



DOSSIER ENJEUX DES GÉOSCIENCES

RESSOURCES MINÉRALES

LES TERRES RARES



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Sommaire

<i>1/ Pourquoi les terres rares sont recherchées</i>	<i>p.3</i>
<i>2/ Un marché en forte expansion</i>	<i>p.5</i>
<i>3/ L'origine géologique des terres rares</i>	<i>p.8</i>
<i>4/ Développer le recyclage pour réduire les tensions</i>	<i>p.11</i>



1 / Pourquoi les terres rares sont recherchées

Nommées ainsi au 19^{ème} siècle après la découverte de nouveaux éléments qu'on imaginait peu répandus, les terres rares sont devenues d'un usage courant dans l'industrie à partir des années 70. Elles le doivent à des propriétés physiques très particulières.

La recherche des éléments constituant les minéraux est une vieille passion européenne. Au milieu du 17^{ème} siècle, les chimistes analysaient déjà les réactions des éléments de la matière et commençaient à bien maîtriser la notion d'état gazeux. Deux cents ans plus tard, les savants fixaient les premières conventions atomiques. Au 20^{ème} siècle, les différents atomes naturels constitutifs de la matière étaient connus. Ont ainsi été découverts une centaine d'atomes qui constituent l'ensemble de la matière connue à ce jour.

Dans ce tableau, les terres rares représentent 17 éléments. Les conventions atomiques les ont classées dans le même groupe en raison de certaines propriétés physico-chimiques très similaires. Présents à l'état de traces dans la plupart des environnements naturels, ces métaux sont très recherchés dans l'industrie des nouvelles technologies pour leurs propriétés optiques, magnétiques et chimiques particulières permettant par exemple de réduire les émissions d'oxydes d'azote (les fameux NOx) au niveau des pots d'échappement des automobiles ou encore à stocker l'énergie électrique dans des batteries...



Pegmatite à eudialyte (minéral de terres rares), Groenland.
©BRGM - Nicolas Charles



Terres rares raffinées. © BRGM

LA POSTÉRITÉ D'UN PETIT VILLAGE DE SUÈDE

A la fin du 18^{ème} siècle, dans un gisement de minerais situé près du village suédois d'Ytterby, plusieurs métaux aux propriétés étonnantes sont découverts par des minéralogistes et des chimistes. Le lieu donnera ainsi son nom à pas moins de 4 terres rares.

L'yttrium, qui deviendra l'élément 39 du tableau périodique, est isolé dès 1794 par le finlandais Johan Gadolin. Mais il ne sera utilisé massivement que dans les années 60, pour ses capacités à transmettre des courants électriques à très haute fréquence ou encore à améliorer les propriétés du verre.

L'élément 65, le terbium, tient aussi son nom du village suédois. C'est un métal blanc assez lourd, découvert en 1843 par le suédois Carl Gustav Mosander, tout comme l'erbium, l'élément 68 qui améliore considérablement le rendement des générateurs destinés à convertir la chaleur en électricité.

L'ytterbium quant à lui ne sera découvert – ou plutôt deviné – qu'en 1878 par le suisse Jean-Charles de Marignac : en soumettant un minéral d'erbium à des tests en laboratoire, le chimiste sera intrigué par certaines propriétés et pressentira que son échantillon contient un autre métal.

D'autres terres rares tireront leurs noms de la sphère scandinave. L'holmium (élément 67) est inspiré par l'ancienne capitale suédoise, Holmia. Le thulium (élément 69) tire son nom de la terre mythologique des Scandinaves, la Thulé, et le gadolinium (élément 64) a été nommé ainsi par son découvreur – le chimiste français Lecoq de Boisbaudran – en souvenir du savant finlandais Gadolin qui avait consacré sa vie à l'étude des terres rares. En tout, 17 éléments – les atomes 57 à 71 du tableau périodique et 2 autres éléments aux caractéristiques proches – ont été découverts entre la fin du 18^{ème} siècle et la première moitié du 20^{ème} siècle.

LE TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

1																	2														
H																	He														
3	4											5	6	7	8	9	10														
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne														
11	12											13	14	15	16	17	18														
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar														
19	20	21											22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
K	Ca	Sc											Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
37	38	39											40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54				
Rb	Sr	Y											Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	Non	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

Tableau périodique des éléments de la matière : les terres rares représentent un type d'atome particulier

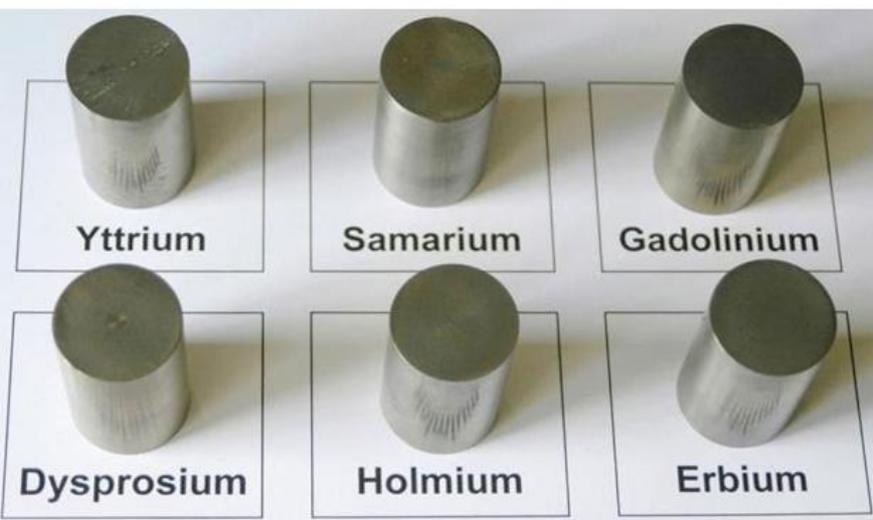
2 / Un marché en forte expansion

Les terres rares sont aujourd'hui présentes dans beaucoup d'objets manufacturés et elles sont devenues indispensables à plusieurs secteurs de l'industrie de pointe. Ces métaux sont devenus une denrée économique et même géopolitique.

Si le cérium a été utilisé dans les manchons de gaz de la ville de Vienne dès les années 1880, l'usage des terres rares est resté très limité jusqu'aux années 70, quand le développement des écrans couleur ou de la technologie laser ont nécessité leur emploi à grande échelle. En plus de capacités optiques exceptionnelles, ces métaux possèdent également un pouvoir d'aimantation et une résistance dans le temps qui en font des éléments très demandés pour la fabrication de nombreux matériels électroniques : haut-parleurs, appareils d'imagerie médicale, générateurs électriques des éoliennes ou encore disques durs d'ordinateurs.

forte miniaturisation. Ce secteur tire aujourd'hui l'essentiel de la demande en terres rares, orientée vers 4 éléments en particulier : le néodyme, le praséodyme, et dans une moindre mesure le dysprosium et le terbium (pour les applications de haute performance). C'est une donnée particulièrement importante pour les véhicules électriques ou les nouvelles techniques de production d'énergie comme les éoliennes, dont les moteurs et générateurs doivent être les moins grands et les moins lourds possibles. Les capacités d'un aimant de 100 grammes contenant du néodyme équivalent ainsi à celles d'un aimant classique de 1 kg sans cet élément. Dans le secteur militaire, les terres rares, ajoutées à d'autres métaux, améliorent les systèmes de guidage de missile, les performances de certains blindages ou encore les capacités de détection des sonars.

En 2020, la production minière de terres rares était estimée à environ 200 000 tonnes. Cette ressource primaire doit ensuite être affinée. La consommation de terres rares par l'industrie était estimée à 190 000 tonnes pour un marché global de 2,2 milliards de dollars. Le passé l'a montré : les prix peuvent vite dérapier. En septembre 2010, un incident diplomatique autour d'une petite île en mer de Chine orientale décidait Pékin à décréter un embargo sur les terres rares destinées au Japon, puis en 2011, la Chine abaissait ses quotas d'exportation. Ces événements provoquaient une flambée soudaine des cours : le néodyme utilisé pour la fabrication d'aimants permanents voyait par exemple son prix grimper de 1000% en quelques mois, avant de redescendre.



La plupart des terres rares sont des métaux d'aspect blanc-gris, de densité variée. © BRGM

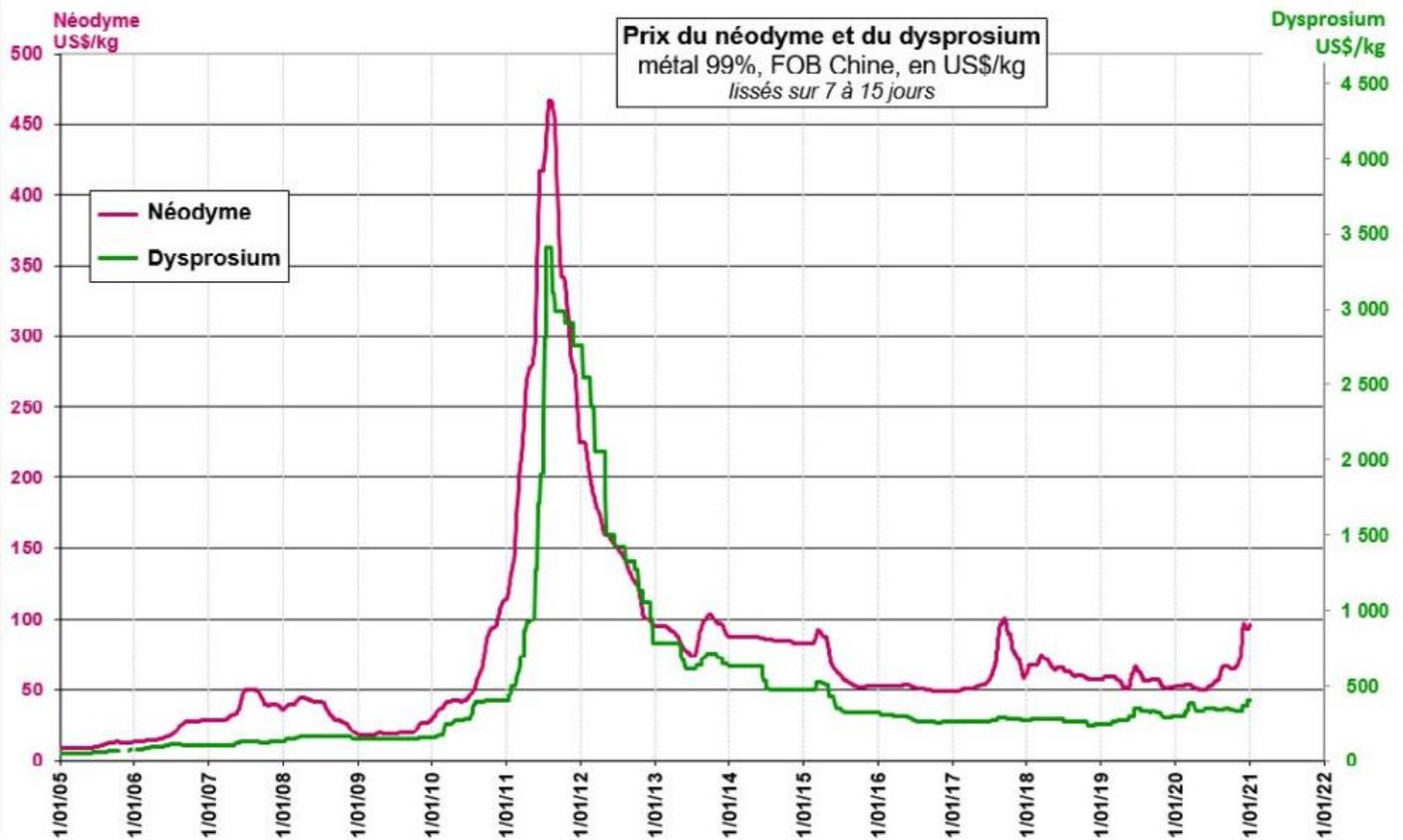
C'est en particulier grâce à une technologie d'aimants permanents appelée NdFeB (néodyme-fer-bore) utilisée dans des moteurs électriques à très haut rendement que les terres rares ont permis d'augmenter la performance de ces produits technologiques tout en assurant une

L'EXTRACTION MINIÈRE SE DÉVELOPPE EN DEHORS DE LA CHINE

Ces dix dernières années, pour faire face à leur dépendance ou profiter du marché, plusieurs pays ont décidé de consacrer une partie de leur activité minière à l'extraction de terres rares sur leur territoire. C'est le cas des Etats-Unis avec la réouverture de l'important gisement de Mountain Pass, qui a produit en 2020 près de 38 000 tonnes d'oxydes de terres rares, ou encore de la Birmanie avec une production estimée à 30 000 tonnes. Le monopole de la Chine dans la production primaire se réduit : elle est estimée à 57% du total en 2020 contre 82% en 2017. Néanmoins, l'Empire du Milieu garde la première place en matière d'extraction et demeure incontournable sur le plan de la transformation grâce

à un tissu industriel étoffé sur toute la chaîne de production et une rentabilité très élevée. C'est donc sur ces étapes en aval de la production minière que les autres pays concentrent progressivement leurs efforts, visant à mettre en place des capacités de raffinage compétitives. L'Australie, les Etats-Unis et l'Europe pourraient disposer de telles capacités sur leurs sols à l'horizon 2030.

En vingt ans, la consommation mondiale de terres rares a plus que doublé. Elle pourrait augmenter de 8% par an dans les prochaines années en raison de l'augmentation des ventes de voitures électriques, des plans énergétiques favorisant l'éolien, et de l'extension de l'électronique et de la robotique.



Évolution des prix du néodyme et du dysprosium sur 15 ans. © BRGM



3 g de terres rares dans chaque smartphone

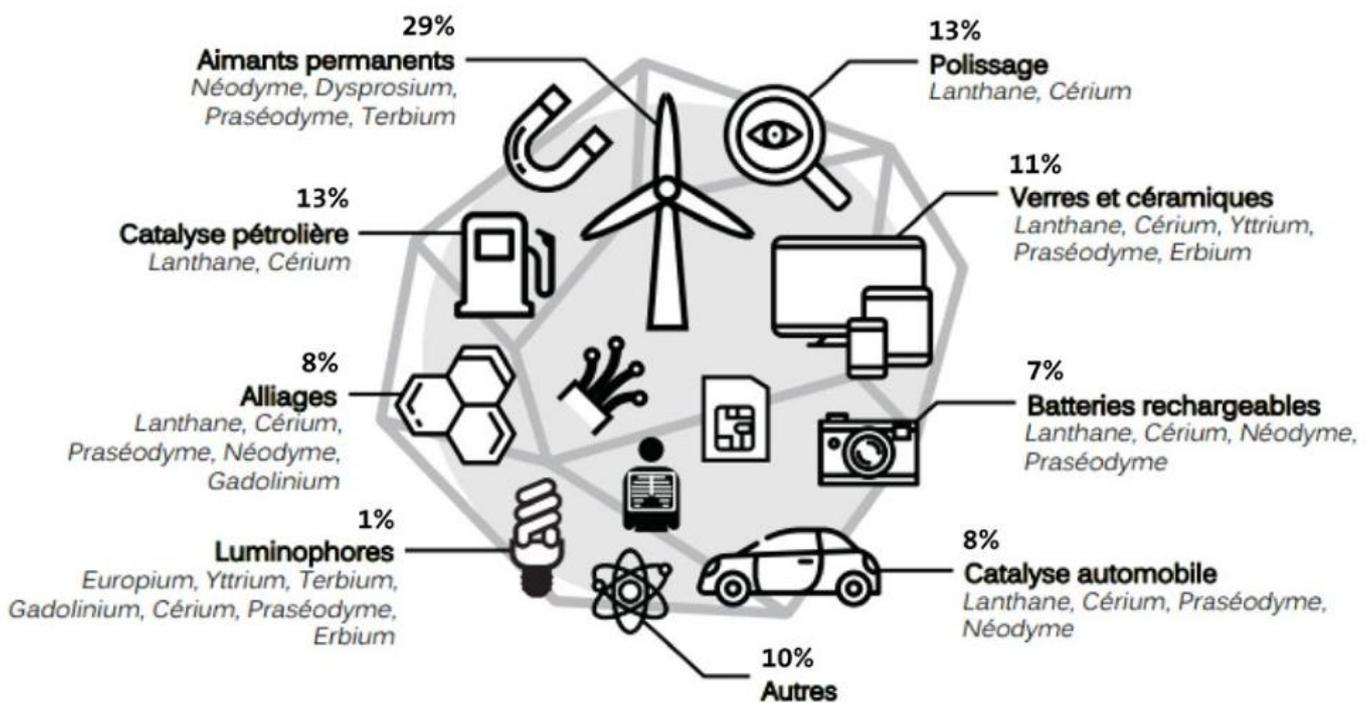
Un smartphone ne contient en moyenne que 3 g de terres rares. Mais en 2020, le marché représente près de 2 milliard d'unités vendues dans le monde, mobilisant près de 6 000 tonnes de terres rares.

Entre 0,3 et 3,5 kg de terres rares pour fabriquer une voiture

Si des constructeurs automobiles essayent de se passer des terres rares pour parer à d'éventuels problèmes d'approvisionnement, celles-ci jouent encore un rôle central dans le secteur car elles interviennent dans un grand nombre de fonctions où elles améliorent la fiabilité et les performances (direction et freinage par exemple). On retrouve donc certaines terres rares dans les véhicules thermiques classiques, mais celles-ci sont surtout utilisées dans les batteries et moteurs des véhicules hybrides et électriques, dans une fourchette allant de 1,2 kg à 3,5 kg en fonction des technologies. Enfin, on retrouve des terres rares légères dans les pots d'échappement comme catalyseurs, aux côtés du palladium et du platine.

Jusqu'à 1 tonne de terres rares dans une éolienne

De la même manière, ces aimants permettent de considérablement optimiser la puissance des éoliennes offshore : jusqu'à 7 MW, contre 2 MW pour les éoliennes terrestres classiques sans aimants. Pour obtenir une puissance d'1 MW fournie par le générateur, il faut jusqu'à 600 kg d'aimants contenant un tiers de néodyme-praséodyme. Un développement massif de parcs éoliens en mer pourrait ainsi avoir une influence importante sur la demande.



Les aimants permanents représentent une part croissante de la consommation de terres rares. © BRGM

3 / L'origine géologique des terres rares

*Gisements profonds ou de surface, ressource facile d'accès ou difficile à extraire...
La recherche des métaux utilisés tous les jours est d'abord affaire de géologie.*

Les terres rares sont présentes à toutes les étapes du cycle des roches : magmatique, métamorphique, sédimentaire. Si elles sont largement présentes à l'état de traces dans la croûte terrestre, les gisements avec des teneurs économiquement exploitables sont éparpillés et assez peu nombreux, et aucun d'entre eux ne contient l'ensemble des terres rares. Ces gisements sont d'origine divers : il existe ainsi des gîtes dits primaires, c'est-à-dire directement associés aux processus internes de la planète tels que des remontées de magma, et des gîtes dits secondaires, qui doivent leur existence à un processus d'altération de la roche en surface

tel que l'érosion. Ces gisements sont toujours liés à des minéraux parfois très complexes et l'extraction des éléments terres rares de ces minéraux puis leur séparation nécessite plusieurs procédés de traitement et de purification.

Les gisements secondaires représentaient la majeure partie de la production de terres rares avant les années 70, avec l'exploitation de placers, ces zones où de la roche érodée s'accumulent par le jeu de la gravité et du transport de minéraux par les cours d'eau, formant ainsi des concentrations de métaux exploitables.

Mission géologique au Groenland © BRGM - Johann Tuduri





Mine de Mountain Pass, Etats-Unis © BRGM - Mathieu Leguérinel

Les principaux types de gisements : les argiles ioniques et les carbonatites

Avec le temps, les géologues ont découvert un autre type de gisement, ceux issus de la dégradation physico-chimique de la roche par le climat. En effet, les processus climatiques peuvent provoquer des réactions chimiques (hydrolyse, oxydation, hydratation) qui lessivent les éléments solubles d'une roche et en épargnent d'autres, notamment les terres rares qui vont alors aller se fixer à la surface d'argiles résiduelles. Des gîtes issus de ce lessivage naturel ont ainsi été générés. Ceux à argiles ioniques, associés à la dégradation de granites, sont généralement petits et à plus faible teneur. Présents en plusieurs points de la planète, ils représentaient une part non négligeable de la production chinoise, notamment sur

le marché noir. D'autres sites peuvent contenir des teneurs très élevées en éléments de terres rares, tel le gisement carbonaté du **Mont Weld** en Australie (supérieurs à 8%).

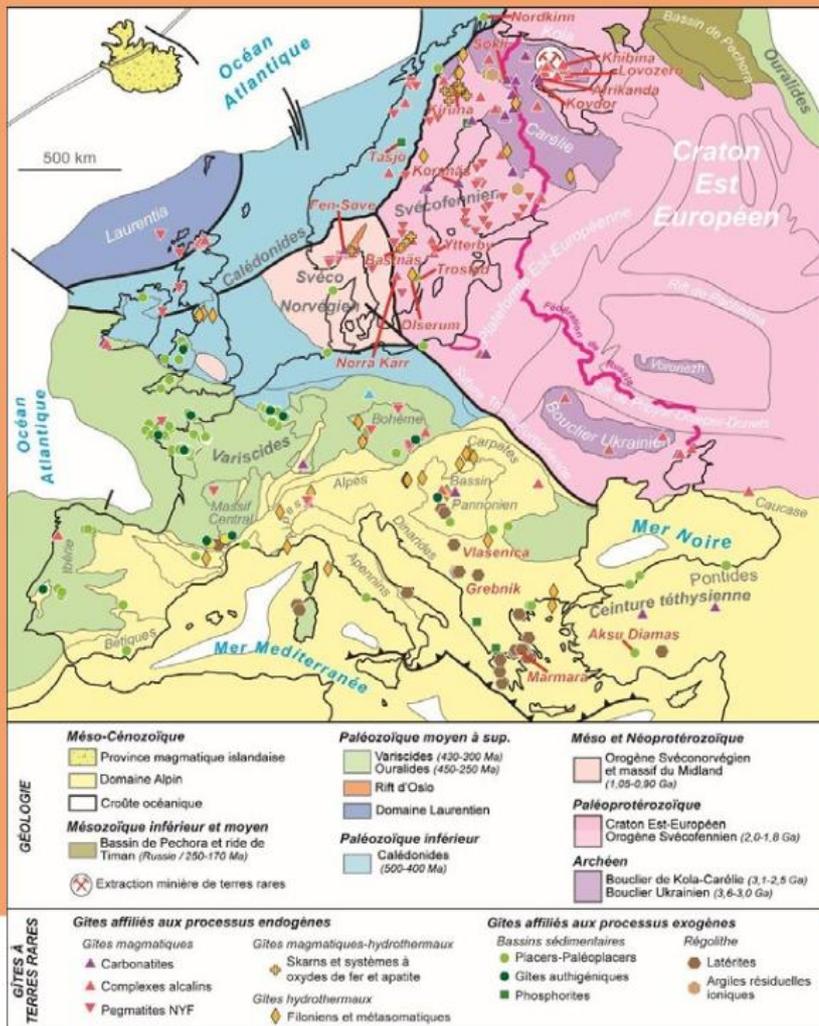
L'immense gisement de **Bayan Obo**, en Chine, est quant à lui d'origine primaire. Formé il y a environ 1300 millions d'années, il dépasse des teneurs de 5% en éléments de terres rares (pour obtenir 50 kilogrammes de ces éléments, il faut extraire 1 tonne de roche) ; ce rendement est considéré comme très élevé. Le site de **Mountain Pass** aux Etats-Unis est de même nature. D'autres gîtes primaires existent qui renferment des teneurs plus faibles, mais dont l'extension géographique peut être importante, notamment sur le pourtour de l'Europe.

DES RÉSERVES EUROPÉENNES NON NÉGLIGEABLES EN TERRES RARES

Les rares gisements européens bénéficiant d'une estimation de ressources compatible avec les standards internationaux démontrent leur taille mondiale et leur capacité à pallier aux besoins du continent pour au moins plusieurs décennies, estime le Bureau de recherches géologiques et minières. Ils sont le fruit de contextes géologiques diversifiés comprenant des blocs lithosphériques de nature variée qui se sont assemblés au cours d'une histoire de 3,8 milliards d'années.

Parmi les gisements primaires, des potentiels non négligeables ont été repérés à Norra Kärr en Suède et dans d'autres lieux de Scandinavie, tandis que la province magmatique de Gardar au Groënland (affilié au Danemark) présente plusieurs intrusions plutoniques jugées exceptionnelles. Le Groënland contiendrait pas moins de 12% des réserves mondiales exploitables de terres rares. L'étude géologique a aussi permis de mettre en lumière des gîtes secondaires, en Bohême, en Grèce et même en France (Bretagne, zone méditerranéenne).

A l'heure actuelle, abstraction faite du site russe de Lovozero, aucune mine d'extraction de terres rares n'est active sur le Vieux continent. Alors que l'Europe importe plus de 90% de ses terres rares depuis la Chine, une prise de conscience a émergé visant à sécuriser les approvisionnements.



En France, le COMES (Comité pour les métaux stratégiques) élabore une liste de métaux stratégiques et critiques pour l'économie du pays, et les experts français participent aux groupes européens dont l'un des buts est d'améliorer la connaissance du potentiel européen et groënlandais.

Ces travaux ont aussi permis de prendre conscience des savoir-faire nécessaires pour assurer une indépendance dans l'approvisionnement : traitements des minerais adaptés à chaque gisement, séparation (souvent difficile) des métaux recherchés, transformation en produits à haute valeur ajoutée. Des techniques qui ont été bien maîtrisées en Europe, à l'instar de l'ancienne usine Rhône-Poulenc de La Rochelle (aujourd'hui opérée par le groupe de chimie Solvay).

Distribution des différentes occurrences de REE affiliées aux processus endogènes et exogènes en Europe (d'après Charles et al., 2013 ; Goodenough et al., 2016 ; EURARE, 2017 ; Tuduri et al., 2020).



4 / Développer le recyclage pour réduire les tensions

A l'heure actuelle, le groupe de métaux appelés terres rares n'est quasiment pas recyclé, contrairement à des éléments plus communs comme le fer ou le cuivre. En cause : les quantités récupérées sont souvent très faibles et présentent des impuretés, et la rentabilité des procédés n'est pas encore au rendez-vous par rapport à des extractions très bon marché, notamment dans des pays aux normes environnementales peu sévères. Améliorer les procédés de recyclage des terres rares fait donc partie des solutions étudiées par le service géologique français.

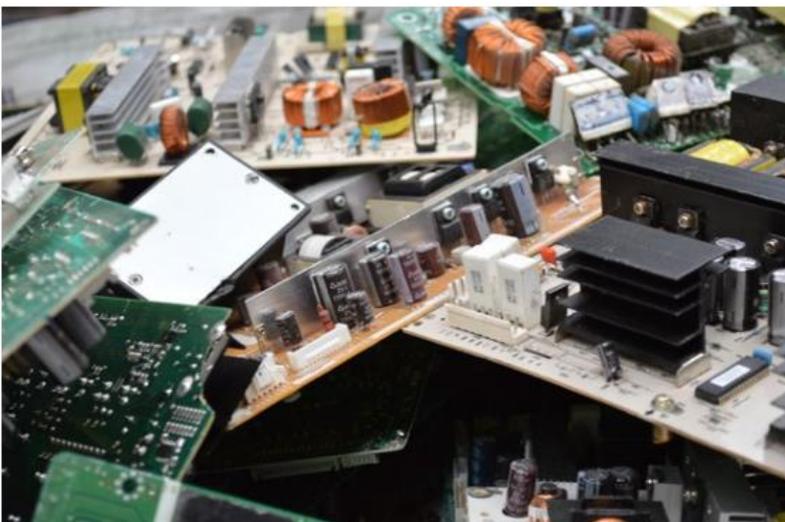
Lancé en janvier 2020, le projet **VALOMAG** a pour objectif de trouver des techniques efficaces pour extraire et valoriser les aimants permanents présents dans les éoliennes ou les disques durs. Le BRGM intervient à double titre. Dans la suite du projet **EXTRADE**, financé par l'Agence nationale de la recherche, le BRGM réalise des pilotes de démantèlement à grande échelle des disques durs d'ordinateurs. Par ailleurs, il cherche à récupérer les éléments de terres rares présents dans les aimants des éoliennes par une méthode de broyage et de dissolution du matériau.

VALOMAG étudie toute la chaîne de traitement : collecte et caractérisation des déchets, démontage et extraction des aimants permanents, essais de différents procédés hydrométallurgiques, production de nouveaux aimants pour des utilisations spécifiques, analyse globale du cycle de

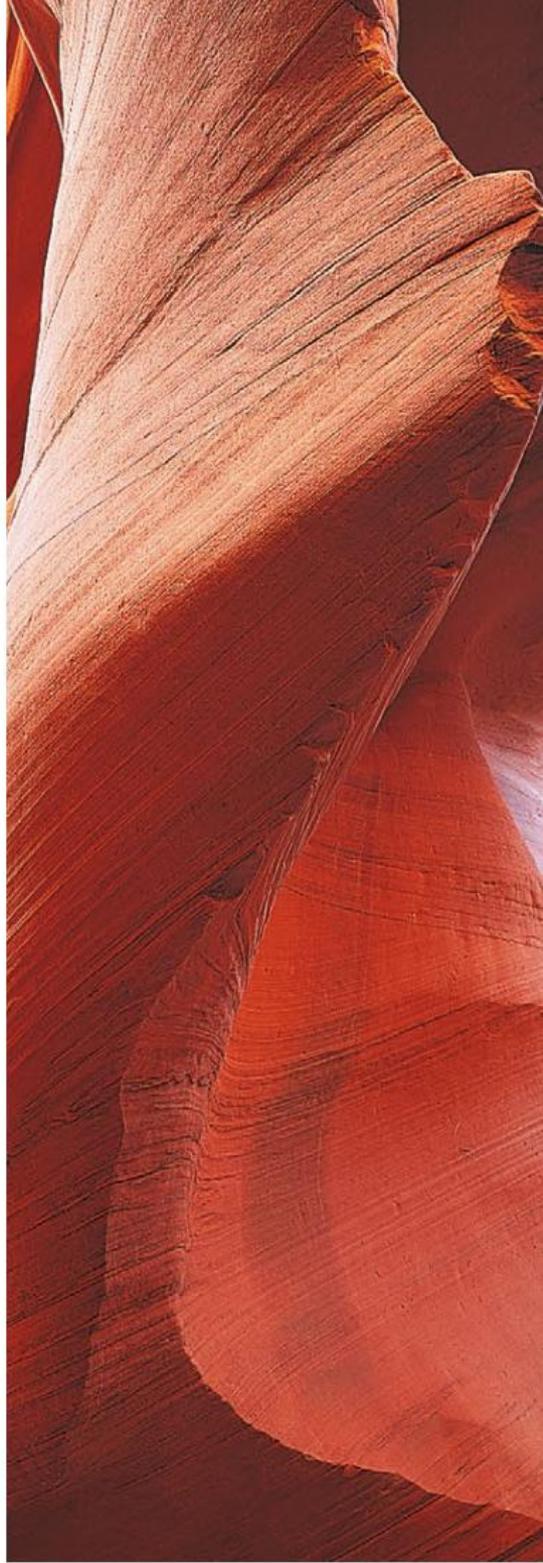
vie des éléments récupérés. Financé par des fonds européens, le projet regroupe le BRGM, le CEA, Suez, deux universités néerlandaises – l'Université de technologie de Delft et l'Université de Leiden, et l'entreprise spécialisée allemande **Kollector Magnet Technology**.

Deux autres projets européens auxquels participe le BRGM visent à récupérer les métaux en vue de leur recyclage via des procédés biologiques. Les partenaires du projet H2020 **NEMO** étudient ainsi l'opportunité de récupérer plusieurs éléments présents en faible quantité dans les déchets d'extraction de la mine finlandaise de **Sotkamo**, afin de pouvoir réutiliser le résidu pour l'utiliser comme matériau de construction. Les procédés de biolixiviation sont développés pour mettre en solution, entre autres, le nickel, le cobalt et le cuivre résiduels, puis de nouvelles méthodes sont expérimentées afin de récupérer les éléments mis en solution, ainsi que d'éventuelles traces de terres rares, dans les lixiviats obtenus.

Par ailleurs, dans le cadre du projet H2020 **CROCODILE**, le BRGM développe un procédé de biolixiviation réductrice afin de valoriser le Cobalt contenu dans des limonites, matériau pour lequel il existe à ce jour peu de procédés de traitement économiquement viables. Cette recherche sera l'objet d'une thèse à partir de la rentrée 2021, la gamme des métaux ciblés étant élargie au Nickel et au Scandium, cette dernière étant assimilée aux terres rares.



Les déchets électroniques : un gisement de métaux et de terres rares ©BRGM



SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL



Géosciences pour une Terre durable

brgm

SIÈGE – CENTRE SCIENTIFIQUE ET
TECHNIQUE

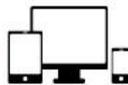
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 Orléans Cedex 2 - France
Tél. : (33) 2 38 64 3434

www.brgm.fr



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



ACCÉDEZ AU SITE WEB
EN FLASHANT CE CODE