



Les terres rares, un enjeu contemporain majeur mais méconnu

par **Cyrielle Bernard** (Lycée Louis Pasteur, Marmilhat) & **Olivier Dequincey**

Résumé

Présentation générale des caractéristiques, usages, gisements, exploitation et enjeux des terres rares.

En fait,
des terres rares pas si rares
mais surtout peu concentrées…

Table des matières

- Introduction
- Qu'appelle-t-on « terres rares » ?
  - Découverte et identification des terres rares
  - Caractéristiques des terres rares
- Où trouve-t-on les terres rares ?
  - Minéralogie
  - Gisements
- Pourquoi exploiter les terres rares ?
  - Applications
  - Exploitations dans le monde
  - Limites de l'exploitation des terres rares
  - Des éléments recyclables ?
- Bibliographie

Les terres rares, désignées par l'acronyme REE, s
un groupe de métaux aux propriétés voisines
comprenant le scandium $_{21}$Sc, l'yttrium $_{39}$Y et les q
lanthanides. Ces métaux sont, contrairement à ce
suggère leur appellation, assez répandus dans la c
terrestre, à l'égal de certains métaux usuels.

Introduction

Vous ne le savez peut-être pas, mais vous interagissez avec des terres rares tous les jours. En fait, en utilisant votre smartphone ou votre ordinateur pour lire cet article, peut-être à la lumière de vos ampoules LED, en ayant chaussé vos lunettes, vous utilisez les terres rares. L'appellation « terres rares » fait référence à un groupe de métaux aux propriétés physiques similaires.

Ces métaux sont critiques dans notre société, car ils ont de très nombreuses applications, notamment dans les énergies renouvelables, et les gisements restent relativement peu nombreux dans le monde. Les enjeux scientifiques, économiques, politiques et sociétaux concernant les terres rares sont donc extrêmement nombreux et importants, et pourtant peu de personnes savent exactement ce dont il s'agit.

Essayons donc d'y voir plus clair sur ce groupe d’éléments en passant par l'histoire des sciences, les propriétés de ces matériaux, et leurs usages en lien, notamment, avec la transition énergétique.

Qu'appelle-t-on « terres rares » ?

Découverte et identification des terres rares

Carl Axel Arrhenius (1757-1824), un chimiste suédois amateur de minéralogie [à ne pas confondre avec Svante A. Arrhenius (1859-1927), plus connu, qui a établi la loi montrant la dépendance de la vitesse d'une réaction chimique à la température], se promène en forêt un jour de 1787, et tombe sur une masse noire faite d'un minéral non identifié à l'entrée de la mine d'Ytterby, en Suède. Sans le savoir, il a découvert le premier minéral de terre rare : la gadolinite $(Ce,La,Nd,Y)_2Fe^{2+}Be_2O_2(SiO_4)_2$), formellement identifiée dans un second temps par Johan Gadolin (1760-1852).

Ce nouveau minéral suscite l'intérêt de nombreux scientifiques, dont Friedrich Wölhe (1800-1882) qui parvient à isoler une première terre sous sa forme pure : c'est l'yttrium (Y). Les découvertes s'enchainent alors et 16 éléments sont trouvés et identifiés comme des terres rares, le dernier étant le lutécium (ou lutétium, Lu), mis en évidence par Georges Urbain (1892-1938) en 1907 (Chakhmouradian et Wall, 2012 [3]).

Caractéristiques des terres rares

Les terres rares regroupent donc 16 éléments : les lanthanides, du lanthane – La – au lutécium – Lu, et l'yttrium, Y (figure 1). Certaines classifications ajoutent à cette liste le scandium (Sc), mais son comportement géochimique différant un peu des autres éléments, nous ne l'inclurons pas ici.

Le nom de « terres rares » vient du fait qu'elles se trouvent en petites quantités dans les minéraux. Pour autant, à l'échelle du globe terrestre, elles ne sont pas rares du tout. Par exemple, le cérium (Ce) est respectivement 2,3 et 3,7 fois plus abondant dans la croute continentale supérieure que le cuivre (Cu) et le plomb (Pb) (Rudnick et Gao, 2003 [10]).



1																	18
1 H Hydrogen 1.008	2											13	14	15	16	17	2 He Helium 4.003
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al Aluminum 26.982	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 84.798
37 Rb Rubidium 84.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium 98.907	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.414	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.711	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.904	54 Xe Xenon 131.249
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.328	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.085	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [208.982]	85 At Astatine 209.987	86 Rn Radon 222.018
87 Fr Francium 223.020	88 Ra Radium 226.025	89-103 Actinides	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [278]	110 Ds Darmstadtium [281]	111 Rg Roentgenium [280]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [286]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [289]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [294]	118 Og Oganesson [294]

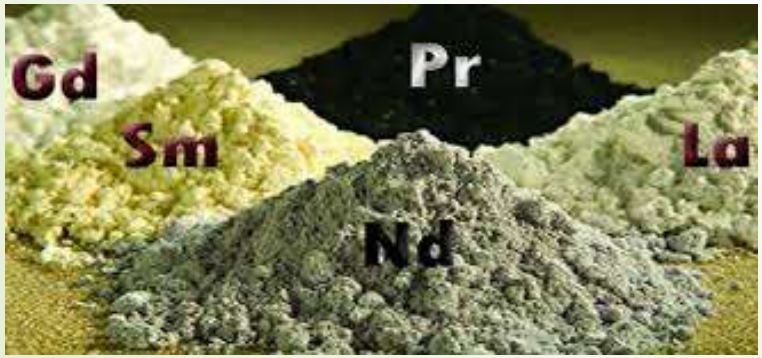
Terres rares légères (LREE)							Terres rares lourdes (HREE)						
57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.243	61 Pm Promethium 144.913	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.055	71 Lu Lutetium 174.967
89 Ac Actinium 227.028	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium 237.048	94 Pu Plutonium 244.064	95 Am Americium 243.061	96 Cm Curium 247.070	97 Bk Berkelium 247.070	98 Cf Californium 251.080	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.095	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.101	103 Lr Lawrencium [262]

Source - © 2020 D'après Bernard [1], modifié

Figure 1. Les terres rares dans le tableau périodique des éléments

Les éléments chimiques qui forment les terres rares sont principalement trivalents (3+), l'exception du cérium (Ce) et de l'europium (Eu) qui peuvent être respectivemen quadrivalent (Ce^{4+}) et divalent (Eu^{2+}). Les terres rares ont toutes un rayon atomiqu relativement petit et une forte charge positive, ce qui les place dans la catégorie des HFSE, o *High Field Strength Elements*, catégorie qui contient également le niobium (Nb), le tantal (Ta), le zirconium (Zr), l'hafnium (Hf), l'uranium (U), le thorium (Th), l'étain (Sn) et le titane (Ti)

Tous ces éléments ont la particularité d'être incompatibles, c'est-à dire qu'ils rentren difficilement dans les réseaux cristallins lors du refroidissement d'un magma, et sont don particulièrement concentrés dans les derniers jus magmatiques (Linnen *et al.*, 2014 [6]).





On différencie deux catégories au sein des terres rares : les terres rares légères, du lanthane (La) à l'europium (Eu), d'une part, et les terres rares lourdes, du gadolinium (Gd) au lutécium (Lu), auxquels ont ajoute l'Y, d'autre part. Les terres rares montrent une diminution significative de leur rayon atomique et ionique du La vers le Lu du fait d'un faible effet d'écran des électrons de la sous-couche 4f qui ne compensent pas la charge positive croissante du noyau lorsque le numéro atomique augmente (les électrons de valence sont alors de plus en plus "attirés" par le noyau et le rayon atomique diminue).
Cet effet de réduction du rayon atomique est appelé la « contraction des lanthanides », et a plusieurs conséquences, dont la forte densité des lanthanides et leur température de fusion élevée.

Conséquence particulière de cette contraction, les terres rares légères sont plus incompatibles que les terres rares lourdes, ce qui mène à une répartition différente de ces éléments lors de la cristallisation des magmas notamment. La croute étant formée par fusion partielle du manteau, les terres rares légères y sont enrichies par rapport aux terres rares lourdes ; c'est l'inverse dans le manteau supérieur. Cette différence de comportement est également exploitée dans l'industrie.

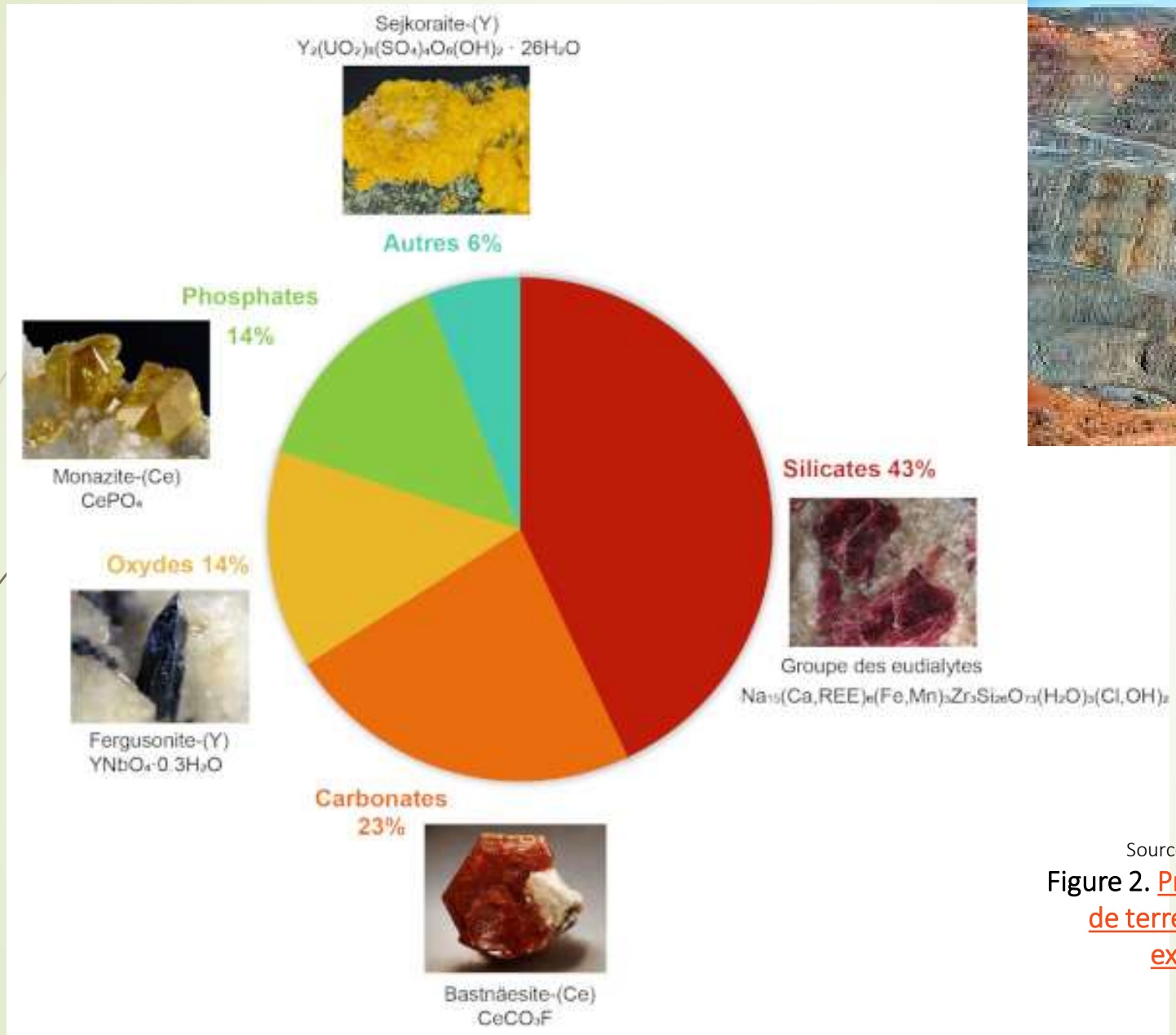
Où trouve-t-on les terres rares ?

Minéralogie

Les terres rares se retrouvent surtout en traces dans de nombreux minéraux (figure 2). Les terres rares légères sont principalement localisées dans des carbonates et des phosphates, et les terres rares lourdes dans des oxydes. Les silicates incorporent toutes les terres rares sans distinction (Kanazawa et Kamitani, 2006 [5]).

On compte toutefois environ 350 minéraux de terres rares actuellement, et 10 d'entre eux sont activement exploités, les principaux étant la bastnaësite-(pour le Ce) ($CeCO_3F$), la monazite-(Ce) ($CePO_4$), et le xénotime-(Y) (YPO_4). La grande majorité des minéraux des terres rares est en réalité composée de 4 d'entre elles : Ce, Y, La et Nd (néodyme).

Enfin, certains minéraux ne se composent pas classiquement de terres rares, mais celles-ci peuvent se substituer à leurs composants en concentrations importantes. Il s'agit notamment de l'apatite [$Ca_5(PO_4)_3(OH,F,Cl)$], du zircon ($ZrSiO_4$) et du groupe des pyrochlores, $A_{2-m}Nb_2O_6$ $_wF_{1-n}$ – avec A = Ca ou Na ; m, w, n indiquant une occupation incomplète des sites.





Source - © 2020 D'après Bernard [1], modifié

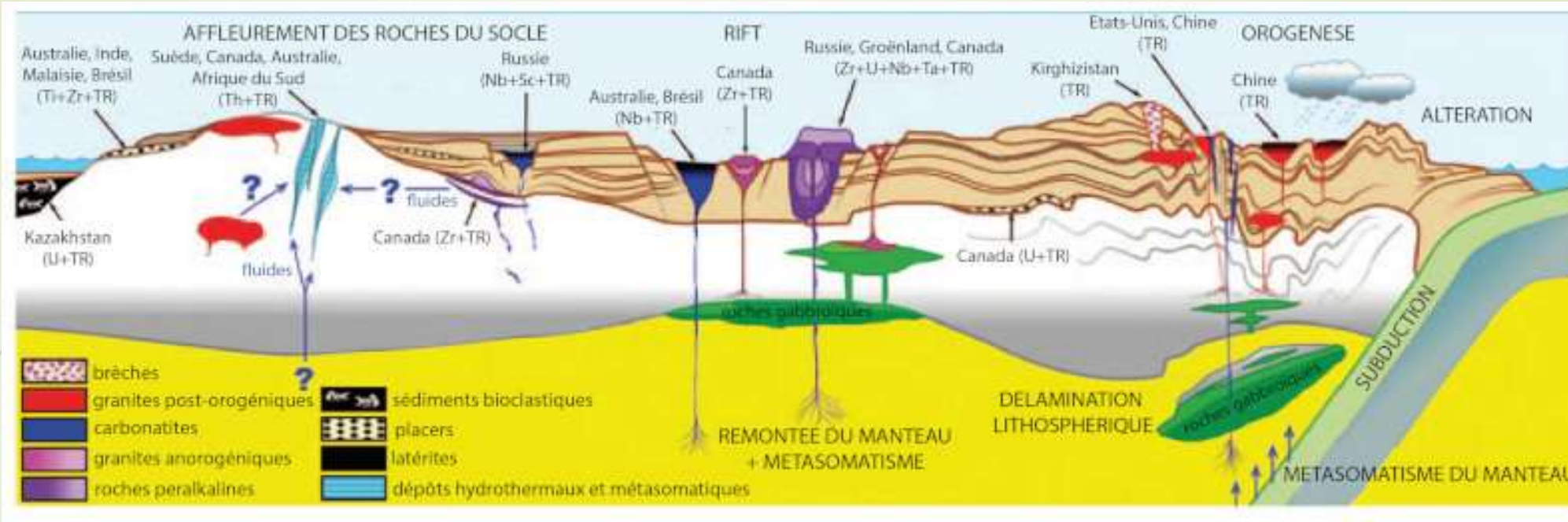
Figure 2. Proportions des familles de minéraux de terres rares, avec photographie d'un exemple pour chaque famille

Gisements



Il existe deux grands types de gisements de terres rares sur Terre : les gisements primaires, magmatiques ou hydrothermaux, et les gisements secondaires, sédimentaires, liés aux remobilisations des éléments des gisements primaires par des fluides (eau et gaz divers à haute pression).

On retrouve dans les gisements primaires de nombreuses roches magmatiques alcalines, des carbonatites et des veines hydrothermales, et, dans les gisements secondaires, des placers, des latérites et des argiles à adsorption d'ions (figure 3). Le type, la quantité et la concentration des terres rares dans ces gisements dépendent de très nombreux paramètres, qui ne sont pas tous contraints à ce jour et qui incluent la source du magma, le degré de fusion partielle, les processus de cristallisation fractionnée, la circulation de fluides et l'altération. En comparaison avec les autres métaux minés, les gisements de terres rares sont globalement à faible teneur et faible tonnage.



Source - © 2012 D'après Chakmouradian et Wall [3], modifié

Figure 3. Les contextes géodynamiques propices à la formation de gisements de terres rares

En France, nous ne connaissons pas de gisement suffisamment concentré en terres rares pour exploité rentablement, mais certains sites pourraient fournir quelques ressources en cas de crise s'agit notamment de la Bretagne, en Ille-et-Vilaine, dans les Côtes-d'Armor et dans le Finistère l'on retrouve de la monazite-(Ce), et de la Guyane. L'exploitant de la carrière de talc de Trimouns Ariège, extrait par ailleurs des terres rares en complément de son activité principale ; on y tro notamment de l'allanite-(Ce) [$CaCeAl_2Fe^{2+}Si_3O_{12}(OH)$], de la bastnaësite-(Ce), et de la synchiste [$CaY(CO_3)_2F$]. Enfin, les recherches continuent, et de nouveaux gisements potentiels s actuellement mis en évidence. C'est le cas d'Evisa en Corse, où un granite alcalin présente concentrations intéressantes en terres rares lourdes (Monnier *et al.*, sous presse [8]).

Pourquoi exploiter les terres rares ?



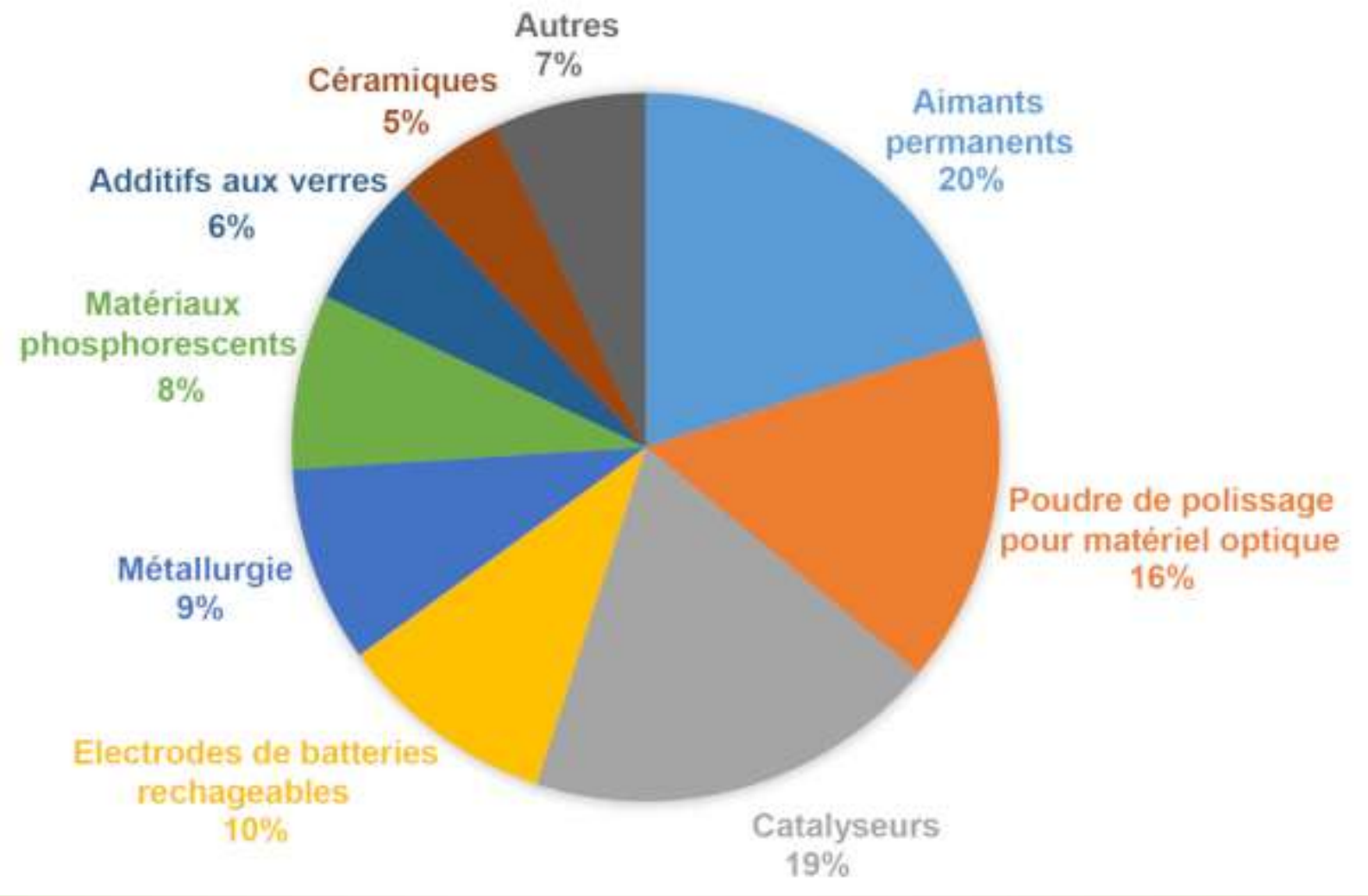
Applications



Les usages “anciens” des terres rares sont la fabrication des pierres à briquet et d manchons des becs Auer pour l’éclairage au gaz. Aujourd’hui, les terres rares so beaucoup utilisées dans les nouvelles technologies et dans le domaine de la transit énergétique pour leurs propriétés magnétiques, luminescentes et d'oxydo-réduction. sont principalement les terres rares lourdes qui présentent ces propriétés, aussi el sont plus recherchées que les terres rares légères. Elles servent en tant qu'aima permanents (composants essentiels des générateurs des éoliennes et des moteurs d voitures électriques), de catalyseurs pour réduire la pollution des pots d'échappeme de poudres de polissage (par exemple pour les verres de lunettes), et dans les électrod de batteries rechargeables (figure 4).



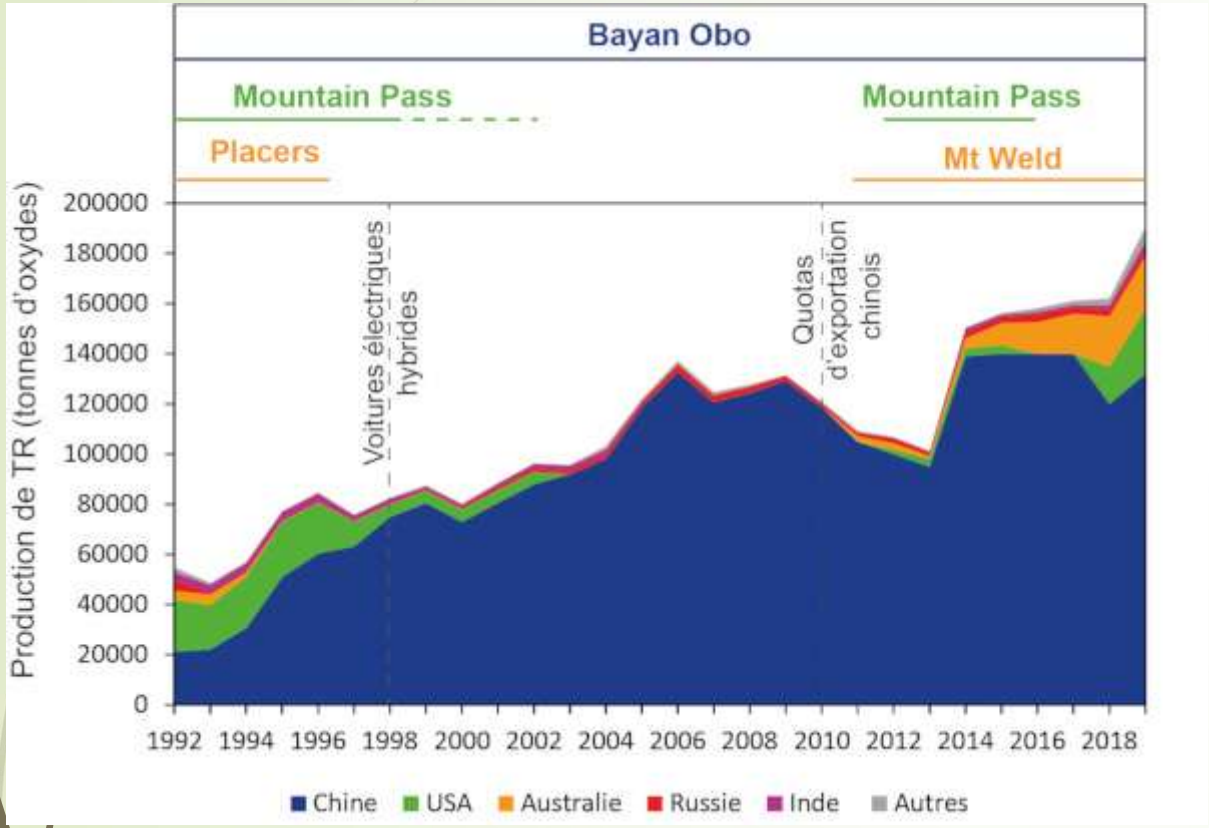
La demande mondiale en terres rares est donc en forte progression (du fait développement des énergies renouvelables et des voitures électriques), mais gisements sont inégalement répartis dans le monde et leur exploitation est limitée, qui les place dans la catégorie des métaux critiques.



Source - © 2025 Bernard, 2020 [1], d'après Lucas et al., 2015 [7], francisé

Figure 4. Principales industries utilisant les terres rares et pourcentage de leur consommation à l'échelle mondiale

Exploitations dans le monde



Source - © 2020 Bernard [1], d'après des données BGS [2], USGS [11] 1998 à 2020, francisé

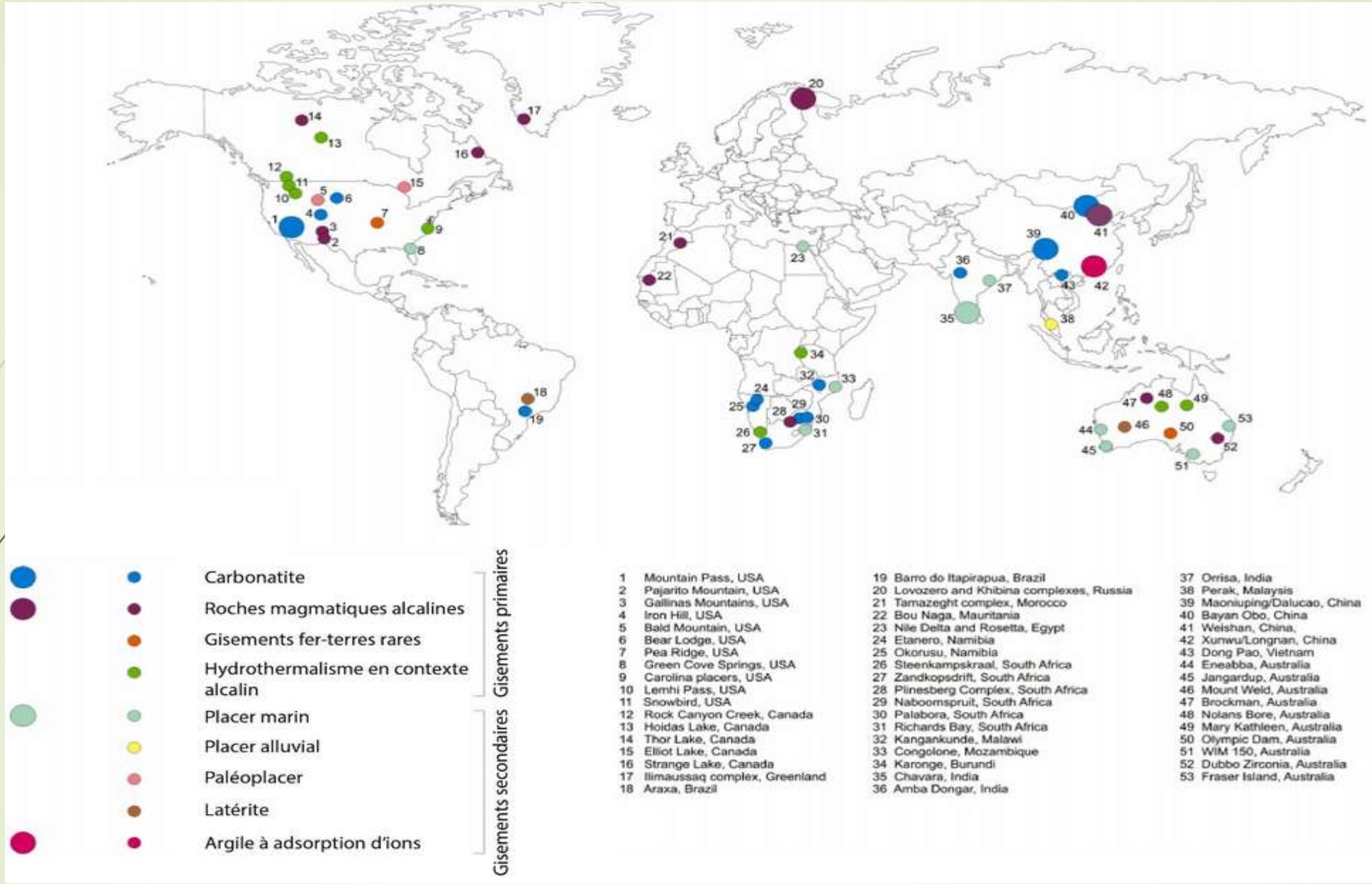
Figure 5. Évolution de la production mondiale de terres rares entre 1992 et 2020

La production des terres rares a explosé depuis le début de leur exploitation dans les années 1950, et les principaux sites d'exploitation évoluent au cours du temps. Les placers d'Australie et d'Inde ont d'abord été les seules sources de terres rares, avant que les États-Unis ouvrent la mine de *Mountain Pass* (Californie), dominant le marché pendant une vingtaine d'années. Cette mine a ensuite dû fermer et la Chine, qui détient de nombreux gisements secondaires de terres rares de type argile à adsorption d'ions, est restée le premier producteur mondial depuis les années 80, fournissant jusqu'à 90 % des terres rares extraites à l'échelle globale (figure 5).

En 2010 et 2011, en prétextant un intérêt pour la préservation de l'environnement, la Chine a imposé des quotas d'exportation, ce qui a fait flamber le prix des terres rares et a incité les autres pays à plus d'indépendance vis-à-vis de ces ressources. Les recherches de nouveaux gisements se sont multipliées, et de nombreuses mines ont alors vu le jour (figure 6). Les gisements secondaires de Chine étant particulièrement riches en terres rares légères, ces nouvelles prospections se sont concentrées sur la maximisation du taux de terres rares lourdes, qui ont plus d'applications industrielles que les légères.

Encore aujourd'hui, la grande majorité des gisements exploités sont des gisements secondaires ou des carbonatites, tous assez peu concentrés en terres rares lourdes. Les granitoïdes alcalins représentent une petite partie de ces exploitations, mais ont l'avantage d'être plus concentrés en terres rares lourdes.
À suivre…

On estime actuellement que le Brésil et le Vietnam détiennent les plus grandes réserves de terres rares après la Chine, mais ces pays n'ont pour l'instant pas investi dans l'exploitation et la production de ces métaux.



Source - © 2018 D'après Elliott et al. [4], modifié

Figure 6. Carte de la répartition mondiale des mines et des gisements de terres rares, ainsi que leur nature

Limites de l'exploitation des terres rares

Malgré le fait que les terres rares sont largement utilisées dans la transition énergétique, elles ne font pas exception aux problématiques générales du secteur minier. Le fait de creuser à la recherche de ces métaux critiques mène à la destruction des paysages et des écosystèmes locaux, et les produits chimiques utilisés pour séparer les terres rares du reste des autres éléments sont parfois directement injectés dans la roche, ou sont rejetés dans les cours d'eau. Cela est particulièrement visible en Chine, où les petites exploitations sauvages se multiplient malgré les efforts officiels du gouvernement pour les limiter.

Les terres rares seules ne posent pas de souci majeur de santé, mais leur exploitation implique la production de beaucoup de poussières riches en métaux lourds, ce qui augmente le risque de cancer pour les mineurs et les populations locales. En outre, faisant partie de la famille des HFSE, les terres rares sont souvent trouvées en association avec les autres métaux de ce groupe qui eux peuvent être toxiques, comme l'uranium et le thorium. Il est donc important d'avoir en tête les pour et les contre de l'exploitation des terres rares, afin de ne pas voir complètement la vie en rose concernant le développement des énergies vertes (pas plus que pour les autres usages plus anciens) !

Des éléments recyclables ?



On pourrait se tourner vers le recyclage des terres rares pour conserver les avantages de leur utilisation sans les désavantages de leur exploitation. Bien qu'il soit techniquement possible, le recyclage ne concernait que 1 % des terres rares minées en 2015 (Mueller et al., 2015 [9]).
Plusieurs hypothèses sont évoquées pour expliquer ce chiffre, très faible, parmi lesquelles la grande durée de vie des objets contenant beaucoup de terres rares, l'absence de régulation, le manque d'information aux particuliers sur les autorités compétentes pour ce recyclage, l'absence de suivi par les vendeurs, la faible teneur en terres rares dans la plupart des objets, l'impossibilité de recycler une terre rare seule (les techniques utilisées permettent seulement d'isoler les terres rares légères et lourdes, mais pas un seul élément), et le cout énergétique et économique de ce recyclage qui dépasse souvent celui d'un nouvel approvisionnement.

Le recyclage des terres rares est donc techniquement possible, mais doit être amélioré et contrôlé avant de devenir la norme.

Bibliographie

C. Bernard, 2020. *Concentration et fractionnement des terres rares dans les complexes alcalins : le rôle des fluides*, thèse de doctorat, Univ. Toulouse 3, 330p [Acc en ligne]

British Geological Survey, 1998. *World Mineral Production 1992-1996*, *World mineral statistics*

A.R. Chakhmouradian, F. Wall, 2012. *Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets (and More)*, Elements, 8, 5, 333-340]pdf]

H.A.L. Elliott, F. Wall, A.R. Chakhmouradian, P.R. Siegfried, S. Dahlgren, S. Weatherley, A.A. Finch, M.A.W. Marks, E. Dowman, E. Deady, 2018. Fenites Associated w Carbonatite Complexes: A Review, Ore Geology Reviews, 93, 38-59 [open access]

Y. Kanazawa, M. Kamitani, 2006. Rare Earth Minerals and Resources in the World, Journal of Alloys and Compounds, 408-412, 1339-1343

R.L. Linnen, I.M. Samson, A.E. Williams-Jones, A.R. Chakhmouradian, 2014. *13.21 - Geochemistry of the Rare-Earth Element, Nb, Ta, Hf, and Zr Deposits*, *in* H Holland, K.K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, Elsevier, Oxford, 543-568 [pdf]

J. Lucas, P. Lucas, T. Le Mercier, A. Rollat, W.G. Davenport, 2015. *Rare Earths: Science, Technology, Production and Use*, Elsevier, 410p

L. Monnier, O. Laurent, S. Salvi, C. Bernard, M. Leisen, E. Estrade, P. de Parseval, C. Josse, A. Descamps-Mandine, Z. Duan, S. Gouy, C. Passos do Carmo, C. Dusséa sous presse. Of zircons and zircons: The tumultuous story of Zr-Hf and REE during cooling of the Evisa peralkaline rare-metal granite (Corsica, France), Geochim et Cosmochimica Acta

S.R. Mueller, P.A. Wäger, R. Widmer, I.D. Williams, 2015. A Geological Reconnaissance of Electrical and Electronic Waste as a Source for Rare Earth Metals, Wa Management, 45, 226-234 [open access]

R.L. Rudnick, S. Gao, 2003. 3.01 - Composition of the Continental Crust, Treatise On Geochemistry, 3, 1-64 [pdf]

U.S. Geological Survey, 2019. *Mineral Commodity Summaries 2019*, *Mineral Commodity Summaries* [pdf]



Merci pour votre attention



