

Enjeux autour des Terres Rares

Mathieu Leguérinel



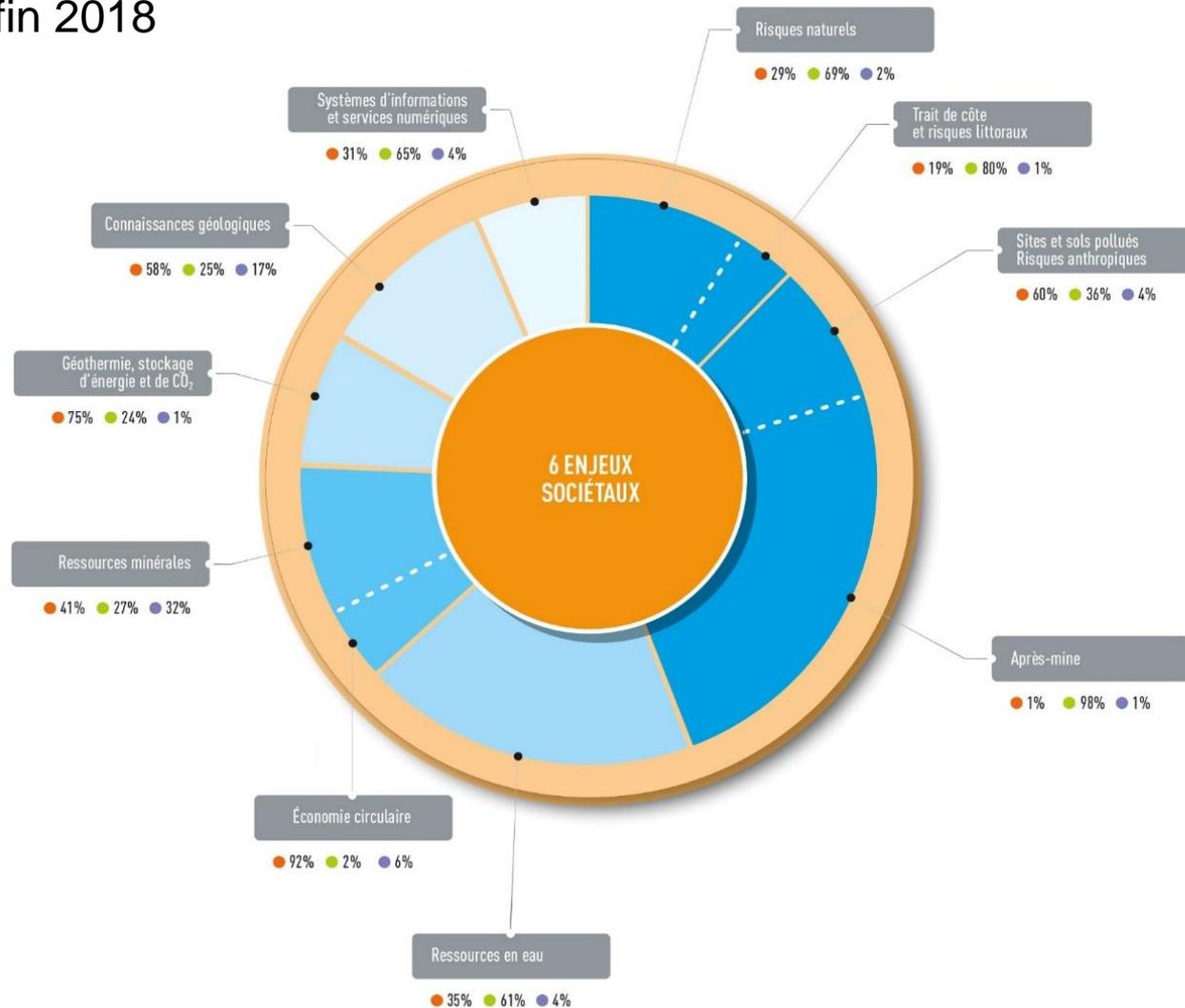
Deng Xiaoping (1904-1997)

Secrétaire général du Parti
Communiste chinois

*« le Moyen-Orient a du pétrole,
la Chine a des terres rares »*
1992

- Création en 1959
- EPIC : établissement public à caractère industriel et commercial
- 1061 employés à fin 2018

ACTIVITÉ DE	Recherche
FINANCÉE PAR :	Ministère (recherche), Agences, Entreprises, Europe
ACTIVITÉ DE	Appui aux Politiques Publiques
FINANCÉE PAR :	Ministères (recherche, environnement), Agences, Collectivités, Europe
Autres	
FINANCÉE PAR :	Banques de développement, États étrangers, Entreprises, Europe



Équipe composée par des géologues de formation, tournés vers l'économie.

Activités de veille économique destinée à :

- acquérir une vision globale d'un marché d'un métal donné
- anticiper de potentielles crises sur certaines matières premières
- apprécier les risques de hausse des cours et de développement des projets
- aider acteurs **publics** ou **privés** à élaborer des stratégies d'approvisionnement

Produits :

- Inventaire des gisements à l'échelle mondiale (géologie, ressources & réserves)
- Cartographie des principaux exploitants et leurs forces et faiblesses
- Eléments de prospective

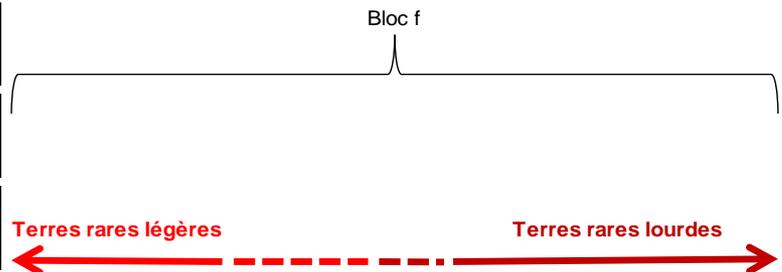
Exemples de partenaires:



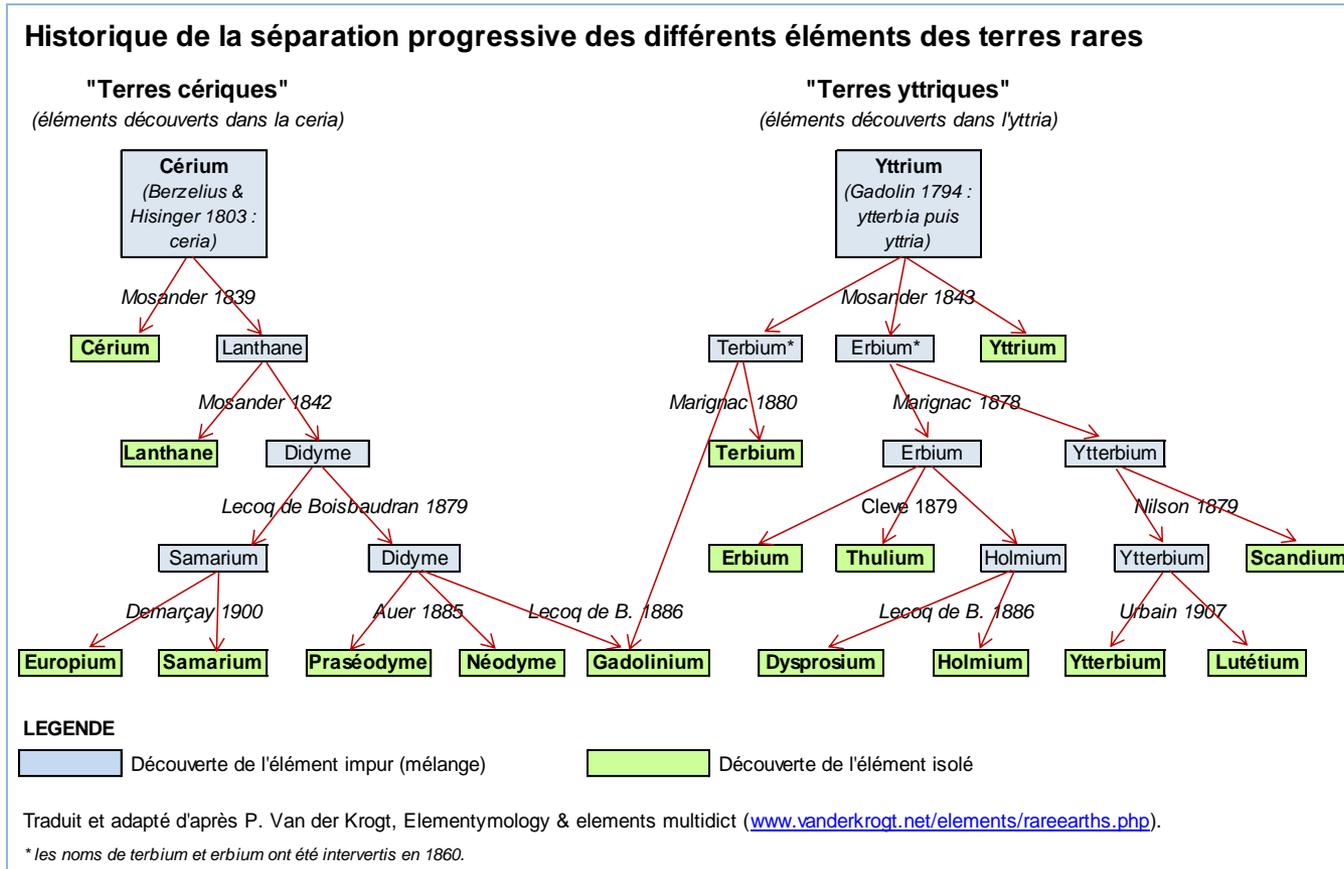
Qu'entend-t-on par Terres Rares?

- 15 à 17 métaux voisins du tableau périodique
- **Les « lanthanides »** : n°57 à 71
 - Lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium et lutétium
 - Prométhium : n'existe quasiment pas dans la nature car demi-vie très courte
- **2 autres éléments** : n°39 et 21
 - Yttrium (n°39)
 - Scandium (n°21) pour certains auteurs
- **Différence TR légères, intermédiaires et lourdes, basée sur la masse, variable selon les auteurs**
 - Légères : lanthane, cérium, praséodyme, néodyme
 - Intermédiaires : samarium, europium, gadolinium
 - Lourdes : terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, lutécium

	1	2	f1 f2 f3 f4 f5 f6 f7 f8 f9 f10 f11 f12 f13 f14														3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
	s1	s2															d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	p1	p2	p3	p4	p5	p6			
1	1																																		2
	H																																		He
2	3	4																									5	6	7	8	9	10			
	Li	Be																									B	C	N	O	F	Ne			
3	11	12																																	
	Na	Mg																																	
4	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			
5	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			
6	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			
7	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	109	109	109									
	Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn									



- Éléments identifiés et séparés progressivement entre **1794 (Y)** et **1907 (Lu)**



- Cas du **prométhium** :

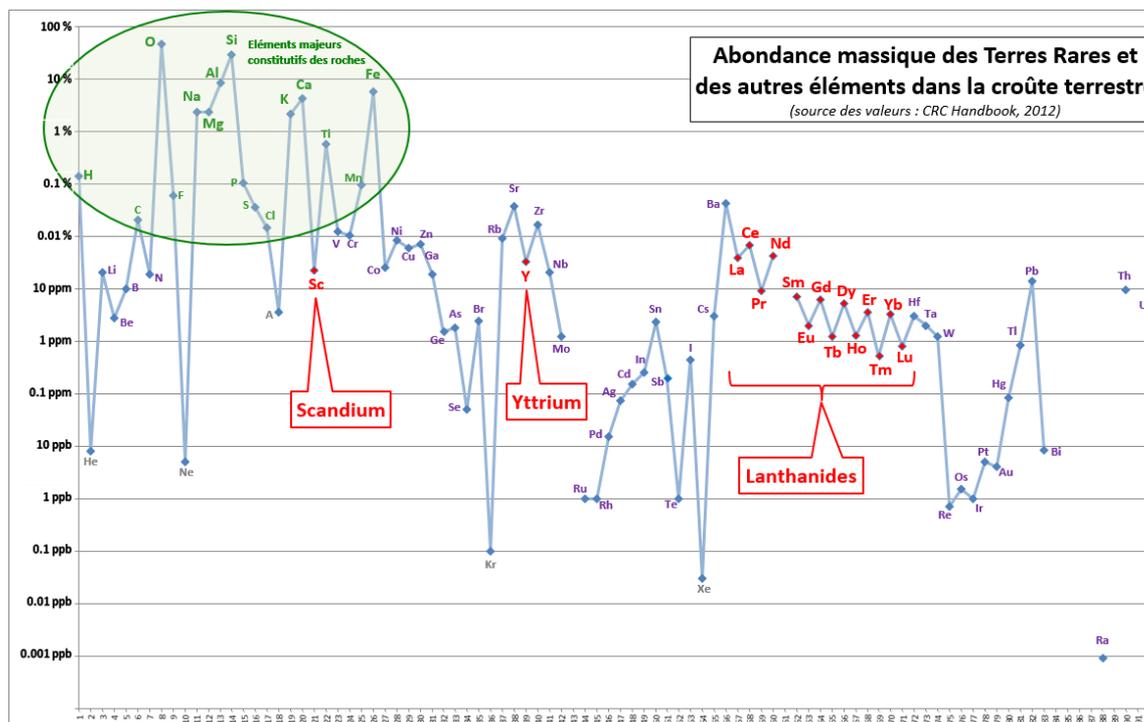
- Découvert en 1945 dans des résidus de réacteur nucléaire d'Oak Ridge aux USA (projet Manhattan)
- Pas d'isotope stable, demi-vie de 17,7 ans
- Issu naturellement de la fission spontanée de l'U 238, très rare (environ 560 g sur Terre naturellement)
- Quelques applications de micro-niche grâce à sa radioactivité

« Terres »

- Fin du XVIII^{ème} siècle, Lavoisier identifie 35 éléments ou constituants élémentaires de la matière : 17 métaux isolés à l'état métallique, 2 alcalis (potasse et soude) et 5 terres (chaux, magnésie, baryte, alumine et silice)
- Terres : substances non décomposées car non réductibles par le charbon (aspect terreux)
- Ytria (1794) et Ceria (1803) n'étaient pas encore réductibles en métal (1839 et 1843) et ont donc été qualifiées de « terres »

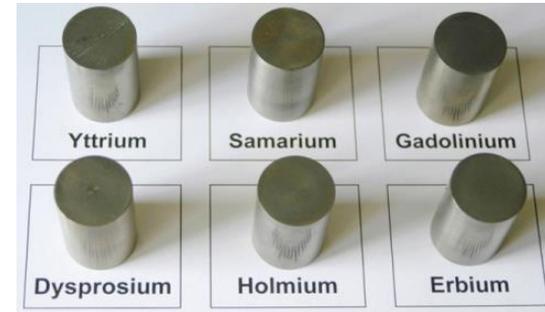
« Rares »

- XVIII et XIX^{ème} siècles : Ytria et Ceria beaucoup plus rares que les autres terres (chaux, magnésie, baryte, alumine, silice puis strontiane)
- Sommes de tous les oxydes de TR : 0,026 % (260 ppm) de la croûte terrestre (clarke), allant de 66 ppm (Ce) à 0,52 ppm (Tm). A titre de comparaison, zinc : 70 ppm, nickel : 84 ppm et argent : 0,075 ppm
- Concentrations naturelles à des niveaux économiquement exploitables (**gisements**) relativement rares et localisées



■ Propriétés chimiques et comportements géologiques très voisins

- Sous forme pure, métaux gris acier (sauf Eu et Yb, plus jaunâtres)
- Presque toujours associés dans les gisements, en proportions variables (ratio TR lourdes vs TR légères variable)
- Degré d'oxydation principal +III (oxydes en TR_2O_3), presque unique dans la nature. Certains éléments également en +II (Eu, Sm) et +IV (Ce, Pr, Tb...)
- Rayons ioniques décroissants avec augmentation du numéro atomique



Quelques Terres Rares sous forme de métaux ©JF. Labbé

■ Propriétés magnétiques remarquables

- Courbes d'aimantation avec fortes hystérésis
- Bonne interaction avec éléments de transition (Co, Fe etc.), température de curie, rémanence et champ coercitif élevé

→ aimants $Nd_2Fe_{14}B$, $SmCo_5$ et Sm_2Co_{17}

■ Propriétés spectrales remarquables

- Absorption (coloration) et émission (luminescence)
- Si TR entouré d'un ligand (oxyde ou molécule) excité par un rayon puissant, il y a émission de lumière avec pics bien spécifiques en fonction de l'élément : yttrium et europium (rouge et bleu), terbium et thulium (vert) et cérium (jaune)

→ Luminophores (écrans d'affichage, ampoules fluorescentes) et lasers

■ Propriétés catalytiques utiles

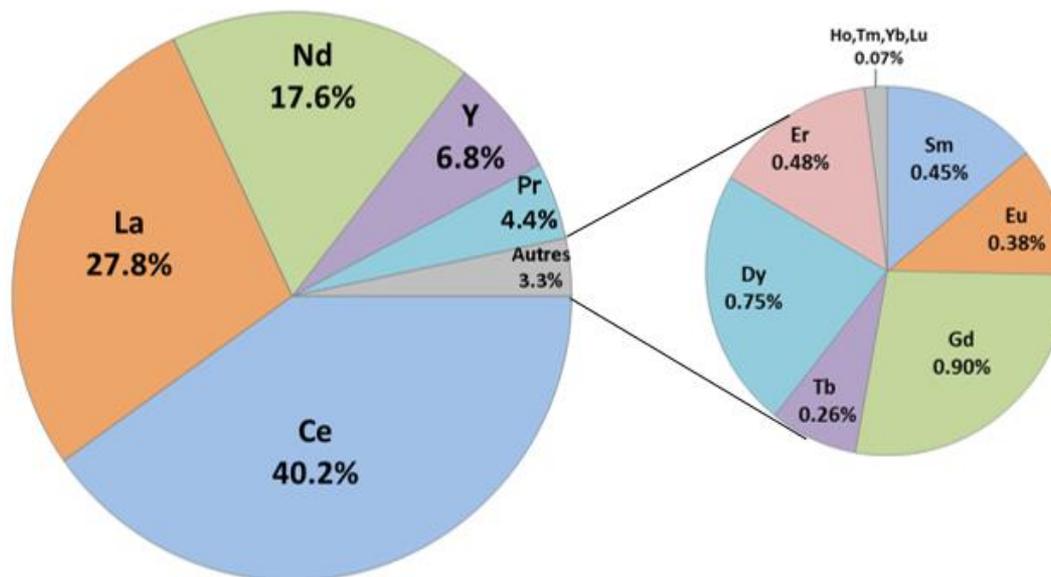
- Craquage des hydrocarbures lourds avec lanthane ou automobile avec cérium

■ Autres

- Pas de rôle biologique connu. Pas de toxicité aux doses d'exposition usuelles

- **Secteurs d'utilisations variés**, avec un large éventail de tonnages et de tailles des marchés selon les éléments (quelques tonnes à 45 000 t)
- Les proportions relatives d'éléments consommés correspondent peu ou prou aux proportions d'éléments produits

Consommation relative des différents éléments des Terres Rares



Cf. Panorama BRGM 2015, accessible sur :
www.mineralinfo.fr/page/metaux-strategiques

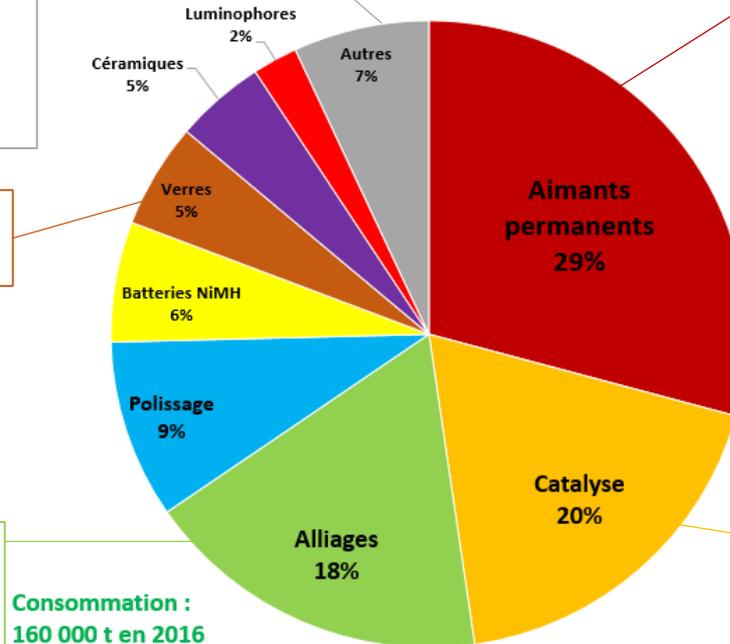
- La part des aimants permanents est passée de 20% en 2012 à 30% en 2018, et celle des luminophores de 7% à 2%.
- Usages dans le nucléaire** : barres de contrôle des réacteurs nucléaires (Sm, Eu, Gd et Dy sont des absorbeurs de neutrons) → **faible usage**

- Traitement des eaux
- Industrie de la défense
- Engrais
- Nucléaire
- Lasers
- Pigments
- Ecrans plasma
- LED/LCD

- Moteurs et générateurs (éoliennes, VE et hybrides)
- Refroidissement magnétique
- Haut-parleurs
- IRM
- Disques durs

Répartition des usages des TR en 2018

(Source : Roskill)



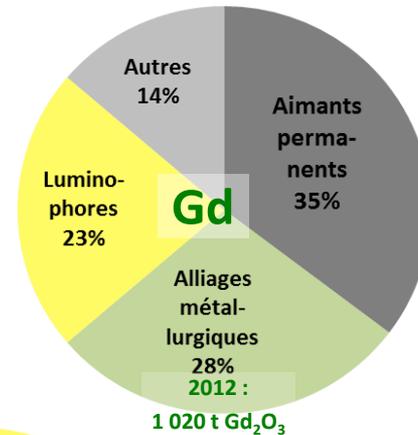
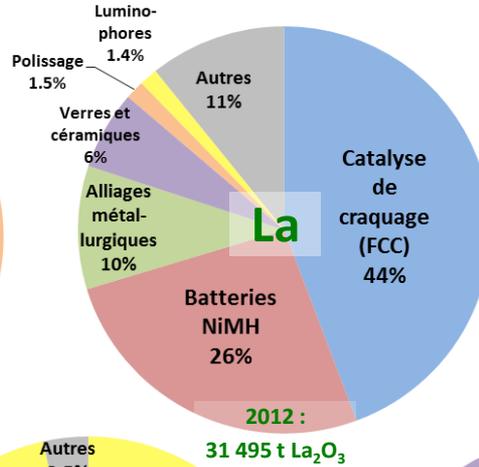
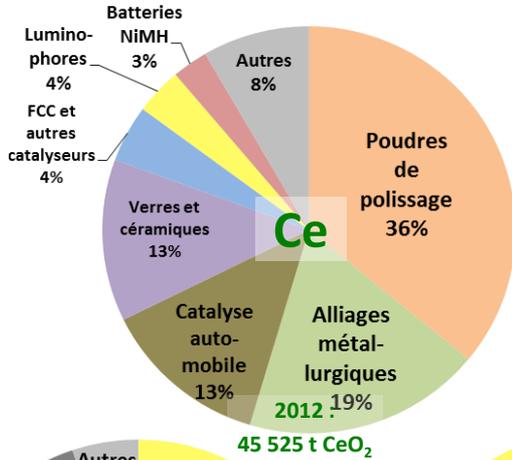
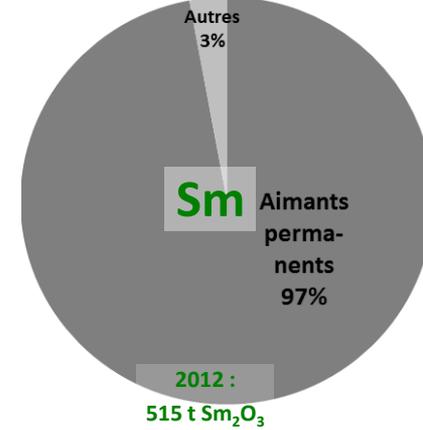
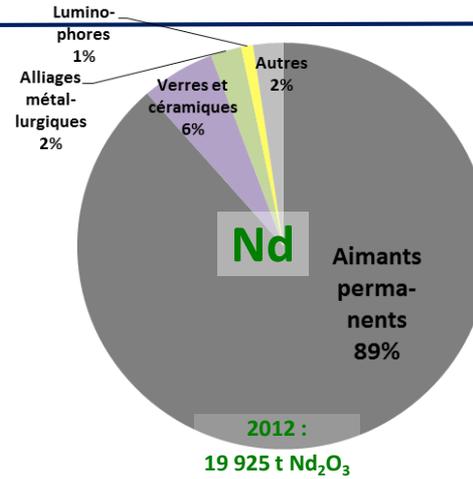
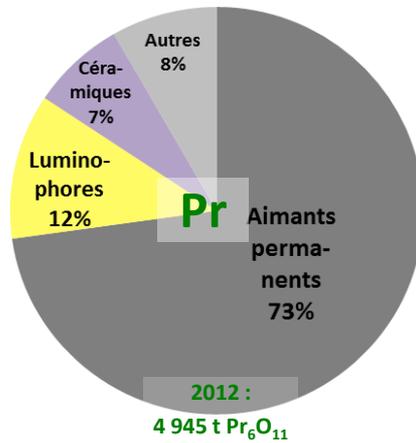
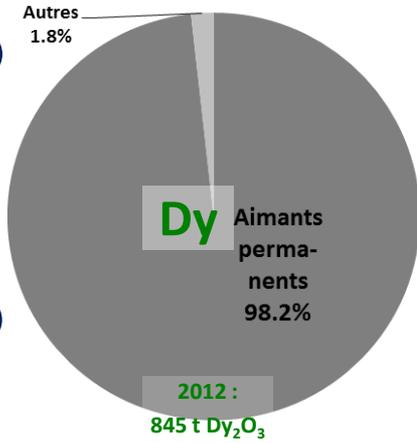
- Coloration du verre
- Absorbants d'UV

- Pièces de fonderie
- Super-alliages
- Piles à combustibles
- Stockage de H2
- Construction légère

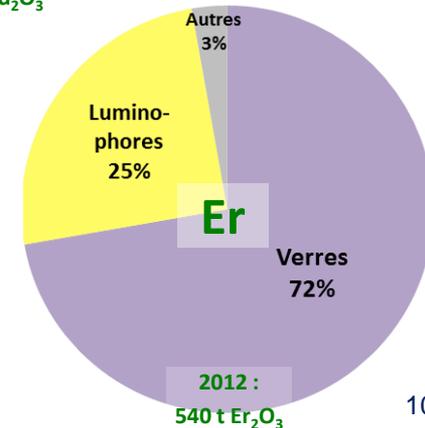
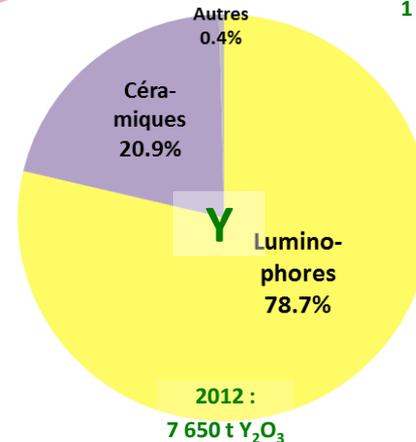
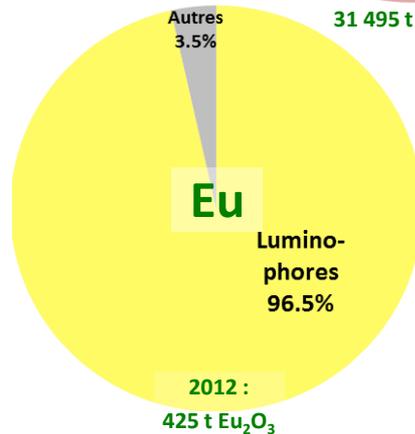
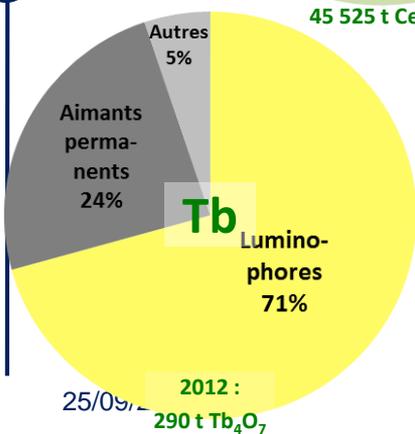
- Raffinage du pétrole
- Pots catalytiques
- Additifs dans les carburants (diesel)

Consommation :
160 000 t en 2016

Usages et consommation III

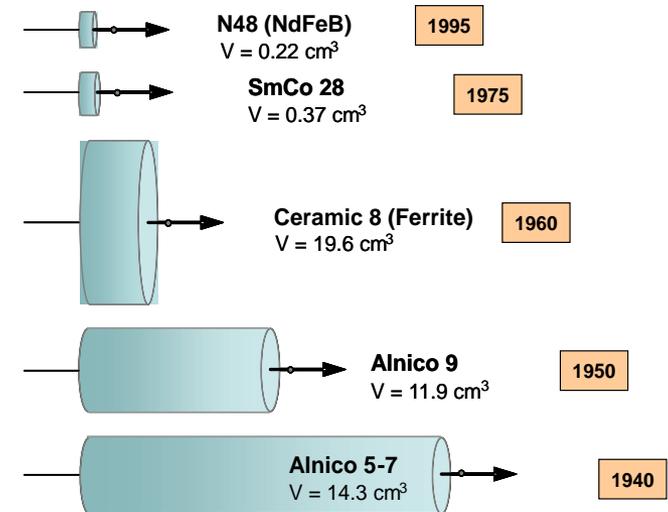


(source : CE 2014 d'après Roskill / IMCOA, 2013)



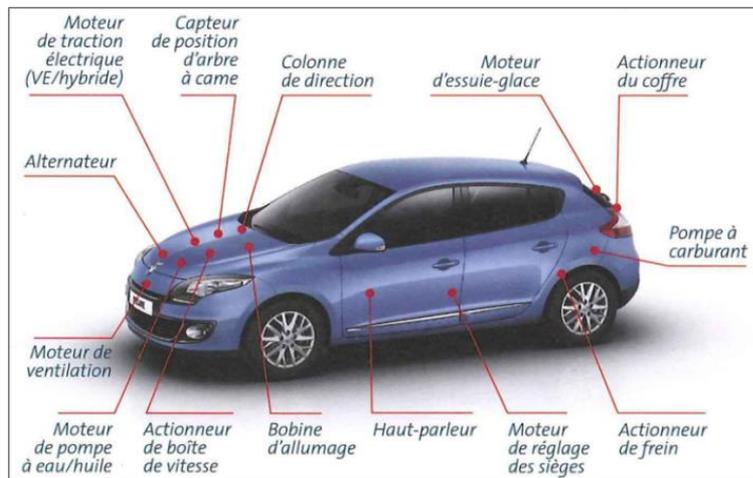
- La principale technologie d'aimants à TR utilisée aujourd'hui (en volumes) sont les aimants **NdFeB** (aimants **SmCo** réservés à des usages plus spécifiques). Ces aimants sont beaucoup plus petits, à performances égales, que les aimants classiques. Devenus indispensables dans de **nombreux domaines**
- Principal secteur de croissance de la demande en TR ; Accélération attendue avec les pressions pour le basculement vers les véhicules électriques
- Ajout de Dy pour maintien de l'efficacité à température élevée. Problématique de sa substituabilité largement étudiée

Industrie	Applications
Aérospatiale et défense	Moteurs pas à pas, boussoles électroniques, capteurs, systèmes d'embrayage et de freins, systèmes de radars, systèmes de guidage des missiles, accéléromètres
Automobile	Démarrateurs, système de freinage ABS, pompes d'injections, moteurs électriques d'accessoires (lève-vitres, essuie-glace, sièges, etc.), systèmes audio (haut-parleurs), générateurs et moteurs d'entraînement des véhicules hybrides
Équipements électroniques	Ordinateurs (disques durs internes et externes), imprimantes et photocopieurs, appareils photos numériques, smartphones, lecteurs DVD, baladeurs mp3, haut-parleurs, caméscopes, etc.
Équipements électriques grand public	Machines à laver, réfrigérateurs, climatiseurs, rasoirs électriques, robots de cuisine, outillage, vélos électriques, etc.
Energies renouvelables	Génératrices d'éolienne, etc.
Autres	Robots industriels, séparateurs magnétiques, ascenseurs, etc.



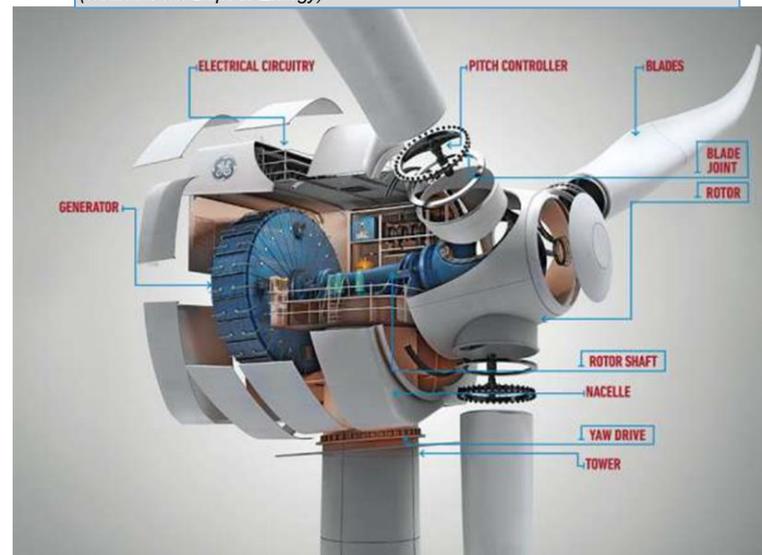
Tailles ($V = \text{volume}$) et formes optimales relatives de aimants permanents pour générer un champ de 0,1 Tesla à 5 mm d'une face polaire de l'aimant, selon les technologies et leur dates de mise au point. Adapté d'après Arnold Magnetic Technologies

- Choix des constructeurs : Moteurs à induction vs. moteurs à aimants permanents
- Le choix du moteur à aimants permanents à TR est généralement fondé sur des critères de **performance** (Exemple : Tesla Model 3 Long Range, août 2017 « plus grande densité de puissance, efficacité améliorée, meilleure accélération et meilleure autonomie »)
- Une **voiture électrique standard** contiendrait environ **2 kg d'aimants permanents**, soit environ **750 g de Nd+Pr** (Industrial Minerals, 18/08/2017)
- Pour un ordre d'idée : Un parc automobile de 72 millions de véhicules électriques d'ici 2040 nécessiterait **54 kt Nd+Pr** soit plus du double de la production totale 2016 pour ce secteur seul
- Rôle à venir des producteurs chinois de véhicules électriques



Aimants permanents dans un véhicule standard (© Renault, 2011)

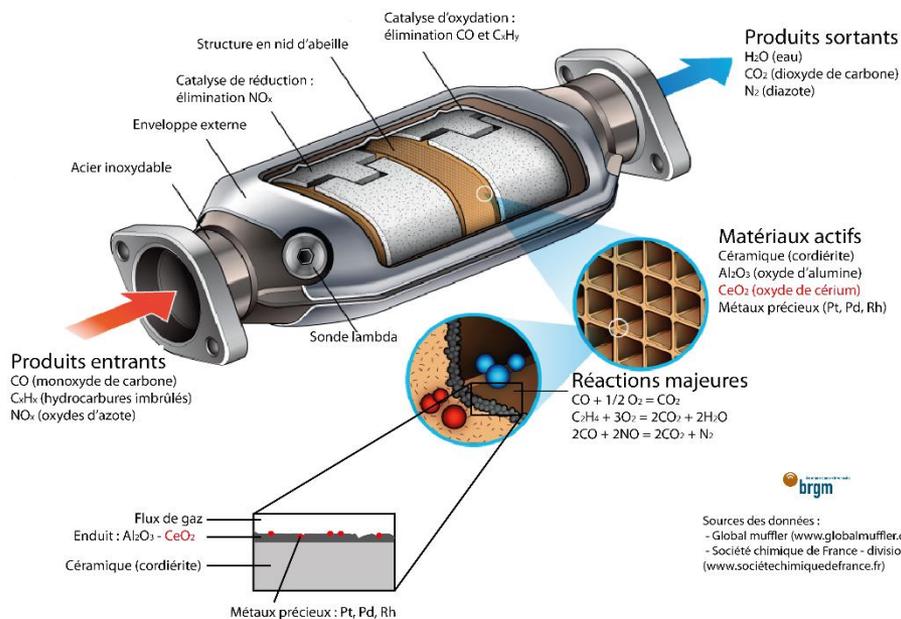
Par MW de capacité installée, environ 600 kg d'aimants NdFeB,
(Source : US Dept of Energy)



Éolienne à entraînement direct à aimants permanents de 4 MW de General Electric pour installation off-shore (sur mât de 90 m, diamètre du rotor de 110 m)

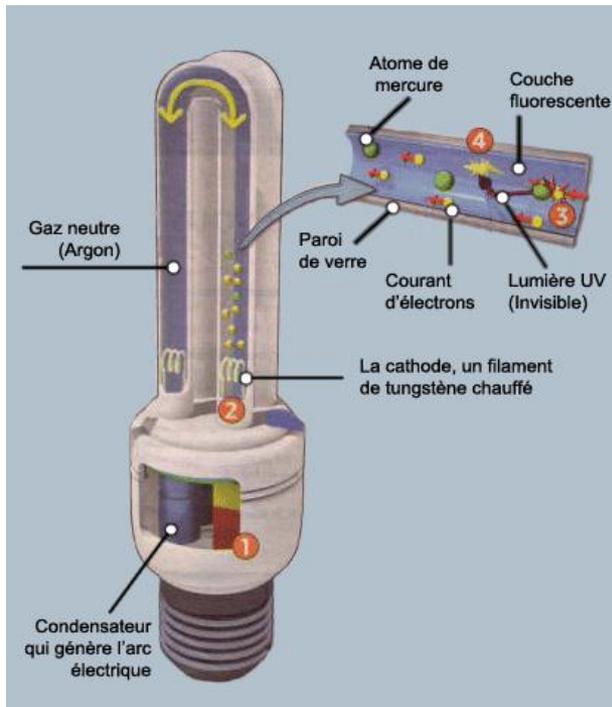
- FCC** : Fluid Cracking Catalyst – catalyse du craquage des pétroles lourds en lit fluide
 - 13% des usages** – 15 000 t d'OTR (oxydes de TR) consommés en 2012
 - Catalyseurs : substances augmentant la vitesse d'une réaction chimique. Utilisé ici pour scinder les hydrocarbures lourds en produits plus légers
 - Catalyseur : zéolithe, activée et stabilisée grâce au lanthane (hausse de 10% des rendements) avec 80% La_2O_3 , 10% CeO_2 et 5% Nd_2O_3 ou avec 20% La_2O_3
- Automobile** : pots d'échappement catalytiques
 - Environ 7% des usages** – 6 700 t d'OTR en 2012
 - Convertir au maximum les composés nocifs émis lors de la combustion du carburant en composés non nocifs
 - TR présentes dans une céramique à composition de cordiérite. tapissée d'alumine et oxydes de cérium (20% en masse).

Schéma général d'un pot catalytique à deux monolithes et position des Terres Rares utilisées



Sources des données :
 - Global muffler (www.globalmuffler.ca)
 - Société chimique de France - division catalyse (www.sociétéchimiquedefrance.fr)

- **Luminophore** : substance qui, une fois excitée par des particules (électrons, photons...), émet de la lumière sur des longueurs d'onde spécifiques
- **Utilisation historique** des TR (tubes cathodiques à Eu)
- Large éventail d'éléments de Terres Rares utilisé (Eu, Y, Gd, Tb, Pr, Er, etc.)
- La demande avait été croissante depuis 2000 avec le développement des lampes fluocompactes en remplacement des ampoules à incandescence
- **Désormais en perte de vitesse** avec le basculement progressif des ampoules fluocompactes vers les ampoules à LED, moins utilisatrices de TR (et la quasi-disparition des écrans cathodiques)



Composition et fonctionnement d'une ampoule fluo-compacte

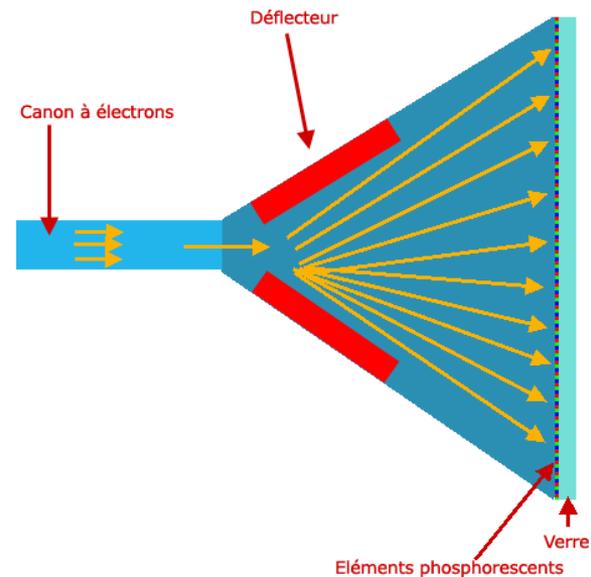
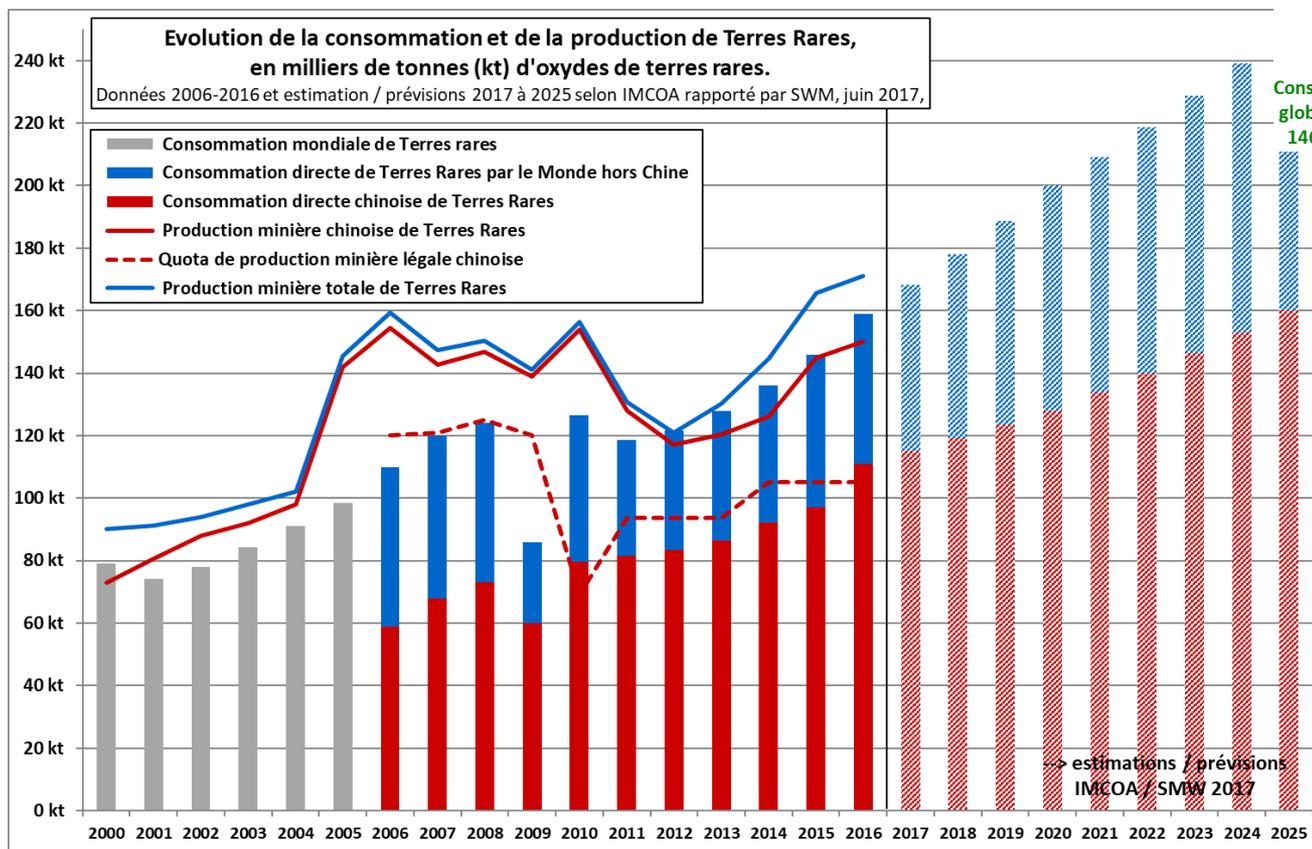
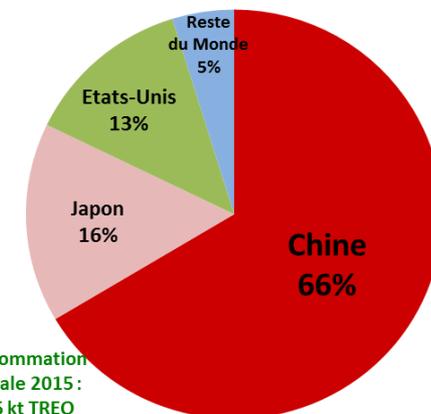


Schéma d'un écran à tube cathodique

- Consommation primaire (fabrication d'aimants, etc.) concentrée en Asie (**Chine et Japon**), mais produits finaux utilisés dans le Monde entier
- Demande générale en TR : **+8% / an**
- Demande pour fabrication d'aimants permanents : **+10% / an**

Répartition de la consommation directe de terres rares en 2015

(source : D. Kingsnorth, mai 2016)



Croissance (% / an)	Temps de doublement (années)
0,5	140
1	70
2	35
5	14
8	9
10	7

- 250 espèces minérales mais environ 20 réellement intéressantes

- TR légères : carbonates et phosphates

- TR lourdes : oxydes et phosphates

Bastnaésite

- La, Ce, Nd
- Chine, USA



Bastnaésite de Mulla Ghori, Pakistan.
Collection et photo
© Christian Rewitzer, Wikimedia

Monazite

- La, Ce, Pr, Nd, Sm
- Th (3-10%), U → **Problème majeur**
- Chine, Brésil, Australie, Inde, Malaisie



Monazite de la mine de Siglo Veinte, Llagua, Bolivie.
Collection et photo
© Rob Lavinsky, Wikimedia

Loparite

- La, Ce, Pr, Nd, Sm
- Russie

Xénotime

- Y, Dy, Gd, Nd, Ce
- Malaisie, Australie, Namibie

Argiles latéritiques

- Principales sources de TR lourdes
- Pas de radioactivité
- Chine



Xénotime du Mont Mlaloa, Zomba District, Malawi.
Collection et photo
© Christian Rewitzer, Wikimedia

Nom du minéral	Formule chimique	Type (anion principal)	Teneur maxi en OTR
Principaux minéraux de Terres Rares			
Allanite	$(Ce, Ca, Y)_2(Al, Fe)_3(SiO_4)_3OH$	Silicate	28%
Ancylite	$SrREE(CO_3)_2(OH) \cdot H_2O$	Carbonate	46%
Bastnaesite	$(Ce, La, Y)(CO_3)F$	Fluoro-carbonate	75%
Britholite	$(Ce, Ca)_5(SiO_4, PO_4)_3(OH, F)$	Silicate	62%
Cerianite	$(Ce, Th)_2O_2$	Oxyde	81%
Cerite	$(Ce, La, Ca)_3(Mg, Fe)(SiO_4)_6(SiO_3OH)(OH)_3$	Silicate	65%
Euxenite	$(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti)_2O_6$	Oxyde	30%
Fergusonite	$(Y, Er, U, Th)(Nb, Ta, Ti)O_4$	Oxyde	46%
Florencite	$CeAl_3(PO_4)_2(OH)_6$	Phosphate	32%
Fluocerite	$(La, Ce)F_3$	Fluorure	70%
Gadolinite	$(La, Nd, Y, Ce)_2FeBe_2Si_2O_{10}$	Silicate	52%
Hydroxylbastnaesite	$(Ce, La, Nd)CO_3(OH, F)$	Fluoro-carbonate	75%
Kainosite	$Ca_2(Y, REE)_2Si_4O_{12}CO_3 \cdot H_2O$	Silicate	38%
Loparite	$(Na, Ca, Ce, Sr, Th)(Nb, Ti)O_3$	Oxyde	34%
Monazite	$(Ce, La, Pr, Nd, Th, Y)PO_4$	Phosphate	71%
Mosandrite	$(Ca, Na, REE)_7(Ti, Zr)_2Si_4O_{14}(OH, F)_4 \cdot H_2O$	Silicate	33%
Parasite	$CaREE_2(CO_3)_3F_2$	Fluoro-carbonate	64%
Samarskite	$(Y, Ce, Fe, U, Th, Ca)(Nb, Ta, Ti)O_4$	Oxyde	22%
Steenstrupine	$Na_{14}Ce_6Mn_2Fe_2(Zr, Th)(Si_6O_{18})_2(PO_4)_7 \cdot 3H_2O$	Phosphosilicate	31%
Synchysite	$Ca(Ce, La, Nd, Gd, Y)(CO_3)_2F$	Fluoro-carbonate	50%
Thalenite	$Y_3Si_3O_{10}(OH)$	Silicate	63%
Xenotime	YPO_4	Phosphate	62%
Autres minéraux pouvant contenir des Terres Rares en substitution partielle			
Apatite	$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$	Phosphate	12%
Brannerite	$(U, Ca, Y, Ce)(Ti, Fe)_2O_6$	Oxyde	6%
Eudialyte	$Na_{15}Ca_6(Fe, Mn)_3Zr_3(Si, Nb)Si_{25}O_{73}(OH, Cl, H_2O)_5$	Silicate	10%
Lovozerite	$Na_2Ca(Zr, Ti)Si_6O_{14}(OH)_4 \cdot H_2O$	Silicate	
Pyrochlore	$(Na, Ca, Ce)_2Nb_2O_6F$	Oxyde	6%
Zircon	$(Zr, Th, Y, Ce)SiO_4$	Silicate	4%
Principaux minéraux argileux pouvant contenir des Terres Rares adsorbées			
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Silicate	0.3%
Halloysite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Silicate	0.3%
Illite	$K_{1-x}Al_{3-x}Si_{3+x}O_{10}(OH)_2$	Silicate	0.3%
Smectite	$\sim (Na, Ca)_{0.33}Al_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$	Silicate	0.3%

■ Gisements primaires

- Carbonatites : roches d'origine magmatique très particulières et très riches en Ca
 - ❖ Bayan Obo (Chine) → mine de fer avec TR en sous-produits
 - ❖ Grand rift Est-africain (Kenya, Tanzanie, Malawi, Mozambique)
 - ❖ Mount Weld (Australie)
 - ❖ Riches en TR légères
- Complexes intrusifs alcalins et peralcalins stratifiés (hors carbonatite)
 - ❖ Kvanefjeld et Kringlerne (Groenland)
 - ❖ Kutessay (Kirghizistan)
 - ❖ Minéralogie complexe : eudialyte, steenstrupine etc.
- Volcanites acides : coulées volcaniques rhyolitiques
 - ❖ Round Top (USA)
 - ❖ Riches en TR lourdes
- Gisements hydrothermaux : filons dans zones de magmatisme alcalin
 - ❖ Steenkampskraal (Afrique du Sud)
 - ❖ Teneurs en TR très élevées : 15% OTR mais tonnage limité
- IOCG : oxydes de fer à cuivre et or
 - ❖ Olympic Dam (Australie) → TR non récupérées
 - ❖ Kiruna (Suède) → TR non récupérées
- Shales noirs pyriteux : matière organique dans des bassins sédimentaires
 - ❖ Buckton (Canada)
 - ❖ Ressources marginales



Gisement de Terres Rares de Kringlerne au Groenland (Tanbreez Mining) avec ses alternances de lits de kakortokite (plus clairs) et de lujavrite (plus sombres). ©J. Tuduri, BRGM

■ Gisements secondaires

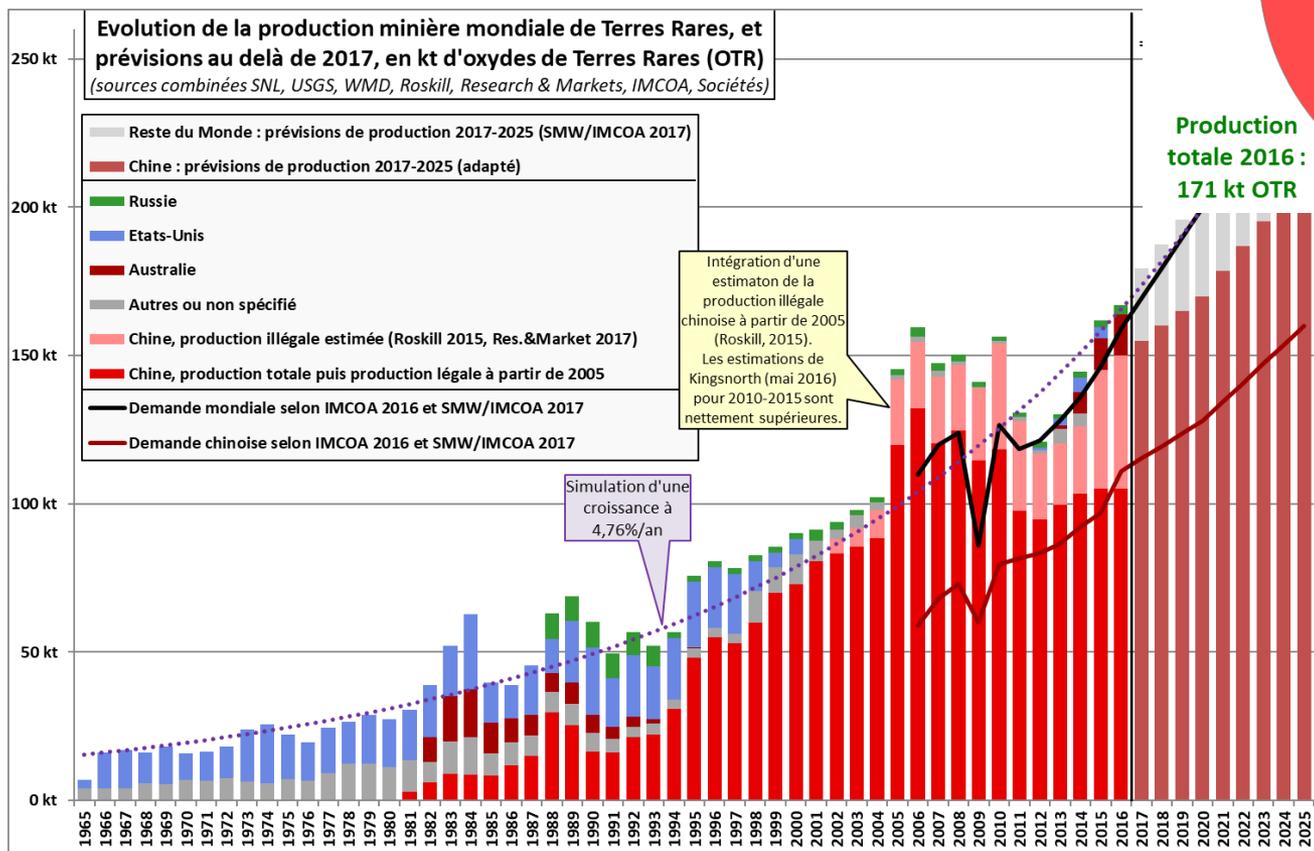
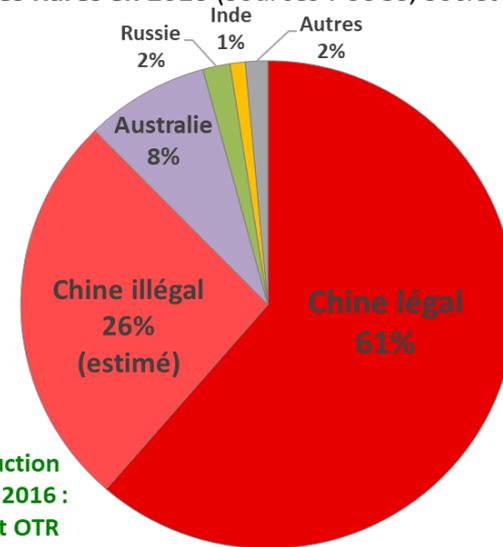
- Argiles ioniques : altération superficielle de roches magmatiques pré-enrichies en TR
 - ❖ Sud de la Chine
 - ❖ Altération météorique sous climat tropical humide (latérisation)
 - ❖ Kaolinite, illite, smectites
- Gisements détritiques à minéraux lourds : placers et sables
 - ❖ Inde
 - ❖ Exploités également pour ilménite et rutile (Ti) et zircon (Zr)

■ Autres

- Fonds marins : nodules polymétalliques à Mn, encroûtements à Co et boues sédimentaires
- Sous-produits de l'uranium

- Données sur la production largement **disparates** selon les sources, très **peu fiables** en particulier en raison de la production illégale chinoise (et les productions nord-coréenne et vietnamienne envoyées en Chine)
- Chine : 80-90%** de la production mondiale
- Environ **170 kt en 2018** (fourchette basse car quotas officiels en Chine)

Répartition de la production minière de Terres Rares en 2016 (Sources : USGS, Sociétés, etc.)



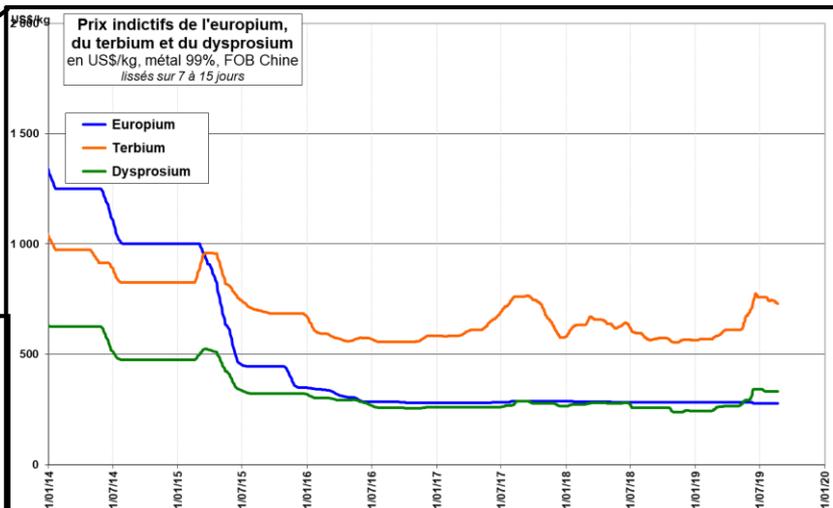
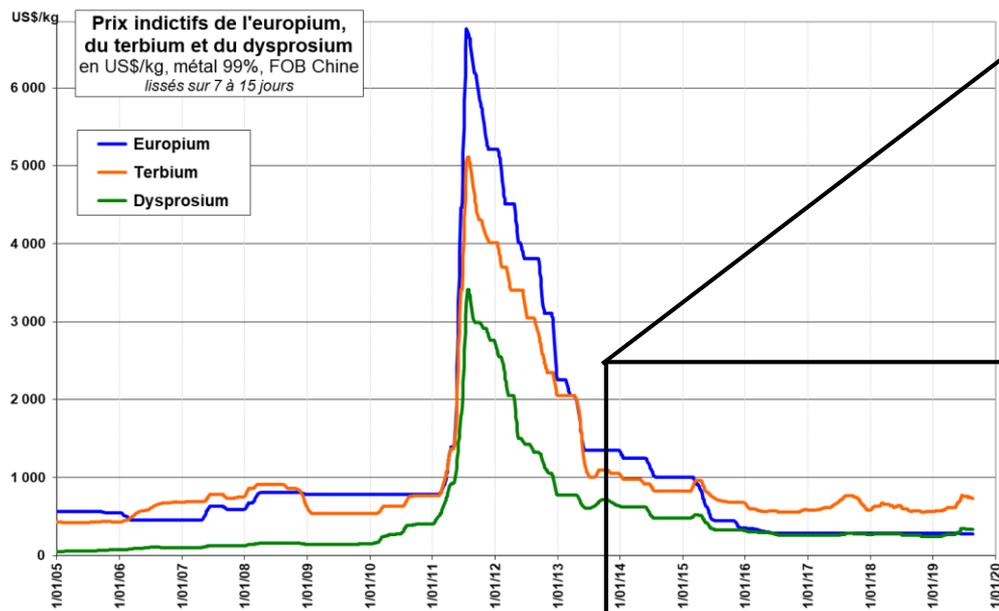
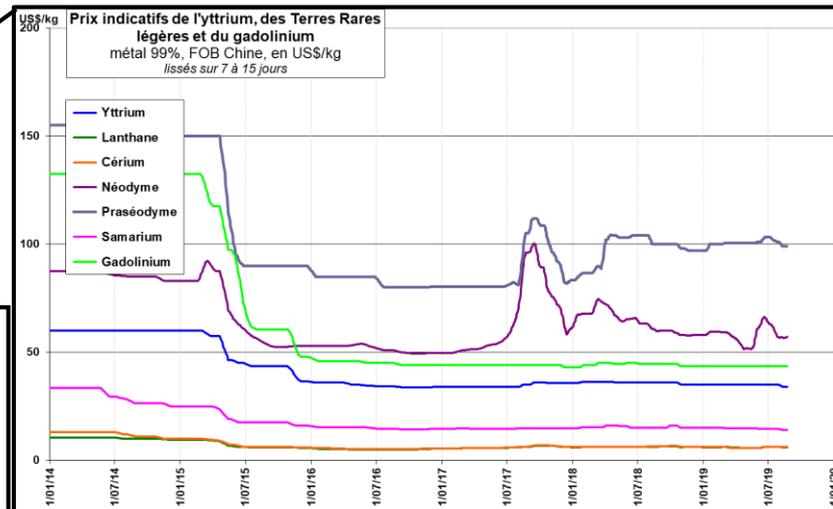
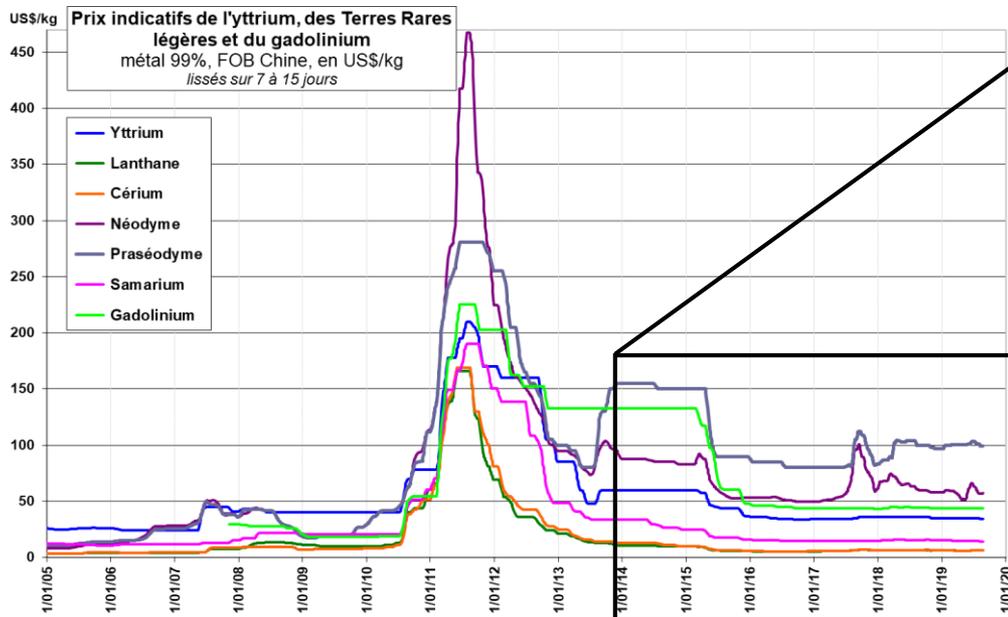
Production par élément (approx.) :

- Ce 38 % ;
- La 26 % ;
- Nd 16,5 % ;
- Y 7,6 % ;
- Pr 4,8 % ;
- Sm 2 % ;
- Gd 1,7 % ;
- Dy 1 % ;
- Er 0,7 % ;
- Eu 0,3 % ;
- Tb 0,3 % ;
- Er 0,7 % ;
- Autres (Ho, Tm, Yb, Lu) 1,3 %.

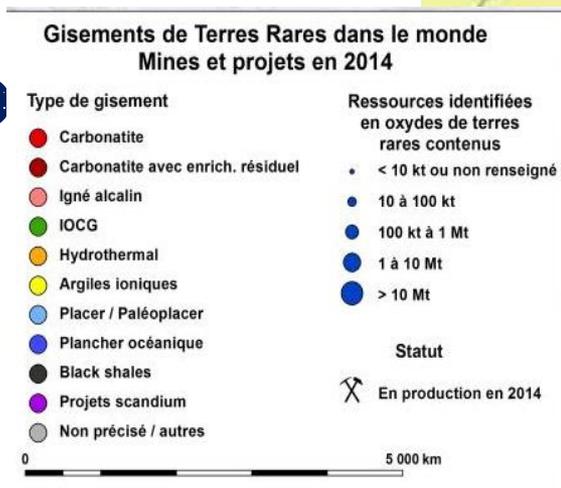
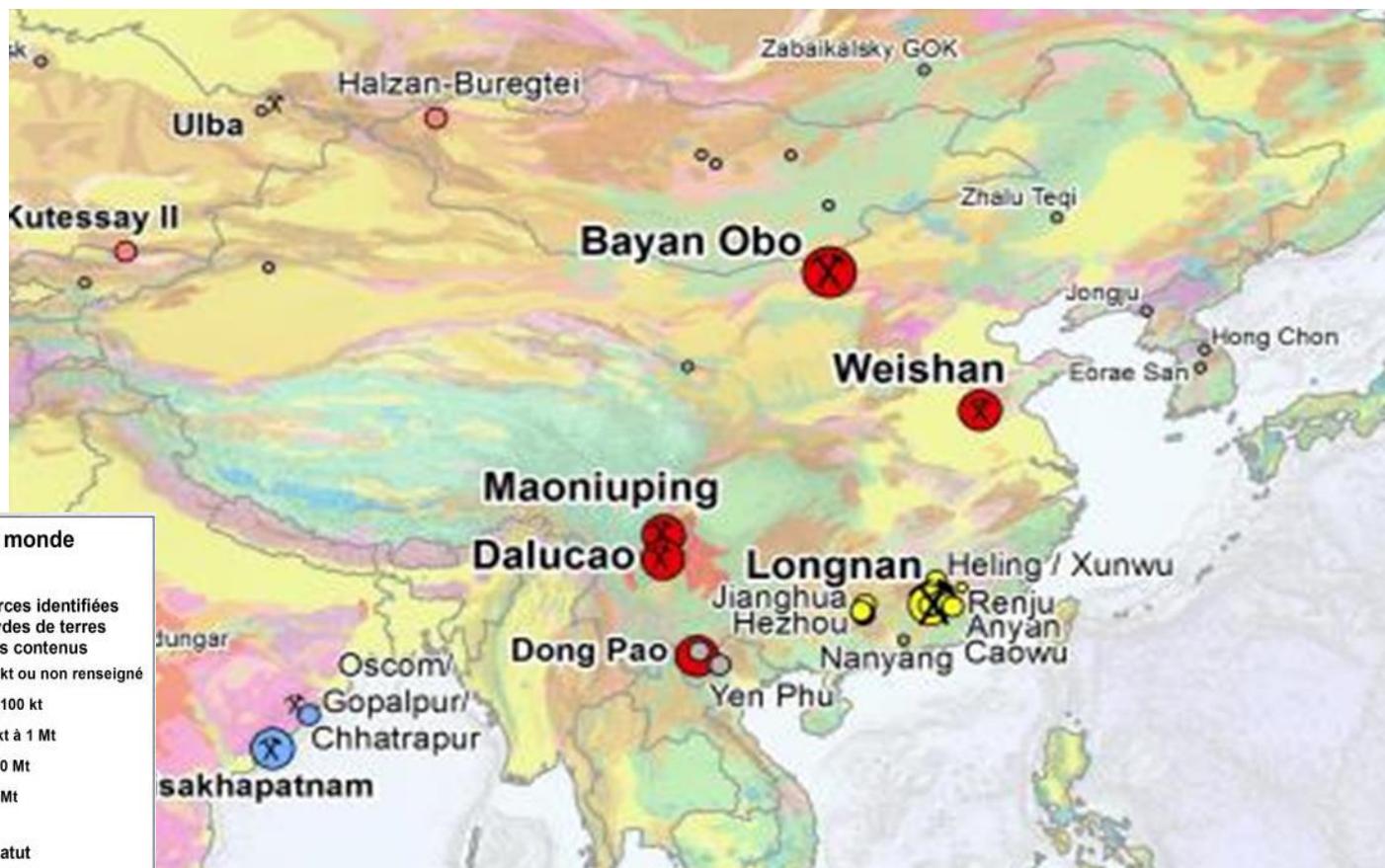
- Recyclage des Terres Rares **encore limité**. Graedel et al. (2011) l'estimait < 1 %.
- Recyclage des aimants permanents
 - Les sociétés japonaises Santoku, Hitachi, Shin-Etsu, Showa Denko, Mitsubishi Materials développent le recyclage du néodyme et le dysprosium des aimants permanents **avec succès** : l'usine de Shin-Etsu en Inde est sur le point de doubler ses capacités (2.2 kt). Aujourd'hui une source non négligeable de dysprosium d'origine secondaire
- Recyclage des batteries NiMH
 - Solvay/Rhodia recycle depuis 2011 les TR des batteries NiMH en partenariat avec Umicore.
 - Plusieurs constructeurs japonais ont également créé les circuits de recyclage adaptés (ex. Toyota Tsusho)
- Recyclage des poudres luminophores
 - En janvier 2016, **Solvay** a annoncé renoncer à cette production, devenue non-rentable (mais recyclage marginal toujours réalisé).
 - La société étatsunienne Rare Earth Salts a annoncé le 14 juin 2017 le démarrage (commissioning) d'une nouvelle usine de séparation des Terres Rares au Nebraska, à partir des poudres de luminophores d'ampoules fluocompactes usagées, avec une production 2018 de 430 t/an (Y, Eu, Tb, Ce et La)

- **Difficilement substituables**, généralement avec baisse des performances ou hausse des prix
- Basculement de technologies
 - Principale réponses des acteurs occidentaux face à la pression chinoise en 2010-2011
 - Aimants permanents
 - ❖ Moteurs à bobines de cuivre pour automobiles (Renault)
 - ❖ Aimants à induction pour rotors d'éoliennes (Enercon)
 - Batteries NiMH → Lithium-ion
 - Ampoules fluocompactes → LED
- Remplacement d'une TR par une autre TR
 - Ajout de TR plus légères (La, Ce) au détriment des plus lourdes (Nd, Pr) dans les aimants permanents de moindre performance → diminution des coûts et de la criticité
 - Réduction de la quantité de Dy dans les aimants haute performance
 - Réduction de 50% de Nd et suppression de Dy et Tb dans les Prius 5^{ème} génération (Toyota)

- Prix des TR établis par négociations directes de contrats entre producteurs primaires et transformateurs ou utilisateurs, éventuellement par l'intermédiaire de négociants ("traders"). Les échanges sont donc **relativement opaques** en termes de volumes et de prix.
- Argus Media (www.argusmedia.com) publie quotidiennement une fourchette de prix spot d'échanges de 8 Terres Rares (La, Ce, Nd, Pr, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy et Y) sous forme d'oxydes et sous forme de métal, en USD/kg FOB Chine, ainsi qu'en CNY sur le marché intérieur chinois. Ces prix, même s'ils ne sont pas ceux des contrats à long terme, illustrent bien les tendances et sont un **indicateur de l'équilibre offre-demande**.
- Les différents éléments des TR ont des prix qui **s'échelonnent du simple au centuple** ou davantage selon les éléments : ainsi le prix moyen du lanthane métal en juillet 2019 est de l'ordre de 6 US\$/kg, tandis que celui du terbium de 760 US\$/kg, 120 fois plus élevé.



- Au **nord**, Mongolie intérieure, complexe industriel géant de **Bayan Obo**, représentant près de **60%** de la production totale des TR mondiales
- Au **sud**, exploitation des **argiles ioniques**, 98% TR lourdes (Dy,Tr,Er..)



- Gisement de Bayan Obo (Mongolie intérieure)
- 60% des réserves mondiale
- 50% des TR chinoises



Source : Le Monde



- Production minière **légitime** intégralement réalisée par des sociétés chinoises généralement **contrôlées par l'État** ou les provinces.
- Le plus gros producteur en tonnage, de Terres Rares légères dominantes, est historiquement Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth Hi-Tech Co., Ltd, du groupe Baotou Iron and Steel, devenu China Northern Rare Earth Group, qui exploite le gisement de fer de Bayan Obo, en Mongolie intérieure, qui contient des Terres Rares en sous-produit.
- Grand nombre d'autres sociétés exploitantes plus petites, qui tendent à se réduire en étant intégrées à des consortiums plus grands ou plus généralistes
- Exploitations presque **artisanales** ou à petite échelle, en particulier sur les **argiles ioniques** du sud-est de la Chine, dont une partie est **illégitime** (selon l'association chinoise de l'industrie des Terres Rares, **40 % des TR** chinoises seraient produites de façon illégale).
- Efforts de rationalisation en 2014-2015 : Formation de 6 **consortiums** regroupant l'essentiel de la production et du traitement des TR

Nouveaux consortiums	Groupe parent	Provinces / Régions autonomes
China Northern Rare Earth Group	Baotou Iron and Steel Group	Mongolie Intérieure, Gansu
Chalco/Chinalco	Chalco	Guangxi, Jiangsu, Sichuan, Shandong
China Minmetals	China Minmetals Corp	Guangdong, Jiangxi, Hunan, yunnan, Fujian, Guangxi
Xiamen Tungsten	Xiamen Tungsten	Fujian
China Southern Rare Earth Group	Ganzhou Rare Earth Group	Jiangxi
Guangdong Rare Earth Group	Guangdong Rising Nonferrous Metals Group	Guangdong

- En 2015, **quotas à l'exportation supprimés**, remplacés par **quotas de production** par provinces. Ces quotas sont de 120 kt d'OTR en 2018 (105 kt OTR en 2016 et 2017). Le gouvernement a annoncé vouloir limiter la production à 140 kt en 2020
- Les estimations de **production illégale** pour 2018 varient de 40 à 50 kt (jusqu'à 95 kt selon les sources)! Les autorités continuent à déclarer vouloir faire cesser cette production illégale.
- La capacité de production et de traitement chinoise serait de 300 kt/an, les autorités souhaiteraient la ramener à 200 kt/an pour 2020.



*Technique de lixiviation in situ
« artisanale », utilisée pour la
récupération des TR lourdes*

- La plupart des grands groupes chinois impliqués dans l'exploitation des TR sont également présents aux étapes de transformation et fabrication de semi-produits et produits finis, dont les aimants permanents, les batteries NiMH, les poudres de polissage, luminophores, etc.
- On retrouve donc les acteurs des principaux groupes déjà cités : China Northern Rare Earth Group (Baotou) ; China Minmetals ; Xiamen Tungsten ; Chinalco Rare Earth ; Ganzhou Qiongdong Rare Earth
- La Chine produit environ **85 % des aimants Nd-Fe-B frittés et 65 % des aimants Sm-Co mondiaux**. Il existerait plus de 130 sites de production en Chine pour les aimants Nd-Fe-B frittés, surtout concentrés à Pékin, Ningbo et Shanxi. Ils représentent une capacité totale de production de 130 kt par an.
- Entre 2010 et 2018, la production totale d'aimants est passée de **82,6 kt à 164 kt**
 - Production Nd-Fe-B frittés : 78 kt → 155 kt
 - Production Nd-Fe-B liés : 4 kt → 7 kt
 - Production Sm-Co : 0,6 kt → 2 kt



Exemples de précurseurs d'aimants permanents NdFeB. ©MPCO

- Impact environnemental et social **catastrophique**
 - Radioactivité, produits chimiques, résidus de traitement mal gérés, cendres et poussières nocives
 - 80% des terres des paysans, polluées, sont aujourd'hui incultivables

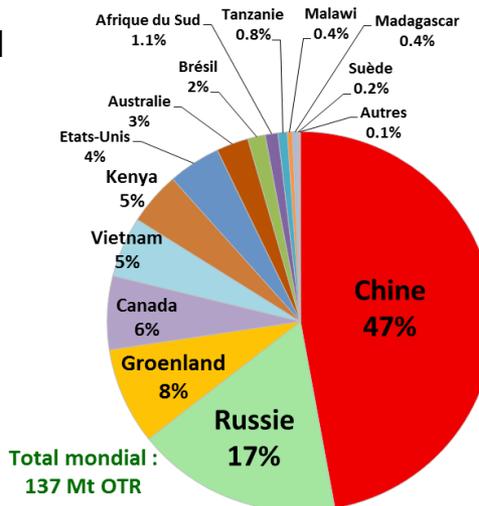


Bayan Obo

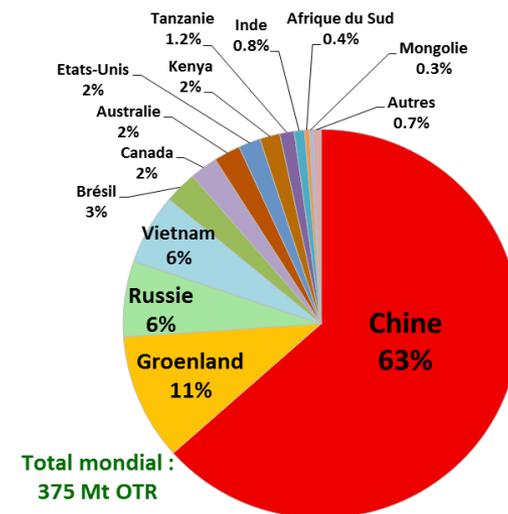


- Évaluation des réserves **non fiables** : réserves chinoises non calculées de manière vérifiable selon les critères occidentaux
- Réserves et ressources par élément mal connues (Chine)

Répartition des ressources en Terres Rares - hypothèse basse 2015
(sources mixées SNL, TMR, Roskill, 2015)



Répartition des ressources en Terres Rares - hypothèse haute 2015
(sources mixées SNL, TMR, Roskill, 2015)



Equivalence des réserves et ressources répertoriées en années de production

	Production 2016	Réserves	Durée équivalente à prod. constante équiv. à 2016	Durée de vie à production croissante à 5%/an	Ressources	Durée équivalente à prod. constante équiv. à 2016	Durée de vie à prod. croissante à 5%/an
Chine	150 kt	52.1 à 65.8 Mt	350 à 440 ans	59 à 64 ans	64.5 à 237.8 Mt	430 à 1580 ans	59 à 81 ans
Monde	171 kt	64.6 à 89.6 Mt	380 à 520 ans	63 à 89 ans	136.9 à 374.9 Mt	800 à 2200 ans	75 à 96 ans

■ Australie : les projets progressent

- Lynas : mine de Mt Weld et traitement en Malaisie
 - ❖ 2^{ème} producteur minier (20 kt d'OTR) et unique usine de traitement hors Chine
 - ❖ 65% de l'approvisionnement japonais pour fabrication d'aimants
 - ❖ Obtention d'un accord pour 6 mois
 - ❖ Doivent traiter les résidus radioactifs
- Arafura Resources : projet de Nolans
 - ❖ « L'un des plus gros gisements de Nd et Pr mondial » selon la compagnie : 56 Mt @ 2,56% OTR
 - ❖ Production estimée à 7 kt / an d'OTR d'ici 2020
- Northern Minerals : projet de Browns Range
 - ❖ Riche en Y et surtout Dy, début 2021?

■ Etats-Unis : reprise de Mountain Pass

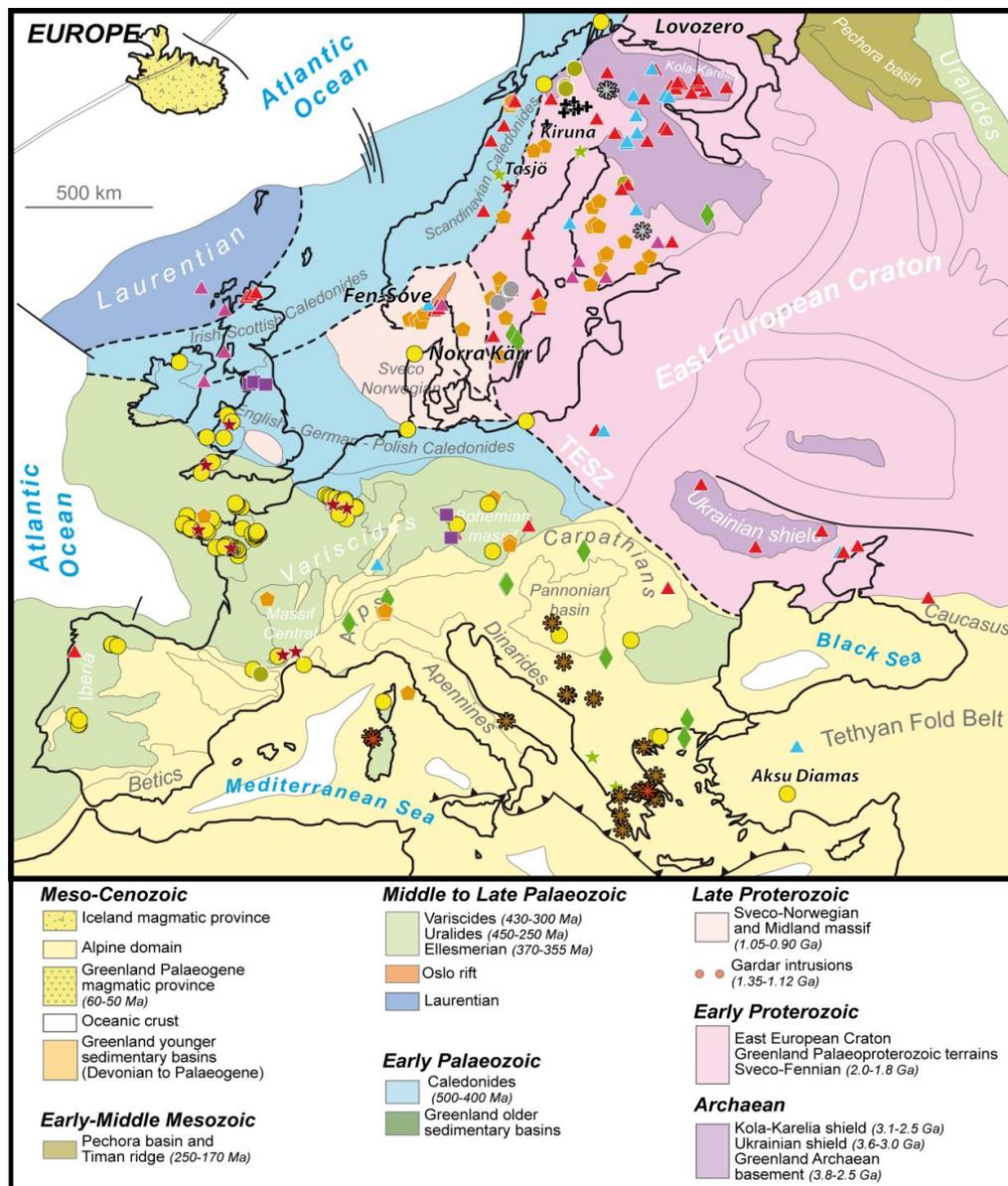
- 2 fonds américains (80%) + Leshan Shenghe Rare Earths (10%) : mine de Mountain Pass (Californie)
 - ❖ Exploité par Molycorp jusqu'en août 2015 (faillite)
 - ❖ Redémarrage de l'activité début 2018
 - ❖ Exportation du minerai vers la Chine
- Construction de 2 nouvelles usines dont une usine de traitement par Lynas au Texas

■ Autres : la montée en puissance des autres acteurs

- Burundi :
 - ❖ Société Rainbow Rare Earths produit 1 kt de concentrés de TR à 58% OTR en 2018 avec objectif de produire 5-6 kt de concentré d'ici 2020
- Russie :
 - ❖ Solikamsk exploite en Russie mais traitement dans l'usine Silmet (Estonie) avec production de 3 kt d'OTR en 2018
 - ❖ Développement du gisement de Tomtor par ThreeArcMining, Rostec et ICT Group avec une construction prévue pour 2021 et une production annoncée de 20 kt d'OTR / an !
- Autres pays :
 - ❖ Production assez faible et très peu de projets miniers

- Scandinavie
- Grèce
- Royaume-Unis
- France
- Groenland

→ Ressources minières non négligeables, en particulier en Scandinavie (et surtout au Groenland)



Source : Charles et al. (2014)

■ Gisement de **Kvanejfeld**

- Un des plus gros gisements de TR au monde (10 Mt d'OTR)
- TR + U, Zn, Fluorine
- Développé par la compagnie australienne Greenland Minerals Ltd.
- Début 2020?

■ Mais

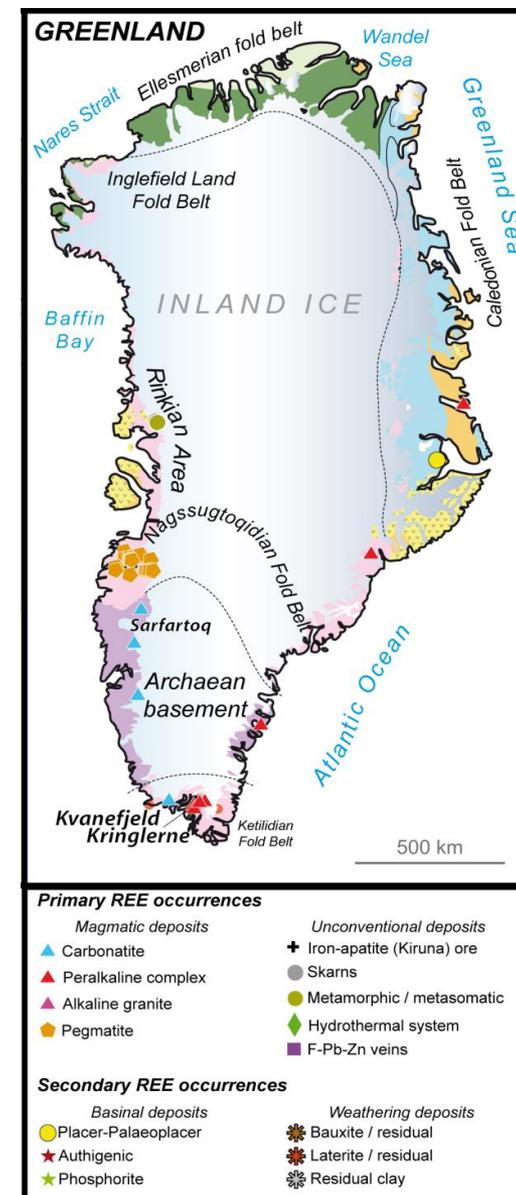
- Shenghe Resources Holding Co est le principal actionnaire de Greenland Minerals (également présente dans le consortium pour Mountain Pass)
- Joint-Venture entre Shenghe Resources et China National Nuclear Corp. pour donner une nouvelle société : China Nuclear Hua Sheng Mining
- Cette nouvelle société s'occupera de l'importation, exportation et le commerce des concentrés de TR contenant des éléments radioactifs.

- Accord « off-take » (enlèvement) de 32 000 t/ an de concentrés signé
- Shenghe peut augmenter ses parts dans Greenland à 60% d'ici 2020

■ Problème

- Demandes de permis d'exploitation soumises en 2015 et pas encore finalisées, en particulier sur les sujets d'impacts environnementaux

→ Exemple de la stratégie chinoise de développement de projets hors Chine

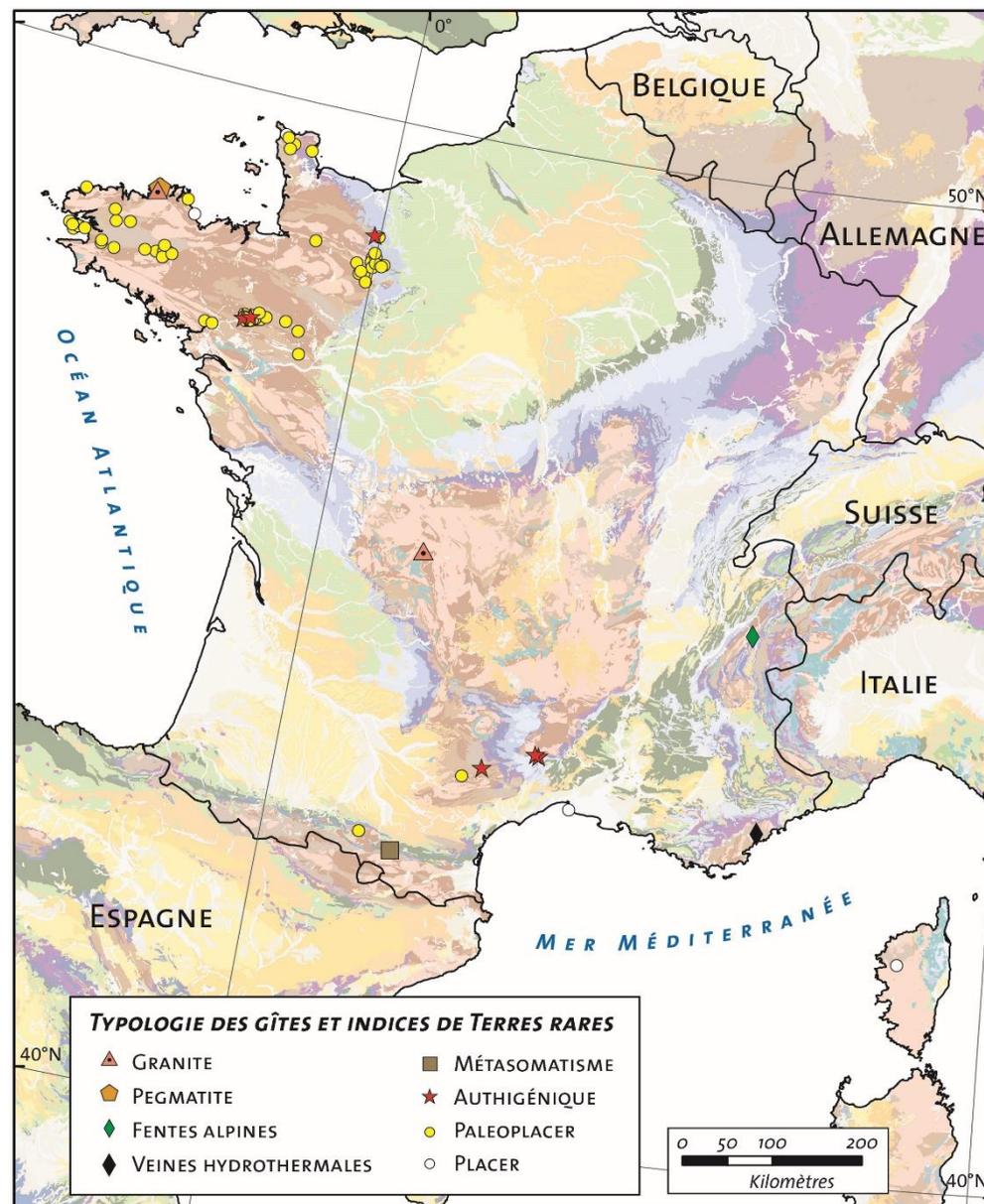


Source : Charles et al. (2014)

- Plusieurs typologies
 - Schistes noirs à monazite
 - Placers à monazites grises (Bretagne Pyrénées, Ardenne)
 - Métasomatisme : Trimouns-Luzenac (talc)

- Mais à Terres Rares légères, tonnages faibles...

→ **Un potentiel français limité par la géologie**

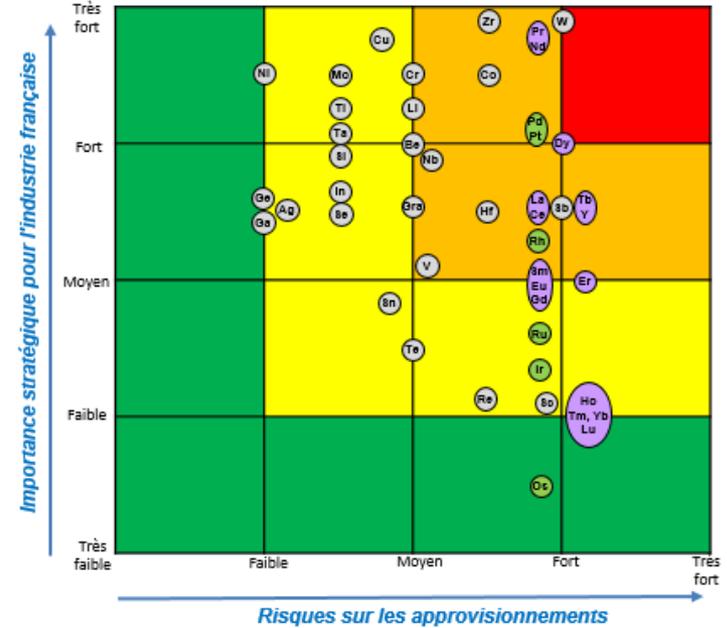
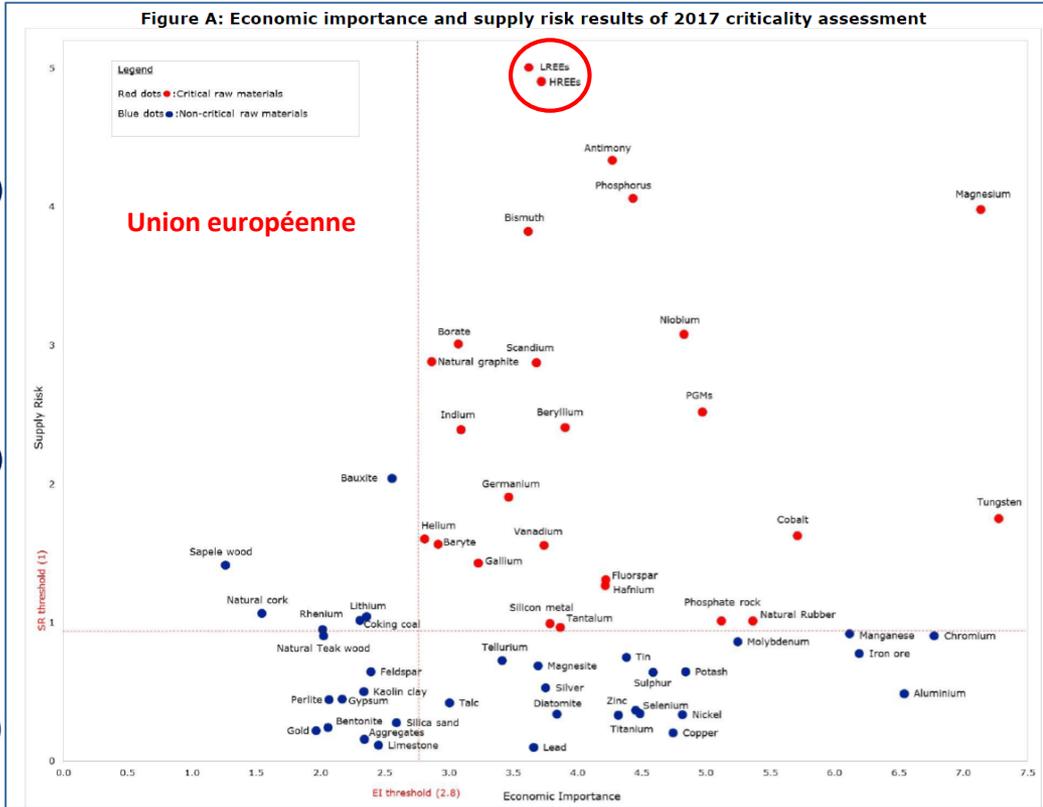


Charles et al. (2015)

Enjeux IV : Des métaux très critiques

- **Métaux critiques et stratégiques** pour de nombreux pays (quasiment tous?)

ÉVALUATION DE LA CRITICITÉ DES SUBSTANCES OU GROUPES DE SUBSTANCES ÉTUDIÉS PAR LE BRGM
Positionnements actualisés à mi 2019 ("Fiches de criticité")



- Red:** Zone à forte criticité. Actions conservatoires à prendre par l'Etat. Suivi de l'évolution des indicateurs de criticité.
- Orange:** Zone à forte criticité. Veille active recommandée (observation continue des marchés, alertes, étude de scénarios de parade).
- Yellow:** Zone à criticité moyenne. Veille spécialisée recommandée (rédaction d'un rapport mis à jour annuellement).
- Green:** Zone à criticité faible. Veille ponctuelle recommandée.
- Green circle:** Platinoïdes (éléments du groupe du platine)
- Purple circle:** Terres rares
- Grey circle:** Gra Graphite naturel

- Les USA importent 100% des TR dont 80% de Chine

- Demande mondiale devrait continuer à croître, surtout pour les aimants permanents (NdFeB), en particulier avec le développement des véhicules électriques
- La bulle de 2010-2011 aura permis de découvrir de nouveaux gisements
- La plupart des projets miniers hors Chine ont été pour la majorité arrêtés ou mis en sommeil en 2014-2015, avec arrêt des financements. Avec la nouvelle hausse des prix, certains projets pourraient redevenir rentables
- Pas de craintes de pénuries physiques de ressources, mais valorisation uniquement si rentables financièrement (prix hauts, partenariats stratégiques, obtentions de financements)
- Menace de la Chine toujours présente, qui peut décider à tous moments de submerger le marché pour refaire baisser les prix et ainsi mettre en faillite nombre de projets émergents.
- Avril 2018 : découverte japonaise de ressources sous-marines de TR. Pas de perspectives à court terme, fortes contraintes techniques
- Recyclage toujours limité, excepté au Japon

- Chine contrôle toujours 90% du marché et reste active en dehors de ses frontières
- Chine souhaite maîtriser sa production de TR, en réduisant ou contrôlant la part illégale : succès limité
- Chine incite les fabricants du reste du monde à produire en Chine
- Volonté de développer et s'approprier la filière aval de la chaîne de valeur (haute technologie), des gisements aux véhicules électriques
- Finances des sociétés chinoises se sont nettement améliorées depuis 2017
- Capacité théorique de production de 300 kt/an (double de la production actuelle), donc garde le contrôle sur la production mondiale, en jouant sur les prix, comme pour d'autres métaux (W, Sb)
- Conglomérats chinois peuvent se permettre que la partie extractive soit déficitaire, si la partie aval est rentable, contrairement aux sociétés occidentales, qui doivent être rentables sur toute la filière
- A terme, d'autres gisements devront être développés dans le monde

■ Divers

- BRGM : www.brgm.fr
- Minéralinfo : www.mineralinfo.fr

■ Sources

- Labbé J.F., Lefebvre., Bru K., Christmann P. (2015) – **Panorama mondial 2014 du marché des Terres Rares**. Rapport public. BRGM/RP-64330-FR. 193 p., 58 fig., 32 tab.
- Tuduri J., Charles N., Guyonnet D., Melleton J., Pourret O., Rollat A., 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, 119 p., 12 fig., 3 tabl., 4 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64910-FR.pdf>.
- Gaétan Lefebvre. **Sursaut sur le marché des Terres Rares en 2017**. <http://www.mineralinfo.fr/ecomine/sursaut-marche-terres-rares-en-2017>
- Site internet des compagnies
- Adamas Intelligence : www.adamasintel.com
- Roskill : www.roskill.com

■ En complément

- L'élémentarium, Société Chimique de France : www.lelementarium.fr

■ Pour toutes questions

- Contacter le BRGM, service géologique français, sur le portail mineralinfo : <http://www.mineralinfo.fr/contact>

Merci de votre attention

Mathieu Leguérinel