

L'alimentation des terres rares

1. PREAMBULE

UTB le 28 février 2022

- Les **terres rares** sont un groupe de métaux aux propriétés voisines comprenant le scandium₂₁Sc, l'yttrium₃₉Y et les quinze lanthanides.
- Ces métaux sont, contrairement à ce que suggère leur appellation, assez répandus dans la croûte terrestre, à l'égal de certains métaux usuels. Leur teneur varie entre 0,5 et 70ppm masse selon les éléments. L'abondance du cérium est ainsi d'environ 48 ppm comparable à celle du cuivre mais bien supérieure à celle de métaux tels que le cobalt ou du l'indium.
- Le lutécium, la moins abondante des terres rares, l'est 7 fois plus que l'argent. L'abondance relative des lanthanides diminue progressivement avec l'augmentation de leur numéro atomique (voir figure abondance des terres rares). Un élément possédant un numéro atomique pair est plus abondant que celui possédant un numéro atomique impair adjacent. Cela donne une courbe décroissante en dents de scie.
- Sous forme élémentaire, les terres rares ont un aspect métallique et sont assez tendres, malléables et ductiles. Ces éléments sont chimiquement assez réactifs, surtout à des températures élevées ou lorsqu'ils sont finement divisés.

Tableau périodique de Mendeleïev

Légende:																	
Hydrogène 1 H																	Hélium 2 He
Lithium 3 Li	Béryllium 4 Be											Bore 5 B	Carbone 6 C	Azote 7 N	Oxygène 8 O	Fluor 9 F	Néon 10 Ne
Sodium 11 Na	Magnésium 12 Mg											Aluminium 13 Al	Silicium 14 Si	Phosphore 15 P	Soufre 16 S	Chlore 17 Cl	Argon 18 Ar
Potassium 19 K	Calcium 20 Ca	Scandium 21 Sc	Titane 22 Ti	Vanadium 23 V	Chrome 24 Cr	Manganèse 25 Mn	Fer 26 Fe	Cobalt 27 Co	Nickel 28 Ni	Cuivre 29 Cu	Zinc 30 Zn	Gallium 31 Ga	Germanium 32 Ge	Arsenic 33 As	Sélénium 34 Se	Brome 35 Br	Krypton 36 Kr
Rubidium 37 Rb	Strontium 38 Sr	Yttrium 39 Y	Zirconium 40 Zr	Niobium 41 Nb	Molybdène 42 Mo	Technétium 43 Tc	Ruthénium 44 Ru	Rhodium 45 Rh	Palladium 46 Pd	Argent 47 Ag	Cadmium 48 Cd	Indium 49 In	Étain 50 Sn	Antimoine 51 Sb	Tellure 52 Te	Iode 53 I	Xénon 54 Xe
Césium 55 Cs	Baryum 56 Ba	*	Hafnium 72 Hf	Tantale 73 Ta	Tungstène 74 W	Rhénium 75 Re	Osmium 76 Os	Iridium 77 Ir	Platine 78 Pt	Or 79 Au	Mercur 80 Hg	Thallium 81 Tl	Plomb 82 Pb	Bismuth 83 Bi	Polonium 84 Po	Astato 85 At	Radon 86 Rn
Francium 87 Fr	Radium 88 Ra	**	Rutherfordium 104 Rf	Dubnium 105 Db	Seaborgium 106 Sg	Bohrium 107 Bh	Hassium 108 Hs	Méitnerium 109 Mt	Darmstadtium 110 Ds	Roentgenium 111 Rg	Copernicium 112 Cn	Ununtrium 113 Uut	Ununquadium 114 Uuq	Ununpentium 115 Uup	Ununhexium 116 Uuh	Ununseptium 117 Uus	Ununoctium 118 Uuo
* Lanthanides:																	
Lanthane 57 La	Cérium 58 Ce	Praséodyme 59 Pr	Néodyme 60 Nd	Prométhium 61 Pm	Samarium 62 Sm	Europium 63 Eu	Gadolinium 64 Gd	Terbium 65 Tb	Dysprosium 66 Dy	Holmium 67 Ho	Erbium 68 Er	Thulium 69 Tm	Ytterbium 70 Yb	Lutécium 71 Lu			
** Actinides:																	
Actinium 89 Ac	Thorium 90 Th	Protactinium 91 Pa	Uranium 92 U	Neptunium 93 Np	Plutonium 94 Pu	Américium 95 Am	Curium 96 Cm	Bériélium 97 Bk	Californium 98 Cf	Einsteinium 99 Es	Fermium 100 Fm	Mendéliévium 101 Md	Nobélium 102 No	Lawrencium 103 Lr			

- Les terres rares sont classées en deux familles correspondant à leur répartition naturelle dans les minerais. La nomenclature la plus communément acceptée est : –
 - terres rares légères LRE (Light Rare Earths), parfois appelées cériques : lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, samarium.
 - terres rares lourdes HRE (Heavy Rare Earths), parfois appelées yttriques : europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, lutécium, auxquelles l'yttrium est ajouté.
- Les terres rares légères sont les plus abondantes, les mieux réparties, et également les plus utilisées. Les terres rares lourdes sont en revanche réservées à des applications de plus petits volumes (éclairage, domaine médical...) ou utilisées en co-dopants ; elles sont en général moins disponibles et plus coûteuses.

2. Les origines

- L'aventure débute en 1787, lorsqu'un minéralogiste amateur suédois, lieutenant d'artillerie de son état, Carl Axel Arrhenius, visite les carrières de feldspath d'Ytterby et y découvre un minerai noir qu'il nomme « ytterbite » : un nouvel oxyde est alors identifié qui prendra le nom d'*yttria* et *yttrium* pour l'élément qui lui correspond. En 1803, le cérium est identifié indépendamment en Allemagne par Martin Heinrich Klaproth et en Suède par Jöns Jacob Berzelius et Wilhelm Hisinger.
- Leur nom de terres rares vient du fait qu'on les a découverts à la fin du xviii^e siècle et au début du xix^e siècle dans des minerais peu courants à cette époque et à l'exploitation commerciale rendue compliquée par le fait que ces minerais étaient éparpillés et les terres difficiles à séparer les unes des autres. Le nom de « terres » était utilisé à l'époque en français (langue des échanges internationaux). « terres rares » signifiait donc « minerais rares ».
- En raison de leurs propriétés géochimiques, elles sont réparties très inégalement à la surface de la Terre, le plus souvent en deçà des concentrations rendant leur exploitation minière économiquement viable.
- Comme les terres rares ont des propriétés chimiques très voisines, on les trouve en mélange dans un même minerai et il est difficile de les séparer.
- Les techniques de séparation par cristallisation fractionnée sont développées par Paul-Émile Lecoq de Boisbaudran ou Georges Urbain au début du XIX^e siècle.
- La chimie des terres rares est depuis cette époque une tradition française : au niveau de la recherche, un laboratoire des terres rares est fondé par Urbain dans les années 1930 à l'École nationale supérieure de chimie de Paris et repris par deux de ses anciens élèves, Paul Job et Félix Trombe, puis un deuxième laboratoire à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris, repris et dirigé par un de ses élèves Georges Champetier ; au niveau industriel, l'usine de La Rochelle du groupe Rhodia fut la plus grande usine de séparation des terres rares.
- Il aura fallu plus d'un siècle pour mettre au point des procédés d'extraction et apprendre comment exploiter leurs propriétés chimiques, physiques et électroniques exceptionnelles. Des propriétés que les lanthanides tirent essentiellement de la configuration électronique particulière de leurs atomes

3 Les minéraux

- Deux minéraux représentent l'essentiel des réserves mondiales de terres rares :
- la bastnäsite (Ln , Sc ,Y,CO₃F), essentiellement en Chine et aux États-Unis ;

- la monazite, essentiellement en Australie, au Brésil, en Chine, en Inde, en Malaisie, en Afrique du Sud, au Sri Lanka, en Thaïlande et aux États-Unis, déclinée en quatre variétés selon leur composition chimique (les éléments indiqués entre parenthèses sont les plus abondants par concentration décroissante) :
 - « monazite-Ce » (Ce ,La ,Pr ,Nd ,Th ,Y)PO₄ ;
 - « monazite-La » (La ,Ce ,Nd ,Pr)PO₄ ;
 - « monazite-Nd » (Nd, La , Ce ,Pr)PO₄ ;
 - « monazite-Pr » (Pr ,Nd ,Ce ,La)PO₄.
- Il existe encore 10 autres minéraux qui contiennent parfois encore assez d'éléments mineurs pour être exploités.
- On distingue des terres rares dites légères et des terres dites lourdes.

4 Gisements et production

- Utilisées depuis longtemps dans les pierres à briquet (travaux de Carl Auer Von Welsbach sur un alliage de terres rares, le mischmétal), les terres rares sont difficiles à extraire et doivent attendre le projet Manhattan pour être produites en grande quantité, le chimiste canadien Frank Spedding mettant au point des techniques de séparation par échange d'ions sur résines qui permettent d'obtenir des terres rares à l'état pur.
- En raison de leurs usages multiples, souvent dans des domaines de haute technologie revêtant une dimension stratégique, les terres rares font l'objet d'une communication restreinte de la part des États, de sorte que les statistiques macroéconomiques à leur sujet demeurent très lacunaires. Les réserves mondiales en oxydes de terres rares étaient estimées par l'Institut d'études géologiques des États-Unis à 120 millions de tonnes fin 2018, détenues:
 - à 37 % par la Chine,
 - devant le Brésil (18 %),
 - le Viêt Nam (18 %),
 - la Russie (10 %),
 - l'Inde (6 %),
 - l'Australie (2,8 %),
 - les États-Unis (1,2 %), etc.
- La Chine estime quant à elle détenir seulement 30 % des réserves mondiales de terres rares, bien qu'elle fournisse 90 % des besoins de l'industrie, elle se penche sur les techniques de recyclage de ces terres rares dans les déchets électroniques.
- La production mondiale d'oxydes de terres rares de la Chine s'est élevée à environ 120 000 t en 2018 sur une production mondiale de 170 000 t, soit plus de 70 % du total mondial ; l'Australie, deuxième producteur, n'en a extrait que 20 000 t (12 %), les États-Unis 15 000 t (9 %), le Myanmar 5 000 t (3 %), la Russie 2 600 t (1,5 %), etc.

5 Réserve potentielle

- Selon le quotidien *Liberté-Algérie*, l'Algérie renfermerait dans son sous-sol 20 % des réserves mondiales de terres rares.
- Les réserves de terres rares sont difficiles à évaluer. En juillet 2011, des scientifiques japonais ont annoncé avoir trouvé une nouvelle réserve de terres rares dans les eaux internationales du Pacifique (à 1 850 kilomètres au sud-est de Tokyo), qui pourrait porter le niveau de réserve connue actuelle à environ 100 milliards de tonnes, réparties sur 78 sites à des profondeurs de 3 500 à 6 000 mètres. Même si cette découverte est intéressante étant donné la demande grandissante de ces matériaux, l'extraction pose des problèmes environnementaux importants et ne pourrait commencer que vers 2023.
- En juin 2012, une première expédition a étudié les fonds marins de l'île Minamitori. (menée par la JAMSTEC).
- En janvier 2013, une seconde expédition a suivi. En mars 2013, les chercheurs annoncent que des échantillons de sédiments vaseux prélevés à 5 800 mètres de profondeur présentent une concentration de terres rares vingt à trente fois plus élevée que celle des mines chinoises.
- En avril 2018, dans la revue *Nature*, ils estiment que ces gisements représentent sur 2 500 km² environ 16 millions de tonnes de terres rares, à plus de 5 000 mètres de profondeur. Selon une publication d'avril 2018 dans la revue *Scientific Reports*, sur ces 2 500 km², le fond recèlerait une quantité équivalente à 780 ans d'approvisionnement mondial en yttrium, 620 ans pour l'euporium, 420 ans pour le terbium, et 730 ans pour le dysprosium.

6 L'utilisation

- Il faut attendre le projet Manhattan, dans les années 1940, pour que les terres rares soient purifiées à un niveau industriel.
- Ces métaux s'avèrent extrêmement précieux aux vues de leurs caractéristiques très performantes. On leur a ainsi trouvé dans les années 70 une utilisation de masse à travers la fabrication des écrans de téléviseurs.
- Du point de vue de l'économie mondiale, les terres rares font désormais partie des matières premières stratégiques.

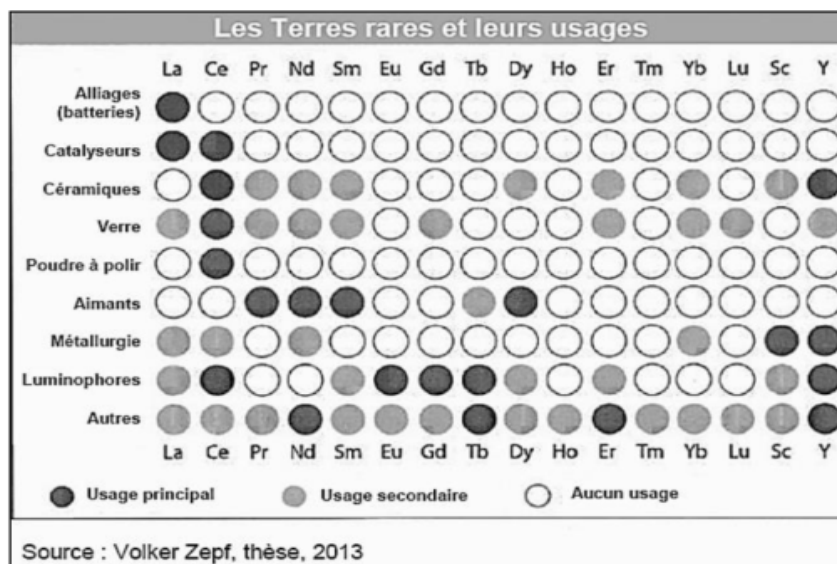
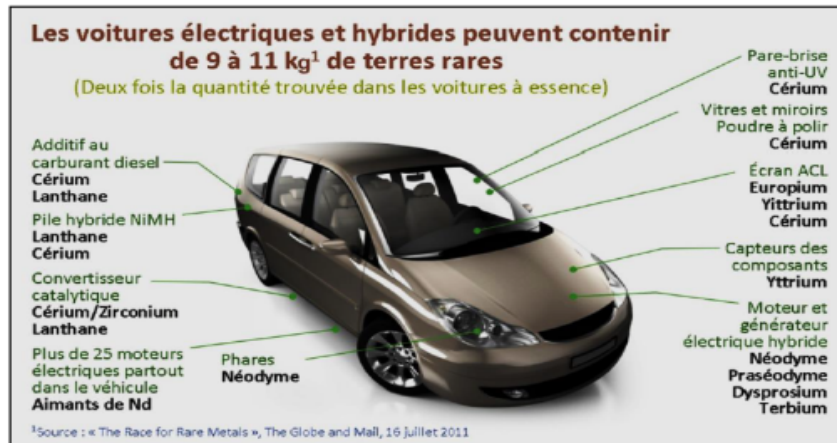
Les mille et un usages des terres rares

<https://mern.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/2016-10/terres-rares.asp>

Les éléments des terres rares se trouvent dans les aimants, les téléphones portables, les pots catalytiques, les radars, les céramiques, le verre, les piles rechargeables, les fluorescents, les lampes DEL, les écrans vidéo, les disques compacts et les mémoires d'ordinateur... On les utilise en électronique, en métallurgie, en radiographie, en imagerie par résonance magnétique, en aérospatiale, dans l'éolien et le nucléaire. Les voitures électriques et hybrides en sont particulièrement gourmandes : au moins une quinzaine de kilogrammes dans chaque véhicule. Bref, pas de haute technologie sans terres rares !

Extraits de la présentation : [Fascinantes terres rares : que sont-elles et à quoi servent-elles?](https://mern.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/fascinantes_terres_rares.pdf)

https://mern.gouv.qc.ca/wp-content/uploads/fascinantes_terres_rares.pdf



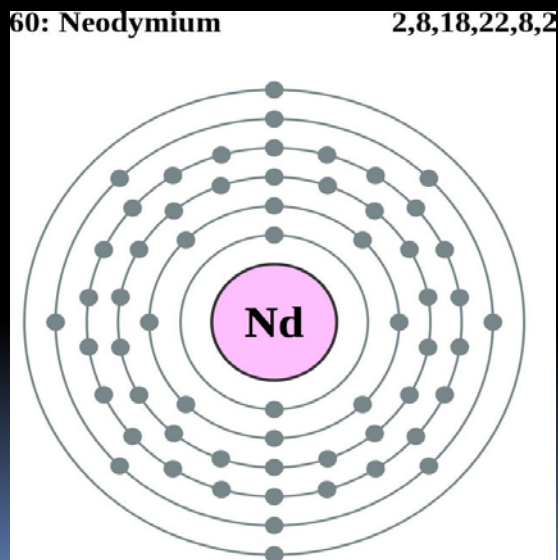
- L'une des applications les plus réputées des terres rares est liée à leurs propriétés magnétiques, en particulier celles du néodyme, du praséodyme, du dysprosium, du samarium ou encore du gadolinium. Les terres rares se trouvent dans les aimants permanents. Ceux-ci sont plus petits et plus stables que les aimants normaux à une puissance équivalente, et s'usent donc beaucoup moins vite en ne perdant que seulement 1% de leur puissance tous les 10 ans.
- Par exemple, la comparaison entre plusieurs types d'aimants montre qu'un aimant classique de ferrite est 7 fois moins puissant qu'un aimant de samarium et 10 fois moins qu'un aimant de néodyme
- Le développement de ces aimants permanents particulièrement efficaces, a favorisé leur diffusion. On les retrouve aujourd'hui partout : des moteurs électriques miniaturisés aux générateurs d'éoliennes, des systèmes d'enregistrement magnétique haute densité aux appareils d'imagerie médicale.

- La transition énergétique repose ainsi aujourd'hui en grande partie sur le développement de technologies exploitant ces éléments : supraconducteurs à haute température, céramiques et alliages en milieux extrêmes, batteries alcalines équipant les véhicules électriques hybrides.

7. Un exemple: l'utilisation du Néodyme

- Médicaments : le néodyme a été utilisé avec d'autres sels de terres rares et comme le thorium dans des produits pharmaceutiques à usage gynécologique comme les « ovules néothorium Millot » dans les années 1920-1930.
- Pierre à briquet : le néodyme entre dans la composition du mischmétal, base des pierres à briquet.
- Colorant du verre: en combinaison avec le praséodyme, il colore les verres de protection solaire et les lunettes de soudeur.
- Colorant pour céramiques : suivant le sel utilisé, on obtient du bleu jusqu'au mauve.
- Tubes cathodiques : entre dans la composition des luminophores rouges.
- Électronique : diélectrique pour les condensateurs « céramique ».
- Il est également utilisé comme milieu amplificateur dans de nombreux lasers, emprisonné dans du grenat d'yttrium et d'aluminium (Laser Nd-YAG) ou dans du verre, voire dans de la silice pure.
- Autres utilisations :
 - dans les aimants permanents, en alliage avec le fer $Nd_2Fe_{14}B$ car ils sont extrêmement puissants mais assez fragiles. La plupart des aimants en néodyme possèdent une fine couche de nickel-cuivre-nickel afin de les protéger contre la corrosion. Ils sont utilisés :
 - dans les générateurs de certaines éoliennes, essentiellement offshore,
 - dans les moteurs électriques et les générateurs de certaines voitures hybrides.
 - dans les moteurs brushless des 2 roues électriques (trottinettes électriques, VAE, EDP)
 - dans le moteur de nombreux transducteurs utilisés aussi bien dans les microphones dynamiques, les casques stéréo que les haut-parleurs des enceintes acoustiques de sonorisation ou pour usage domestique,
 - dans les disques durs, pour constituer le moteur qui assure le positionnement des têtes de lecture/écriture,
 - à des fins récréatives, pour pratiquer la pêche à l'aimant ;
 - comme catalyseur dans l'industrie du pétrole ;
 - comme traceur de l'activité des résidus de retraitement des combustibles nucléaires usagés à l'usine d'Areva NC de La Hague ;
 - Dans tous les aimants des smartphones.
 - pour certains tours de magie de close-up (Dominique Duvivier).

Répartition des électrons de Néodium



8. Autres utilisations des métaux rares

- On utilise par ailleurs les métaux rares dans l'optique pour les lasers monochromatiques de grande puissance mais également dans l'optoélectronique pour leurs propriétés de photoluminescence.
- Enfin, les propriétés chimiques de l'oxyde de cérium, un des lanthanides, sont particulièrement utilisées pour la régulation des polluants dans les pots catalytiques, la production d'hydrogène par transformation de la biomasse ou encore le polissage des verres.
- Il faut aussi souligner l'utilisation dans le domaine de la défense en particulier pour les missiles (*Patriot* par exemple). L'augmentation du budget de la défense sous l'ère de Donald TRUMP, a mis en exergue la dépendance des USA pour ces produits.

L'utilisation dans le domaine de la défense aux USA

- En effet dans le domaine de la défense, les applications sont nombreuses mais à ce jour, seuls les USA en ont publié un aperçu.
- Les aimants permanents sont employés dans les systèmes de guidage des drones *Prédator*, les smart bombs, les missiles guidés à tête chercheuse et les missiles de croisière *Tomahawk*.
- On les retrouve dans les moteurs électriques des véhicules de combat terrestre, certains navires et avions de chasse type Joint Strike Fighter.

- On les utilise également pour les systèmes d'armes et de ciblage à distance, les lasers longue portée, les désignateurs de cible pour les chars d'assaut et les avions de combat
- Les technologies de transmission et de positionnement satellitaire, les radars, les sonars et les systèmes de transmission vidéo et données numériques;
- Des emplois également dans le domaine de la furtivité et des piles à combustibles;
- Les applications sont omniprésentes dans toutes les technologies de pointe des armes modernes.

9 Production polluante et peu rentable

- Les conditions d'exploitation et de production des terres rares sont toutefois sujettes à controverse. Les minerais de terres rares se présentent sous la forme de mélange de ces différents éléments, or les propriétés chimiques des lanthanides sont très proches ce qui rend difficile leur séparation.
- Les méthodes de séparation utilisées aujourd'hui font appel à des procédés complexes – extraction liquide-liquide, résines échangeuses d'ions, etc. – et notoirement polluants : rejets d'acides, de bases, de solvants, de métaux lourds ou de déchets radioactifs. Les procédés d'extraction utilisent beaucoup d'eau ce qui pénalisent les pays en stress hydrique tel que l'Australie.
- La production industrielle des terres rares s'est progressivement concentrée en Chine au cours des 25 dernières années.
- Le principal gisement de terres rares exploité aujourd'hui est celui de Bayan-Obo, en Mongolie Intérieure (Chine), ouvert au milieu des années quatre-vingt. Ce gisement a des réserves estimées à 45 millions de tonnes. La mine extrait de la bastnaésite et de la monazite comme sous-produits d'une mine de fer, avec des teneurs de l'ordre de 5 % en terres rares. Elle produit environ 55 000 t/an d'oxydes de terres rares, principalement des légères.
- Dans le cas des terres rares lourdes, l'extrême majorité est exploitée depuis le milieu des années 1990, à partir des gisements d'argiles ioniques, uniquement présentes dans le sud-est de la Chine,.

Mine de Bayan Obo, région autonome de la Mongolie intérieure :

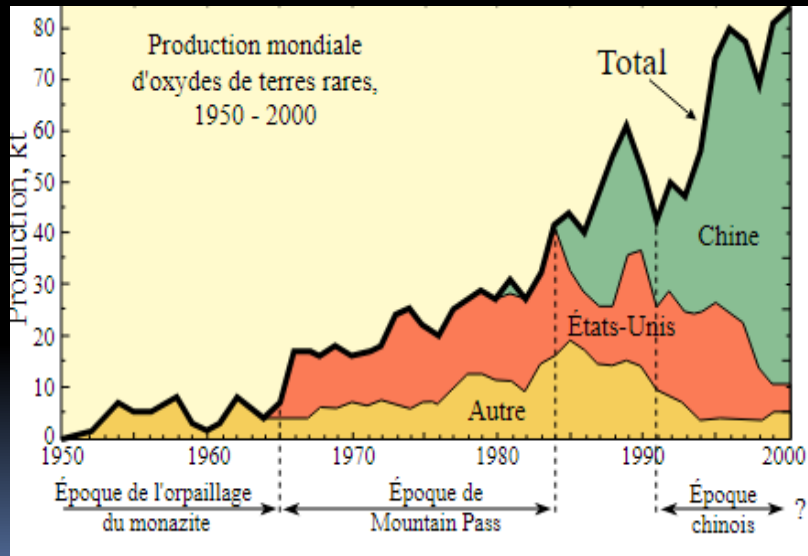


- Les normes environnementales, les coûts de production élevés et les faibles concentrations en métaux rares de certains gisements ont conduit les pays industrialisés à abandonner progressivement cette production peu rentable. Ils ont donc dû s'approvisionner auprès de fournisseurs étrangers (notamment en Chine), contribuant ainsi à la mise en place de monopoles.
- Aujourd'hui, l'intérêt stratégique de ces éléments pousse les dirigeants et les industriels à repenser les modes d'approvisionnement de ces métaux et à leur chercher des produits de remplacement.

10 Chronologie de l'exploitation des terres rares

- 1940 1ère utilisation (projet Manhattan)
- Avant 1965. moins de 10000t/an Afrique du sud, Brésil et Inde.
- 1965 à 1985 leadership des USA :50000t/an
- Mine de Mountain Pass (à 2h en voiture de Las Vegas) exploitée par la société Molycorp
- Cette mine a causé des dégâts environnementaux considérables affectant les écosystèmes aux environs du site.
- Un bassin circulaire de décantation de plusieurs centaines de mètres au milieu du désert. Beaucoup d'incidents : fuite de 1,5 million de litres en 1992.
- Pollution des nappes phréatiques: uranium, manganèse ,strontium, cerium , baryum, thallium, arsenic et plomb.
- Actions judiciaires nombreuses. Nombreuses amendes.
- Parallèlement, la Chine qui exploitable plusieurs sites en Mongolie intérieure et dans le sud à Jiangsu sans précaution environnementale, comprend l'intérêt stratégique futur des métaux rares et commence à appliquer des prix de dumping. Prix de revient en Chine 2,8\$/kg , plus de double à Mountain Pass
- 1990 Molycorp s'interroge sur la poursuite de l'exploitation
- 2002. Après avoir vécu sur les réserves pendant plusieurs années, Molycorp arrête l'exploitation de Mountain Pass
- 2001 Achat par un financier Nicholos CURTIS en Australie d'une mine prometteuse MOUNT WELD. Création d'une société LYNAS. Cette société comprend rapidement que la compétition avec la Chine ne sera pas possible.
- 2008. La crise financière arrête le projet

L'hégémonie de la Chine



11 L'occident se défousse sur la Chine pour l'exploitation des terres rares.

USA

- Durant les années 1990, les utilisations des terres rares explosent (industrie chimique, électronique, etc...), mais la mine de Mountain Pass ferme en 2002 suite aux dégâts écologiques causés par des fuites de déchets radioactifs (thorium et radium). En effet, entre 1984 et 1998, 2 300 000 litres de déchets radioactifs, sont rejetés dans l'environnement. Les dégâts écologiques sont colossaux.
- Avec la fermeture de Mountain Pass, la Chine domine maintenant le marché. L'exploitation des terres rares constitue un incroyable succès économique pour la Chine depuis son entrée sur le marché. Comme l'a pressenti Deng Xiaoping, dirigeant du pays en 1992 : "Les terres rares sont à la Chine ce que le pétrole est au Moyen-Orient". Cette domination totale, soit 90% de la production mondiale, a des conséquences économiques sur le marché. 95% pour les terres rares dites lourdes et 85% pour les terres dites légères.
- La Chine détient un quasi monopole de la production des terres rares et cela devient une arme politique au même titre que l'OPEP qui ne représente qu'à peine 35 à 40 % de la production mondiale de pétrole.
- L'exploitation des terres rares étant complexe et synonyme de problèmes environnementaux et face à la politique de dumping exercée par la Chine, l'Occident se défousse sur cette dernière pour leurs approvisionnements en terres rares. Cela est valable pour les USA avec l'arrêt de Mountain Pass.
- La Chine réalise que l'unique exploitation minière de ses terres rares est insuffisante pour sa stratégie. Elle amorce donc rapidement une politique industrielle d'exploitation aval de celles-ci plus valorisante. Elle mène alors une politique de localisation en Chine des activités « aval » en offrant des coûts intéressants aux autres producteurs qui peu à peu délocalisent leur production.
- Cela se traduit par la vente de Magnequench (Usine américaine de fabrication d'aimants permanents très en avance par rapport à la concurrence) propriété de GM délocalisée en Chine avec en compensation une usine GM près de Shanghai et ce sous le mandat du Président Bill Clinton (malgré les avertissements de la CIA).

- Cette vente a été réalisée par 2 gendres de Deng Xiaoping, directeurs respectifs des deux principaux consortiums miniers chinois. A l'époque les budgets de la défense américaine étaient en décroissance.
- Baotou devenue « la Silicon Valley » des terres rares fournit maintenant chaque année 30 000t d'aimants permanents soit un tiers de la production mondiale.

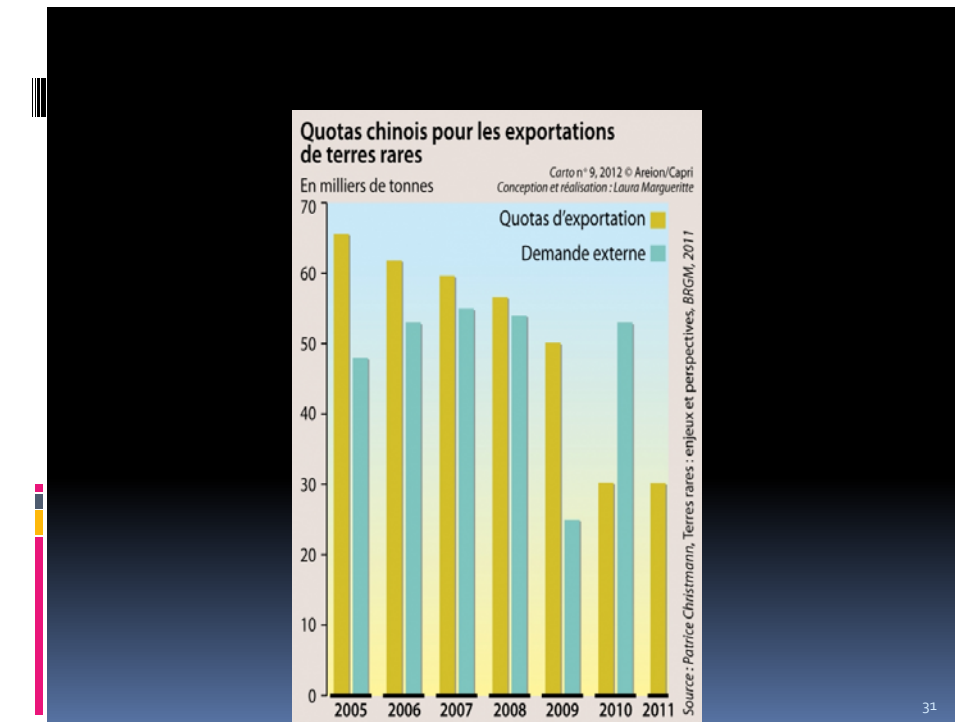
FRANCE

- La France n'a pas été en reste dans ce domaine. Elle était en pointe dans les années 1960 à 1990. Dans les années 1980, l'usine de La Rochelle purifiait 8000 à 1000t de terres rares par an soit 50% du marché mondial. Elle vendait de l'uranium à EDF, elle stockait le thorium à hauteur de quelques milliers de tonnes. Nous disposions alors d'un savoir faire prodigieux.
- Le traitement de ces terres est une activité polluante. le processus de séparation dégageait bien qu'en quantité négligeable du Radon. Les effluents issus de la séparation passaient par une station d'épuration avant d'être rejetés par un émissaire vers l'océan. Ces effluents contenaient des impuretés en faible quantité tels que des résidus de fer, zirconium, aluminium, silice et magnésium.
- En 1985, la réglementation s'est durci .Le préfet a interdit tout rejet en mer en période de marée basse. Une campagne d'action des Verts en 1987 auprès de la CRIIRAD, a mis en exergue dans les médias cette activité. De 1987 à 1994, on note des polémiques périodiques sur les problèmes de radioactivité. Jean FOURTOU qui dirige Rhône Poulenc de 1986 à 1998, décide en 1994 un changement radical de stratégie : « Je ne veux plus entendre parler de radioactivité, achetez ce que vous voulez ». Donc à partir de cette date, d'abord sous l'ère de Rhône Poulenc puis de Rhodia et enfin de Solvay on a délocalisé peu à peu toutes les opérations polluantes de traitement des minerais. D'abord en Norvège puis en Chine. Seules existent encore à la Rochelle des opérations de parachèvement des terres rares.
- La politique court terme de l'Occident nous a rendu très vulnérable sur le marché des terres rares

Le Japon piégé par la Chine

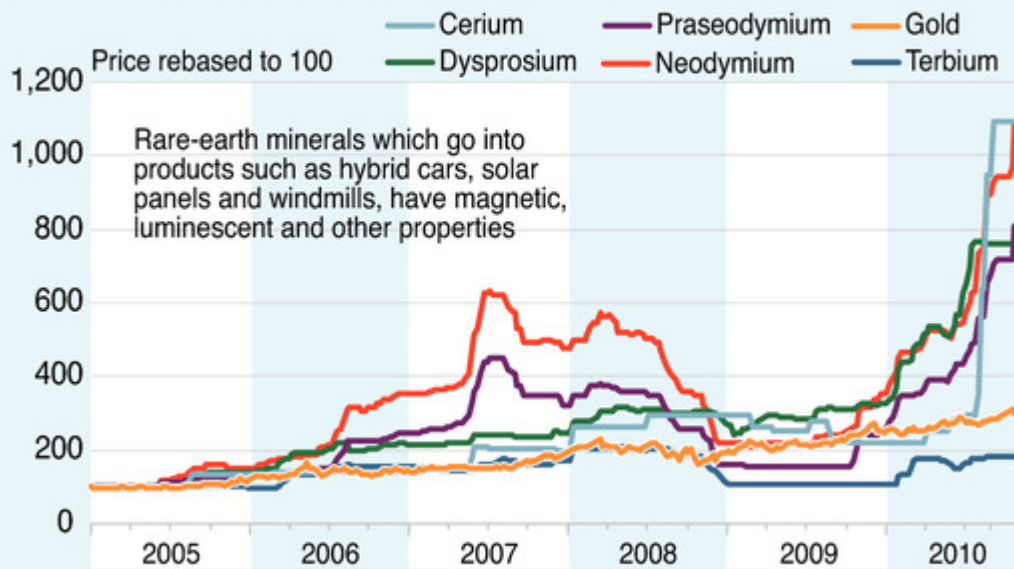
- 1990 Le Japon est le leader mondial dans le domaine de l'électronique. Il a de gros besoins de terres rares. C'est le fabricant mondial des aimants permanents. A tel point que le Japon interdit l'exportation de cette technologie vers la Chine.
- La Chine qui est consciente de disposer d'un monopole de la maîtrise des ressources des terres rares, comprend qu'il lui faut aussi disposer des technologies aval d'utilisation des ces produits. Elle propose donc au Japon de leur fabriquer à moindre coût ces aimants.
- La mondialisation aidant, le Japon délocalise peu à peu ses fabrications en Chine.
- En 2010 le 7 septembre, un incident avec un chalutier chinois au large de l'archipel de Senkaku (japonais depuis 1895 et riche de réserves d'hydrocarbures) au large de Taïwan, exacerbe les tensions. Le 22 septembre, les producteurs chinois suspendent aussitôt leurs livraisons de terres rares au Japon.
- En prenant prétexte de l'impact environnemental de l'exploitation minière des terres rares mais surtout de la préservation de ses besoins domestiques en forte croissance, la Chine avait déjà réduit ses exportations depuis quelques années de 10%/an. Les mines illégales sont répandues dans la campagne chinoise et souvent liées à des pollutions des eaux environnantes.
- la Chine a annoncé le 1^{er} septembre 2009 vouloir réduire ses quotas d'exportation à 35 000 tonnes par an (sur une production de 110 000 tonnes) dès 2010.

- Cela a fait l'objet d'une plainte auprès de l'OMC en 2009.
- Suite à l'incident avec le Japon, la Chine crée de fait un embargo mondial sur les terres rares.



- Le 13 mars 2012, les États-Unis, l'Union européenne et le Japon ont à nouveau déposé une plainte devant l'Organisation mondiale du commerce (OMC) du fait des limitations imposées par la Chine à l'exportation des terres rares.
- En 2012, la Chine n'a donc exporté que 12 000 tonnes de terres rares contre 70 000 tonnes en 2003
- La Chine a mis fin au début 2015 aux quotas à l'exportation qu'elle avait imposés sur les terres rares ; ces quotas seront remplacés par un régime de licences qui seront nécessaires aux producteurs chinois pour vendre à l'étranger. (Cette action vise les mines exploitées illégalement). Elle vise aussi à protéger leurs besoins domestiques
- Les autorités chinoises auraient fait savoir par ailleurs en mars 2014, d'après Reuters, que le pays ne souhaitait plus assumer seule le coût écologique lié à la production très polluante de l'immense majorité des terres rares du monde
- L'embargo de fait de la Chine a créé une flambée des prix des terres rares en 2011 (par exemple le cours du dysprosium a été multiplié par six, celui du terbium par neuf).

Rare-earth metals prices vs. gold



Sources: Thomson Reuters Datastream, Asian Metal



12 Quelles actions pour contrer l'hégémonie chinoise ?

- En 2012, des quotas chinois à l'exportation de terres rares menacent la fourniture d'industries de haute technologie en Europe ou Amérique (quotas dénoncés devant l'OMC qui doit se prononcer à ce sujet).
- Le quasi-monopole chinois a conduit plusieurs pays à relancer l'exploration.
- China Minmetals, l'un des trois géants chinois des terres rares, indiquait en octobre 2014 au *South China Morning Post* que la part de marché du pays dans le secteur pourrait baisser à 65 %.

a. OUVERTURE OU REOUVERTURE DE MINES

- En 2011, c'est ainsi plus de 312 projets d'exploration de gisements de terres rares qui étaient recensés sur la planète, impliquant plus de 202 sociétés de tailles très diverses dans pas moins de 34 pays.

La réouverture de la mine sud-africaine est à l'étude. Certains gisements canadiens (Hoidas Lake), vietnamiens, australiens et russes sont aussi en cours d'évaluation.

AUSTRALIE ET MALAISIE

- En 2013, la société australienne Lynas ouvre une usine en Malaisie, la plus importante de terres rares hors de Chine. Le minerai est extrait en Australie mais le traitement est réalisé en Malaisie. On exporte les problèmes environnementaux.
- Au début 2015, seuls deux gisements sont exploités en dehors de Chine, l'un à l'ouest de l'Australie, Mount Weld, l'autre, Mountain Pass, en Californie.

- Une cinquantaine de projets sont en cours de développement, dont la moitié sont bien avancés, en particulier au Canada, en Australie, aux États-Unis et au Groenland (à Kvanefjeld).

▪ USA

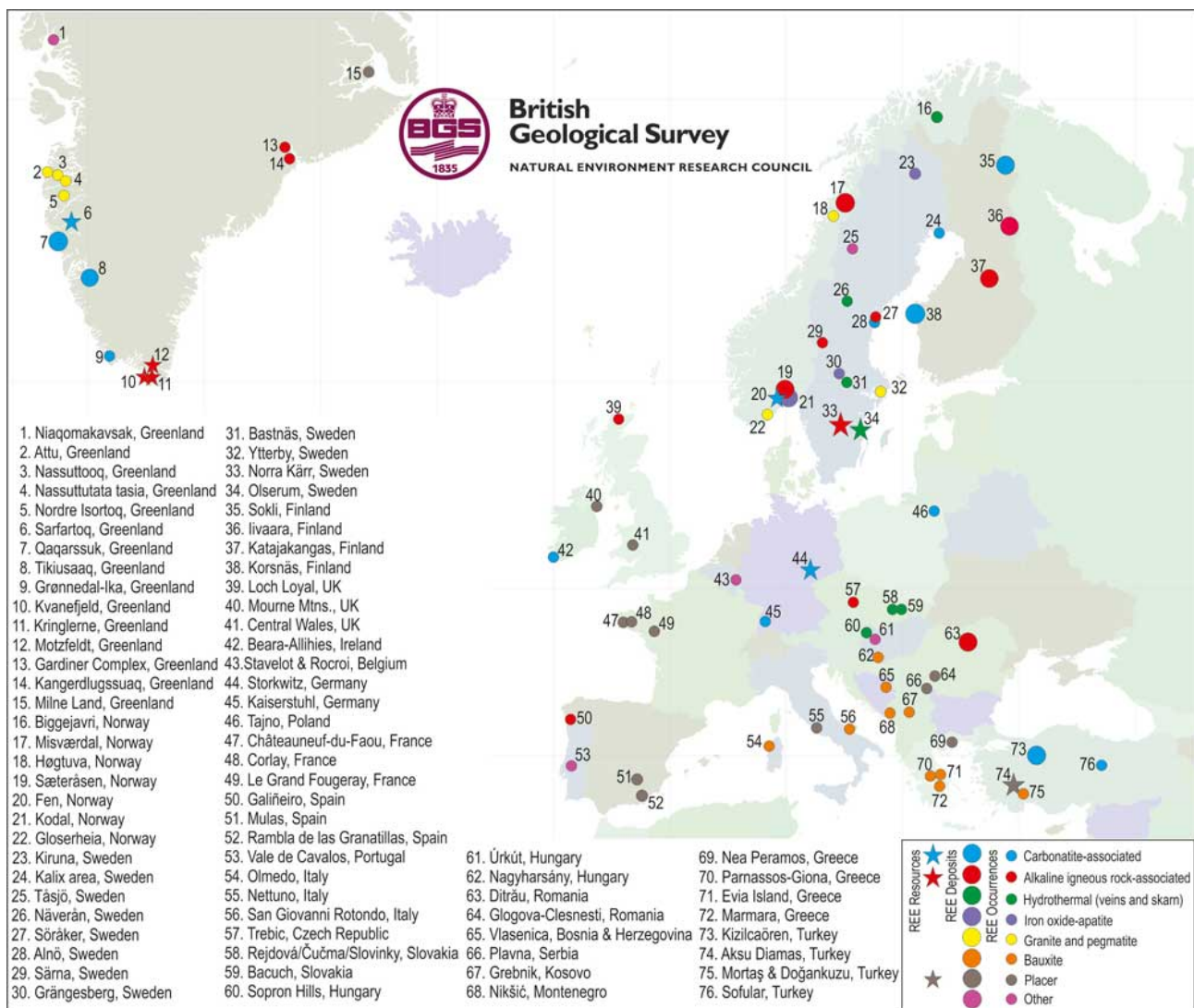
- Un consortium emmené par le groupe chinois Shenghe a mis la main en 2017 sur la mine de Mountain Pass, le seul grand gisement américain de terres rares, après la faillite de l'exploitant américain Molycorp¹
- La mine de Mountain Pass, dans le désert californien, a été rouverte en 2017, quand la société MP Materials a racheté le site, aidée par des fonds d'investissement et par quelques aides du gouvernement américain. Cette mine californienne après dix ans de fermeture, a fait l'objet d'un investissement de 1,25 milliard de dollars pour sa réouverture
- La concentration en terres rares y est exceptionnellement élevée : de 7 à 8 %, quand elle ne dépasse pas les 2 % en Chine. Ces terres contiennent notamment du néodyme et du praséodyme, indispensables dans la confection des batteries électriques.
- La mine a produit 38 500 tonnes en 2020, soit plus de 15 % de la production mondiale.
- MP Materials entame actuellement la deuxième étape de son développement : la séparation des métaux, actuellement réalisée en Chine, pour la relocalisation de laquelle elle va investir 200 millions de dollars.
- La troisième étape, à partir de 2025, sera la production des aimants. Shenghe, une entreprise chinoise contrôlée en partie par l'État, détient un peu moins de 10 % du capital.
- les deux sites Malaisie et USA devraient représenter 25 % de la production mondiale.

AUTRES PAYS

- À terme, D'ici à 2020, une vingtaine de sociétés seront a priori capables de produire des terres rares en dehors de Chine, pour des coûts de développement avoisinant au total 12 milliards de dollars (selon Bloomberg) alors que le marché des oxydes de terres rares dans sa globalité est évalué à 3,8 milliards de dollars en 2014.

EUROPE

- L'Europe lance en 2013, une étude EURARE (développement d'un système d'exploitation durable pour les gisements européens des terres rares). La fin de l'étude se termine en 2017 et les objectifs étaient :
 - Définition et évaluation des ressources minérales exploitables en ETR et de la demande d'ETR en Europe ;
 - Développement des technologies durables et efficaces d'enrichissement du minerai d'EMPR qui conduiront à la production de concentrés d'ETR à haute teneur et à la minimisation des résidus produits
 - Développement de technologies durables d'extraction et de raffinage des ETR et des alliages d'ETR adaptés à une utilisation dans les industries en aval
 - L'élaboration d'une stratégie pour l'extraction et le traitement sécuritaires des ETR
 - Démonstration sur le terrain des nouvelles technologies d'exploitation EURARE REE
 - Identification d'un nouveau schéma d'exploitation durable pour les gisements européens.



- Les principales conclusions sont : 3 projets d'exploitation minière les plus avancés kvanefjeld , et kringlerne au Groenland ainsi que Norra Kärr en Suède, pourraient être mis en exploitation vers 2020 en fonction toujours de l'état du marché des ETR ou de l'existence d'autres projets .
- Le projet de Norra Kärr en Suède, l'un des rares en Europe, est très attendu par le marché européen, car il peut produire en quantité du dysprosium, terre rare devenue de plus en plus difficile à obtenir pour les industriels, qui tentent de réduire son utilisation ; elle sert à la fabrication d'aimants permanents utilisés par exemple dans les éoliennes surtout offshore ; on la trouve aussi dans les réacteurs nucléaires. A ce jour, l'exploitation n'est pas commencée. Elle se heurte localement aux habitants qui craignent des conséquences environnementales.
- Il est fait mention également d'une étude à conduire sur le potentiel des boues rouges des usines d'alumine très abondantes dans le monde 150Mt/an.

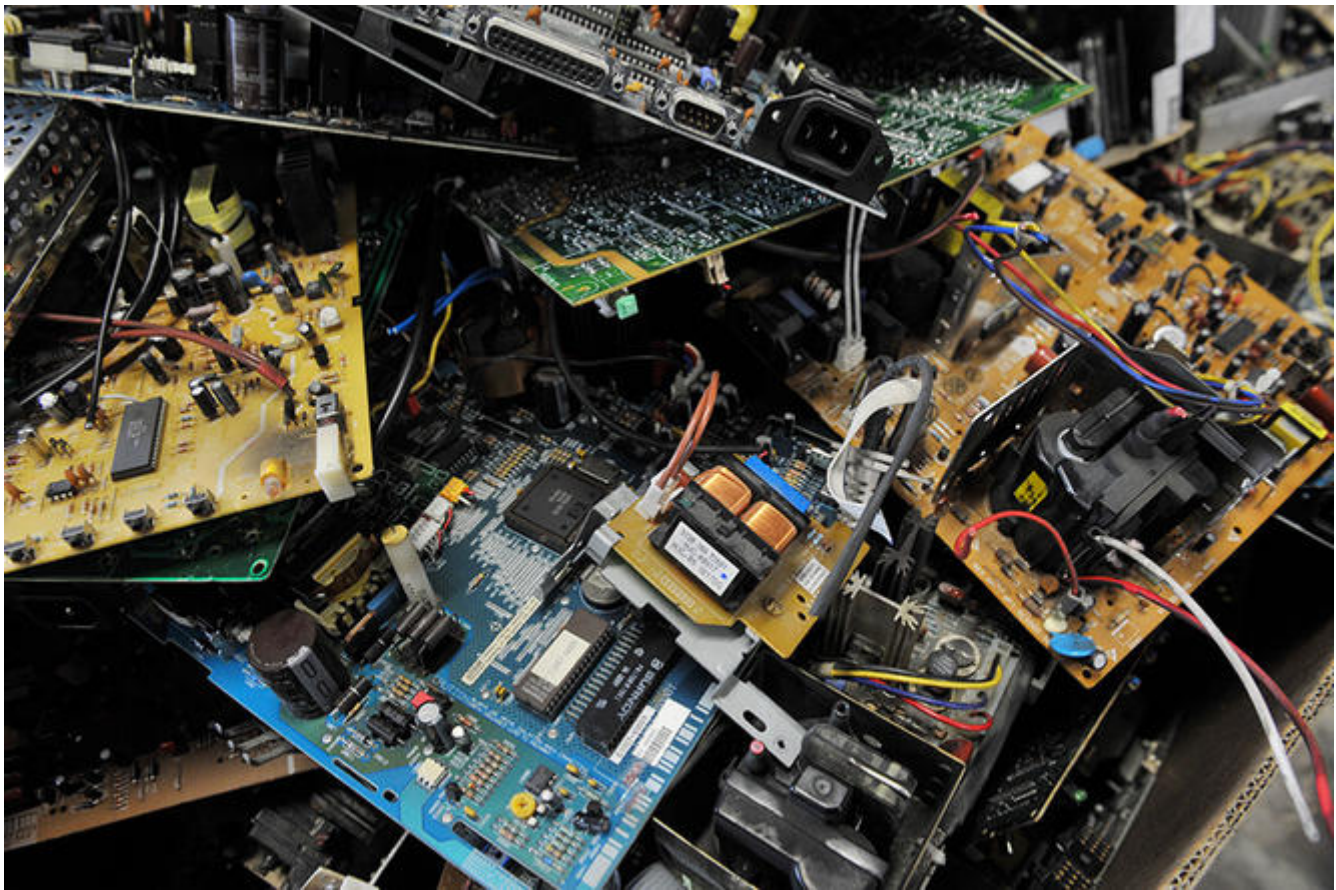
France

- La France possède un territoire maritime immense (le 2^{ème} du monde). Les collectivités de Polynésie et de Wallis et Futuna font de la France une puissance politique et maritime dans le Pacifique.

- Depuis plusieurs des années, le BRGM, l'IFREMER et le groupe minier ERAMET convoitent un gigantesque cratère sous-marin de 20km de diamètre formé par l'ancien volcan de Kulolasi surnommé « la grande marmite ». Il recèlerait un inestimable trésor : de fabuleuses réserves de terres rares.

b. LE RECYCLAGE : alternative à l'exploitation minière

- La seconde piste est celle du recyclage des objets existants pour récupérer les précieux éléments qu'ils contiennent. Aujourd'hui, on peut considérer comme des mines hors sol les montagnes de déchets technologiques produits par nos sociétés. Extraire et recycler les métaux qui les composent pour pouvoir les réinjecter dans l'économie représente un enjeu considérable sur le plan technologique.
- C'est aussi une voie prometteuse pour s'affranchir des gisements miniers et de leurs contraintes géographiques et environnementales. Ainsi, des industriels européens et japonais se sont lancés dans des filières de valorisation en recyclant les aimants permanents contenus dans nos produits high-tech (disques durs d'ordinateurs, haut-parleurs, *petits moteurs électriques*) mais également pour d'autres filières comme les batteries nickel-métal hydrure (NiMH), les lampes à fluorescence ou encore les poudres de polissage des verres. Ces procédés devront toutefois rester suffisamment abordables et respectueux de l'environnement pour être viables et compétitifs vis-à-vis de la production minière.
- Des entreprises se présentant comme issues du domaine des (éco-)technologies ayant besoin de scandium, d'yttrium et des lanthanides ont incité des industriels à ouvrir des unités de recyclage, dont en France avec Récyclum afin de récupérer dans les lampes fluo compactes en fin de vie notamment du lanthane, du cérium, et surtout de l'yttrium, de l'europium, du terbium et du gadolinium aujourd'hui précieux. Pour cela, Rhodia a ouvert une unité de récupération de poudre blanche de lampes à Saint-Fons, ainsi qu'une unité de récupération/retraitement à La Rochelle. Les deux sites ont été fermés fin 2016 pour manque de rentabilité. Un pôle de compétitivité, TEAM2 basé dans le Pas-de-Calais, se spécialise sur le recyclage de ces terres rares.
- Pour atteindre ces objectifs, des recherches fondamentales devront être menées pour permettre les avancées nécessaires à cette révolution dans le domaine des matériaux et nous permettre de continuer à développer des technologies pointues mais respectueuses de l'environnement et utile à nos sociétés modernes. ♦
 - Des critères de réparabilité se mettent en place pour les nouveaux appareils avec des garanties de durée pour trouver des pièces de rechange.
 - La prise de conscience des consommateurs est réelle et chacun admet la nécessité de limiter sa consommation de produits dont l'obsolescence est programmée, d'éco-concevoir des biens pour faciliter le recyclage, limiter le gaspillage, privilégier les circuits courts et orienter le savoir vers l'économie de ressources.
 - Des filières de réemploi se démocratisent et un commerce de matériel d'occasion s'implante de plus en plus.
 - Le Japon mise ainsi fortement sur la récupération des terres rares pour alimenter son industrie nationale et met en place une politique de récupération de tous les matériels comportant ces terres rares. Ces matériels sont stockés en attendant de trouver des filières économiques de recyclage.



c. LA RECHERCHE DE MATERIAUX DE SUBSTITUTION AUX TERRES RARES

- L'intérêt stratégique de ces éléments pousse les dirigeants et les industriels à repenser les modes d'approvisionnement de ces métaux et à leur chercher des produits de remplacement.
- Des pistes sont aujourd'hui explorées pour produire de façon moins polluante et s'affranchir des fluctuations de prix sur les marchés. La première consiste à développer les recherches dans le domaine de la chimie du solide afin de mettre au point de nouveaux matériaux pouvant se substituer à ceux contenant des terres rares. Bien que difficile à réaliser pour certaines applications reposant essentiellement sur leur configuration électronique très particulière (la luminescence, les lasers ou le magnétisme), des recherches sont néanmoins menées en ce sens.
- Ainsi, des travaux ont montré qu'en nano-structurant des particules contenant des éléments simples et largement disponibles comme le fer, le cobalt et le carbone, il est possible d'obtenir des propriétés magnétiques rivalisant avec celles d'aimants permanents élaborés à partir de métaux rares. L'objectif de réduction de l'utilisation des terres rares est également à portée de main pour d'autres fonctions comme la catalyse en développant de nouveaux catalyseurs bimétalliques à base d'éléments de transition ou pour les accumulateurs alcalins avec la conception de nouveaux matériaux d'anodes sans terres rares, plus légers et résistant bien à la corrosion.
- Les industriels ont également cherché à réduire la quantité de terres rares nécessaires à leur production. Dans les aimants pour les moteurs de ses véhicules électriques par exemple, Nissan a réduit de 40 % la quantité nécessaire de dysprosium.

13 L'EVOLUTION ACTUELLE DU MARCHE DES TERRES RARES (septembre 2021)

- L'interaction entre les chaînes d'approvisionnement affaiblies, l'explosion de la demande et les tensions politiques entre les États-Unis et la Chine sont les principaux facteurs à l'origine de ces augmentations.
- Un coup d'œil à l'évolution annuelle des prix de certains métaux de terres rares montre à quel point les fabrications qui les utilisent sont devenues plus chères l'année dernière. Le fait que le prix du dioxyde de lithium ait augmenté d'environ 150% par an, peut être identifié à la popularité croissante des voitures électriques.
- Le cuivre (l'un des conducteurs les plus courants) a vu son prix augmenter de 37%. L'aluminium que l'on trouve couramment dans les boîtiers d'ordinateurs, a augmenté de 55%. Le prix de l'étain quant à lui a augmenté de 82%. Même les métaux de terres rares relativement riches tels que le néodyme et le praséodyme ont augmenté de près de 74% par an. Les prix de plusieurs autres métaux de terres rares ont également augmenté.
- L'augmentation du prix de ces éléments utiles à la technologie entraîne forcément une augmentation des prix pour l'utilisateur final. Les chaînes de fabrication et d'approvisionnement ne peuvent absorber qu'une quantité limitée d'éléments avant d'atteindre la zone rouge. Toutefois, comme c'est toujours le cas, ce sont les petits acteurs qui sont les premiers touchés. Les fournisseurs d'électronique pour les géants de l'assemblage et de la fabrication de matériel tels que Lenovo, HP, Apple et Samsung sont confrontés à un paysage concurrentiel notoirement impitoyable. Ils ne peuvent pas facilement transférer l'augmentation des coûts des composants à leurs clients mondiaux.

Les causes de la hausse de prix des terres rares

- L'épidémie de COVID-19 et les pénuries de composants électroniques sont parmi les raisons de cette augmentation de prix. Couplée à la montée en flèche de la demande liée aux multiples points d'inflexion technologiques, cette situation a également entraîné des problèmes de gestion de la chaîne d'approvisionnement. Elle engendre également une montée en flèche des prix des produits de certains des principaux acteurs du secteur.
- Cependant, un autre élément majeur fait également partie de l'équation : la géopolitique. La Chine est actuellement le seul pays à disposer d'une chaîne d'approvisionnement territoriale totalement intégrée. Elle couvre tous les aspects de la production de métaux de terres rares, de l'extraction au raffinage et au traitement final. L'année dernière, la Chine était responsable d'environ 55% de la production minière mondiale de terres rares. 85% de tous les minéraux de terres rares doivent aussi passer par la Chine durant la fabrication. La Chine dispose ainsi d'un puissant levier dans sa relation avec l'économie mondiale. Un éventuel durcissement des contrôles des exportations chinoises a suffi à alimenter en partie la hausse des prix.

Les projections de besoins de terres rares

La demande mondiale de terres rares est exponentielle : de **15 000 tonnes en 1980**, la consommation s'est décuplée pour atteindre **150 000 tonnes en 2017**. Dans l'ordre, ce sont les aimants, les catalyseurs, les agents de polissage et les alliages pour batteries nickel-hydrure qui en consomment le plus.

La demande augmente chaque année de 5 à 6% et atteindra **350 000 à 450 000 tonnes en 2035**, selon une analyse du MIT. Les aimants représenteront alors un quart de la demande, les agents de polissage du verre un autre quart

La documentation

- La guerre des métaux rares (Guillaume Potiron) éditions les liens qui libèrent.
- La France et les terres rares (Rémy Sabatier) éditions du Net.(Livre blanc pour une stratégie française des terres rares)
- Terre rare (Wikipédia)
- Développement d'un système d'exploitation durable pour les gisements européens de minerai de terres rares (EURARE) commission européenne
- Les terres rares et après (CNRS le journal)
- Vers un approvisionnement responsable en métaux critiques et terres rares (ENGIE innovation)
- Les techniques de l'ingénieur « terres rares »
- Le prix des terres rares s'envole, ce qui pourrait entraîner une hausse des prix de l'électronique (objet connecté.com)

Jean Pierre DURSKI le 14 février 2022