂
Allanite	([REE],Ca) ₂ (Al,Fe) ₃ Si ₃ O ₁₂ (OH)	2.5-17	<3	
Ancylite	Sr[LREE](CO ₃) ₂ (OH).H ₂ O	46-53	<0.4	<0.1
Apatite	Ca₅(PO₄)₃(F,Cl,OH)	<<2*		<0.05
Bastnäsité	[LREE]CO₃(F,OH)	58-75	<2.8	<0.1
Argiles	REE adsorbées sur kaolinite/halloysite Al₂Si₂O₅(OH)₄	<<4	<0.01	<0.001
Eudialyte	(Na, ₄ [LREE]) ₁₅ (Ca, ₆ [REE]) ₆ (Fe,Mn) ₃ (Si,Nb) ₂ (Zr,Ti) ₅ Si ₂₄ O ₇₂ (OH,F,Cl,H ₂ O) ₆	1-10		<0.1
Euxenite	([REE],U,Th)(Nb,Ta,Ti) ₂ O ₆	16-30	<4.3	3-9
Fergusonite	[REE]NbO ₄	43-52	<8	<13.6
Gadolinite	[REE] ₂ FeBe ₂ Si ₂ O ₁₀	45-54	<0.4	
Loparite	(Na,₄[LREE],Ca,Sr,Th)(Ti,Nb,Ta)O₃	28-37	1.6	0.03
Monazite	([LREE],Th,Ca)(P,Si)O₄	35-71	<20	<16
Parisite	Ca[LREE] ₂ (CO ₃) ₃ F ₂	50-59	<4	<0.3
Pyrochlore	(Ca,Na,U,[REE]) ₂ (Nb,Ta) ₂ O ₆ (OH,F)	< 22	<4	<27
Steenstrupine	Na ₄ [LREE] ₆ Mn ₂ Fe ₂ (Zr,Th)(PO ₄) ₇ Si ₁₂ O ₃₆ .3(H ₂ O)	< 31	<6	<1
Thorite	(Th,U,[REE])SiO ₄	<3	65-81	10-16
Uraninite	UO ₂	<1.5	<12.2	50-98
Xenotime	([HREE],Zr,U)(P,Si)O₄	54-74	<8.4	<5.8
Zircon	(Zr, ₁ [HREE],Th,U)SiO ₄	< 19	0.01-0.8	0.01-4

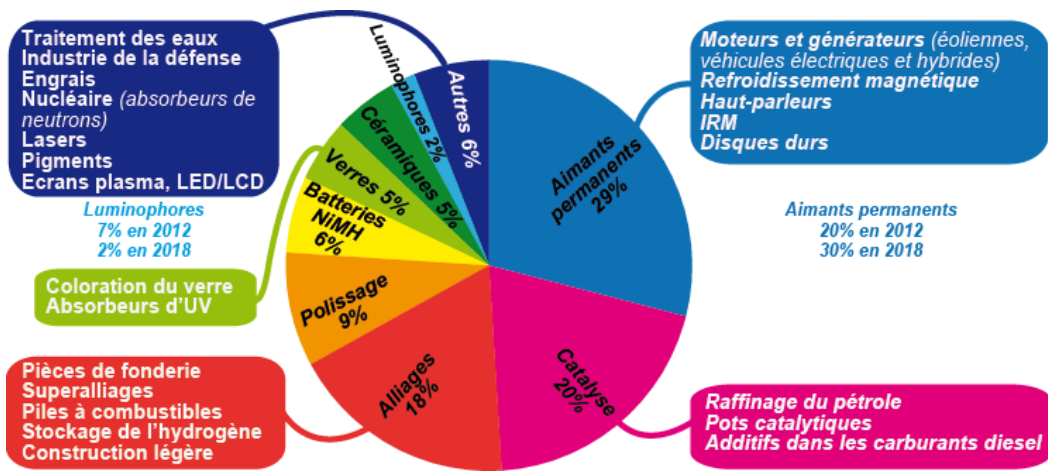


Figure 1. Répartition des usages des REE par filières dans le monde en 2018 (Roskill, 2018)

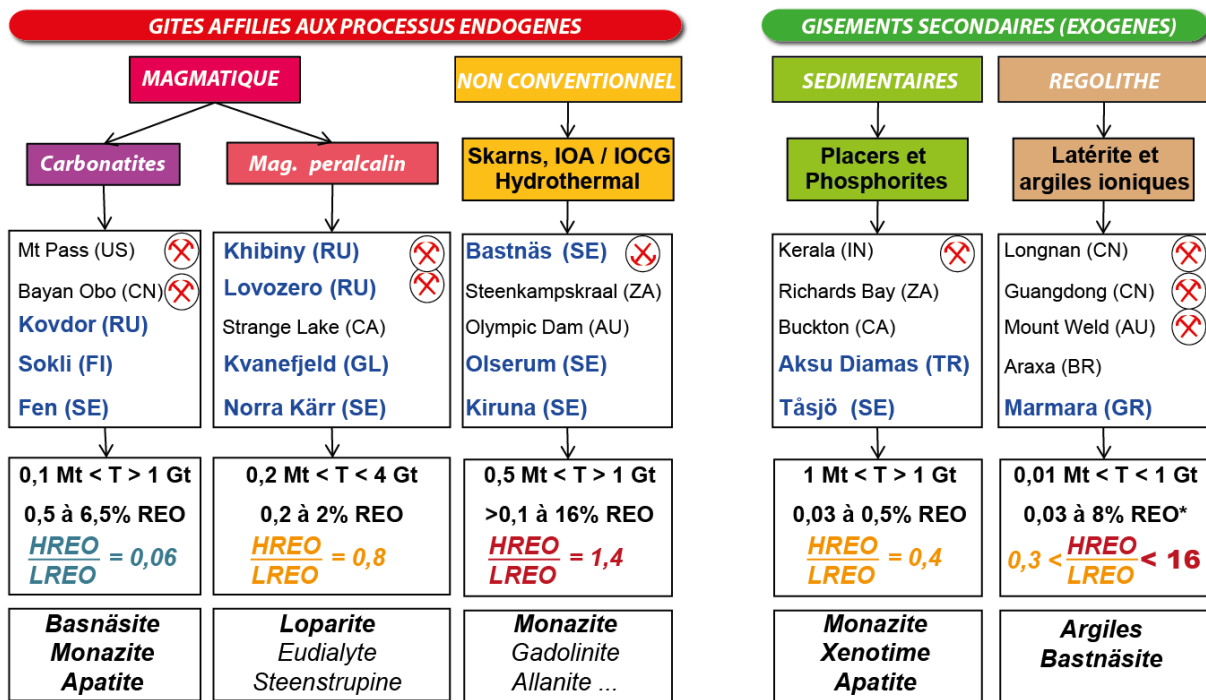


Figure 2. Caractéristiques des principaux modèles de gisements. En bleu, les gîtes majeurs localisés en Europe ou au Groenland. T : tonnage, * la valeur de 8% correspond au gisement de Mount Weld, le rapport HREO/LREO correspondant est de 0,3. Les mines en activités sont suivi d'un symbole minier. Bastnäs relève du patrimoine minier. Abréviations : AU (Australie), BR (Brésil), CA (Canada), CN (Chine), FI (Finlande), GL (Groenland), GR (Grèce), IN (Inde), RU (Russie), SE (Suède), TR (Turquie), US (États-Unis), ZA (Afrique du Sud).

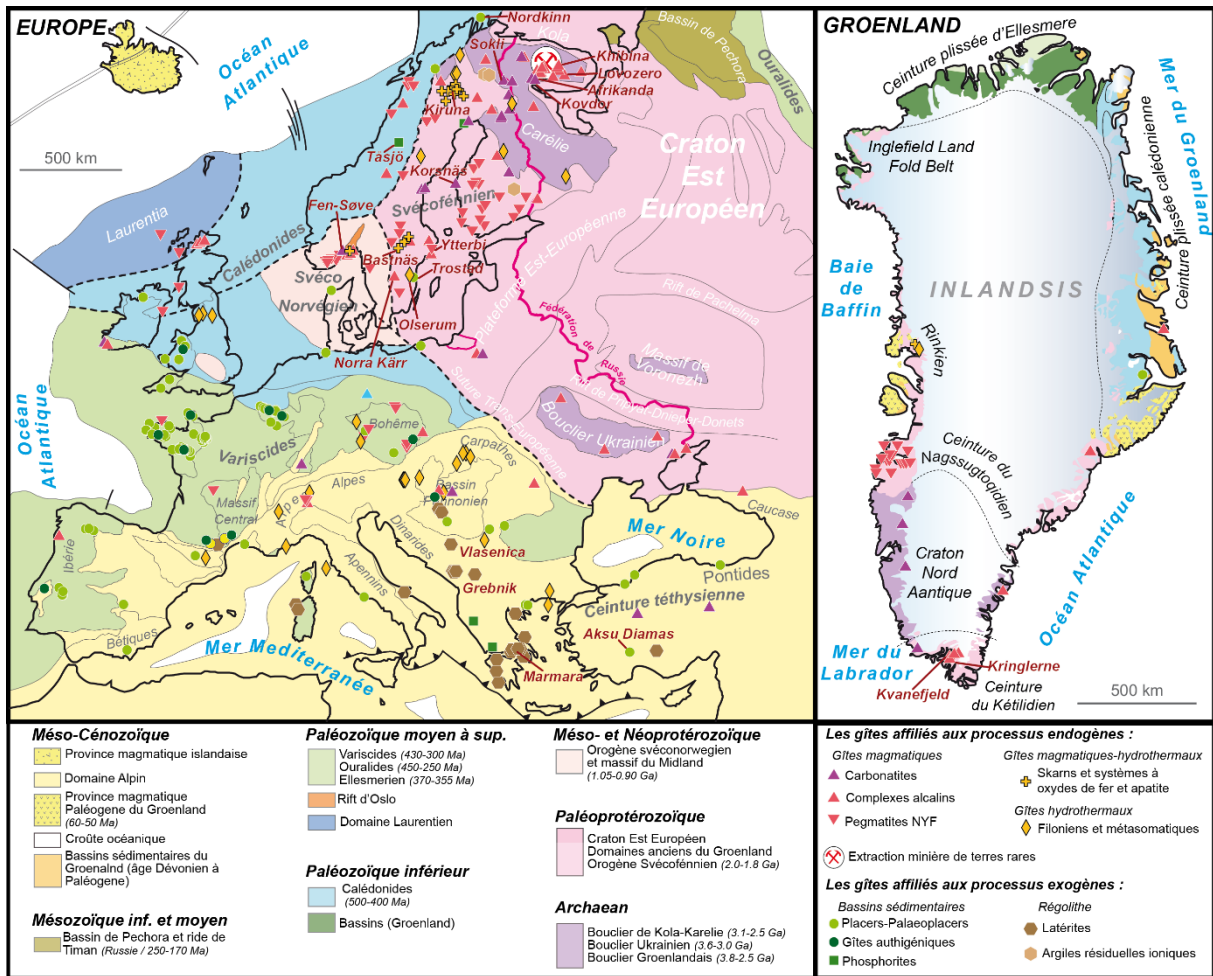


Figure 3. Distribution des différentes occurrences de gîtes affiliés aux processus endogènes et exogènes de terres rares en Europe et au Groenland (d'après Charles et al., 2013 ; Tuduri et al., 2015)

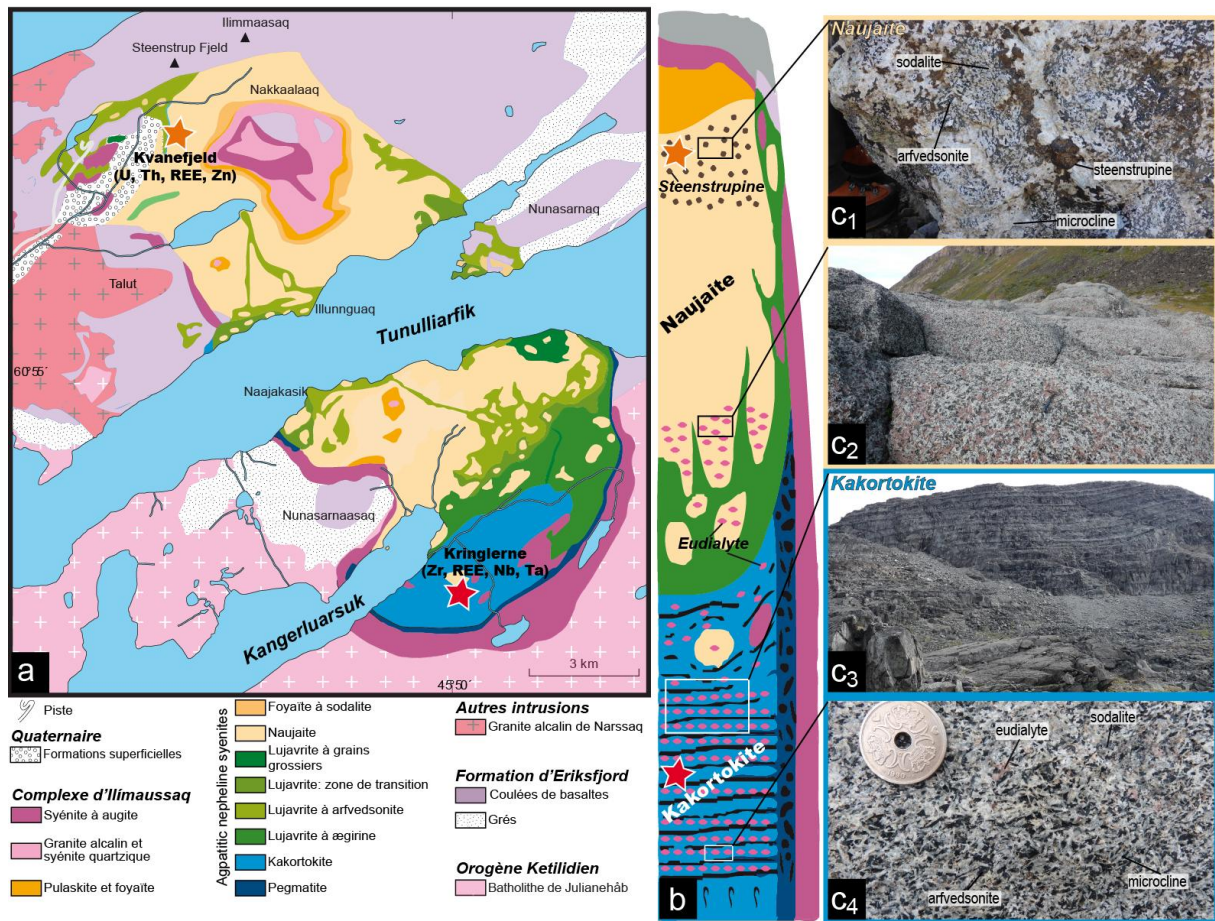


Figure 4. a) Carte géologique du complexe alcalin d'Ilímaussaq dans le sud du Groenland, localisation des gîtes de Kvanefjeld et Kringlerne, d'après Upton (2013). b) Log synthétique illustrant le caractère stratifié notamment à sa base et donc cumulatif du complexe alcalin. La puissance du log est estimée à 1,5km. c1) Assemblage magmatique d'une naujaite contenant des cumulats de sodalite (gris-vert) et d'arfvedsonite (noir) et un remplissage tardif de feldspath potassique (blanc) et steenstrupine (brun). c2) Assemblage magmatique de la base de l'unité constituée de naujaite contenant un cumulat de sodalite (gris), arfvedsonite (noir) et eudialyte (rose). c3) Litage magmatique typique de la kakortokite située à la base du complexe alcalin d'Ilímaussaq. 29 séquences litées sont recensées. c4) Assemblage magmatique d'une kakortokite caractérisé par une texture cumulative de microcline (blanc), arfvedsonite (noir), sodalite (blanc) et eudialyte (rose).