

# LES TERRES RARES ET LEURS USAGES



## Fascinantes Terres rares



Québec

## Terres rares : que sont-elles ?

- 15 éléments métalliques appelés les lanthanides (NA\* 57 à 71)
  - ✓ Légères : Lanthane (La 57), Cérium (Ce 58), Praséodyme (Pr 59), Néodyme (Nd 60), Prométhium (Pm\*\* 61), Samarium (Sm 62); numéros atomique 57 à 62
  - ✓ Lourdes : Europium (Eu 63), Gadolinium (Gd 64), Terbium (Tb 65), Dysprosium (Dy 66), Holmium (Ho 67), Erbium (Er 68), Thulium (Tm 69), Ytterbium (Yb 70), Lutétium (Lu 71); numéro atomique 63 à 71
- + deux éléments métalliques montrant des propriétés similaires : Yttrium (Y 39) et Scandium (Sc 21)
- Leur découverte s'échelonne de 1787 à 1947 (160 ans)
- Seule la mise au point, au milieu du 20<sup>e</sup> siècle, de techniques d'extraction et de séparation commerciales, a permis leurs utilisations dans une foule de produits

\* Numéro atomique

\*\* Le prométhium n'est pas présent à l'état naturel.



# Terres rares : que sont-elles ?



# Terres rares : que sont-elles ?



SC - Scandium



Y - Yttrium



LA - Lanthanum



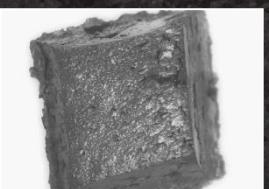
CE - Cerium



PR - promethium



ND - Neodymium



PM - Prométhium



SM - Samarium



EU - Europium



GD - Gadolinium



TB - Terbium



DY - Dysprosium



HO - Holmium



ER - Erbium



TM - Thulium



YB - Ytterbium

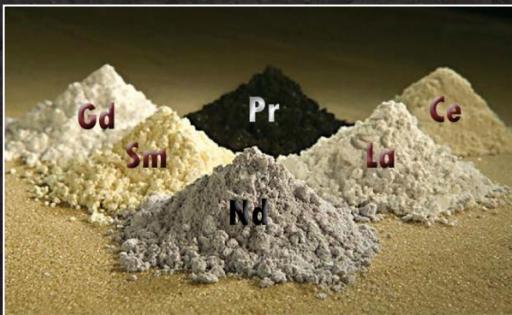


LU - Lutetium



## Terres rares : rares ou pas rares ?

- Le terme « Terres rares » vient de la rareté historique des minéraux à partir desquels on les a isolés au 19<sup>e</sup> siècle
- Elles ne sont pas rares :
  - ✓ aussi abondantes que le cuivre, le nickel, le zinc ou le plomb
  - ✓ plus abondantes que l'or, l'argent, le platine ou le palladium
- Elles sont cependant difficiles à concentrer et à purifier.
  - ✓ On doit généralement extraire et concentrer individuellement chacune des terres rares pour obtenir celles qui sont rentables.



## Terres rares : des minéraux

- Les ressources en terres rares sont principalement associées à seulement trois minéraux : la monazite, la bastnaésite et le xénotyme.
- La nature chimiquement similaire des éléments de terres rares fait que plusieurs d'entre eux se retrouvent ensemble dans la structure cristalline des minéraux de terres rares.
- Ces minéraux ont donc chacun un ratio caractéristique en terres rares légères et lourdes. Certains minéraux sont ainsi enrichis en terres rares lourdes.
- Chaque minéralisation ou gîte minéral ont une signature spécifique.



Mozanite



Bastnaésite



Xénotyme



# Terres rares : des minéraux

- Principaux minéraux
  - Carbonates, phosphates
  - Silicates
  - Certaines argiles  
(adsorption ionique)
- Les minéraux enrichis en terres rares lourdes sont plus recherchés mais ils sont moins fréquents dans la nature.
- Les terres rares doivent être séparées une à une en usine par des procédés laborieux.
- Ces procédés d'extraction sont utilisés pour les carbonates et les phosphates.
- Des procédés d'extraction sont en développement pour les silicates.

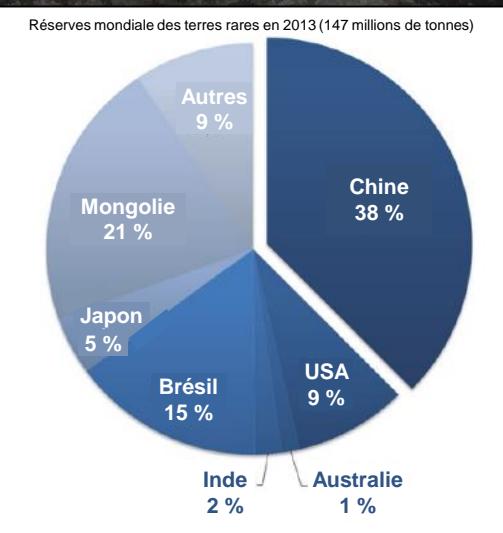
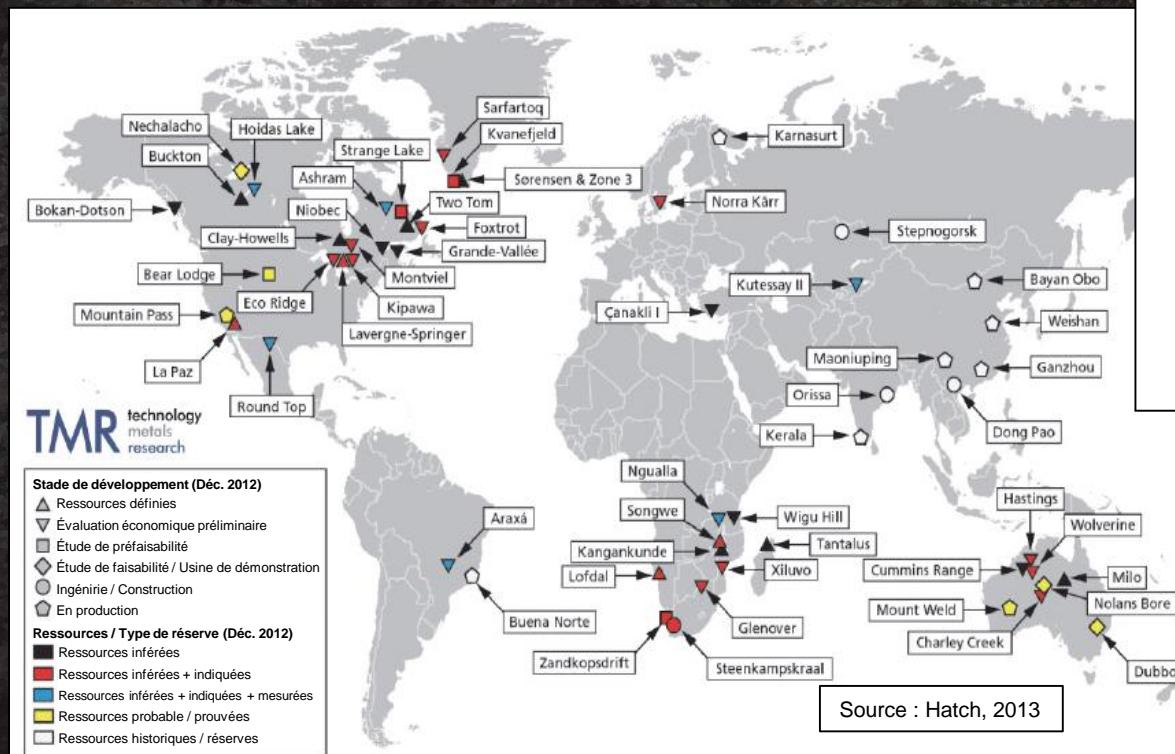
Nom	Formule chimique	% OTR
Aeschynite - (Ce)	(Ce, Ca, Fe, Th)(Ti, Nb) <sub>2</sub> (O, OH) <sub>6</sub> .	32
Allanite - (Ce)	(Ce, Ca, Y) <sub>2</sub> (Al, Fe <sup>3+</sup> ) <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> OH.	38
Apatite	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F, Cl, OH)	19
Bastnäsite - (Ce)	(Ce, La)(CO <sub>3</sub> )F	75
Brannerite	(U, Ca, Y, Ce)(Ti, Fe) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	9
Britholite - (Ce)	(Ce, Ca) <sub>5</sub> (SiO <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH, F)	32
Eudialyte	Na <sub>4</sub> (Ca, Ce) <sub>2</sub> (Fe <sup>2+</sup> , Mn, Y)ZrSi <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH, Cl) <sub>2</sub> (?).	9
Euxenite - (Y)	(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	24
Fergusonite - (Ce)	(Ce, La, Nd)NbO <sub>4</sub>	53
Gadolinite - (Ce)	(Ce, La, Nd, Y) <sub>2</sub> Fe <sup>2+</sup> Be <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>10</sub> -	60
Kainosite	Ca <sub>2</sub> (Y, Ce) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>12</sub> CO <sub>3</sub> .H <sub>2</sub> O.	38
Loparite	(Ce, La, Na, Ca, Sr)(Ti, Nb)O <sub>3</sub>	30
Monazite - (Ce)	(Ce, La, Nd, Th)PO <sub>4</sub>	65
Parosite - (Ce)	Ca(Ce, La) <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> F <sub>2</sub> .	61
Xenotime	YPO <sub>4</sub> .	61
Ytrococrite	(Ca, Ce, Y, La)F <sub>3</sub> .nH <sub>2</sub> O.	53
Huanghoite - (Ce)	BaCe(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F.	39
Cebaite - (Ce)	Ba <sub>3</sub> Ce <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>5</sub> F <sub>2</sub> .	32
Florencite - (Ce)	CeAl <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	32
Synchysite - (Ce)	Ca(Ce, LA)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F.	51
Samarskite - (Y)	(Y, Ce, U, Fe <sup>3+</sup> ) <sub>3</sub> (Nb, Ta, Ti) <sub>5</sub> O <sub>16</sub> -	24
Knopite	(CaTi, Ce <sub>2</sub> )O <sub>3</sub>	na

% OTR : % oxydes de terres rares; TR : terres rares

→ : 4 principaux minéraux de terres rares au Québec



# Terres rares : distribution mondiale des dépôts



Source : USGS (2014a) et Currie (2013b)

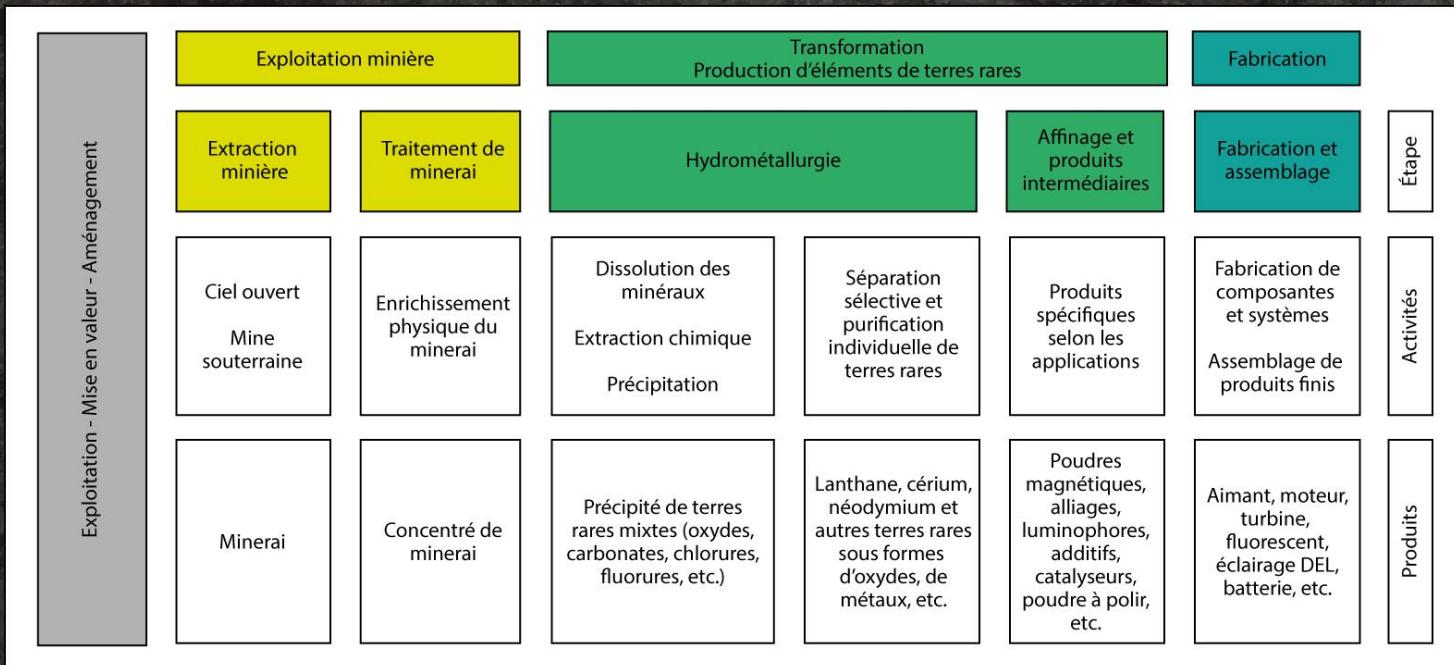


## Un peu de terminologie

- **REE** : éléments de terres rares (La, Ce, Nd,...)
- **TREO** : oxydes de terres rares ( $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ ,...) ( $\pm \text{Y}_2\text{O}_3$ )
- **LREO** : oxydes de terres rares légères
  - ✓  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ ,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,
- **HREO** : oxyde de terres rares lourdes
  - ✓  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Tb}_2\text{O}_7$ ,  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ho}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Tm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Lu}_2\text{O}_3$  ( $\pm \text{Y}_2\text{O}_3$ )
- **CREO** : oxydes de terres rares critiques
  - ✓  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Dy}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Tb}_2\text{O}_3$ , (+  $\text{Y}_2\text{O}_3$ )
- **MREO** : oxydes de terres rares (peu utilisé )
  - ✓  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ ,
- Rapports **LREO/TREO**, **HREO/TREO**, **CREO/TREO** : rapport en %
  - ✓ Ex. : rapport HREO/TREO :  $\Sigma \text{HREO} + \text{Y}_2\text{O}_3 / \Sigma \text{TREO} + \text{Y}_2\text{O}_3$
  - ✓ Ex. : Plus le rapport HREO/TREO est élevé, plus le gisement se démarque (\$)
- Toujours vérifier si l'yttrium est inclus ou non dans les listes et les calculs
- Ne pas oublier qu'à chaque étape (extraction, traitement, transformation), il y a des pertes. Le % total de récupération diffère pour chaque élément de terres rares. La récupération totale peut être basse ( $\leq 80\%$ ).

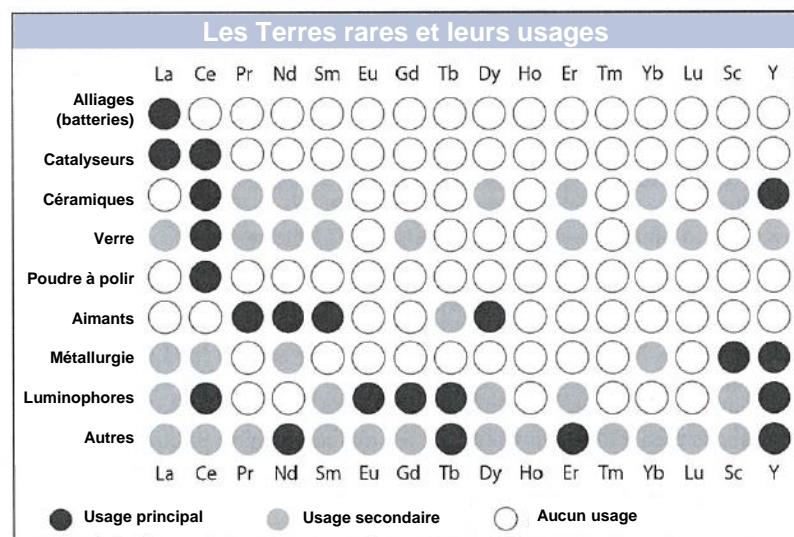
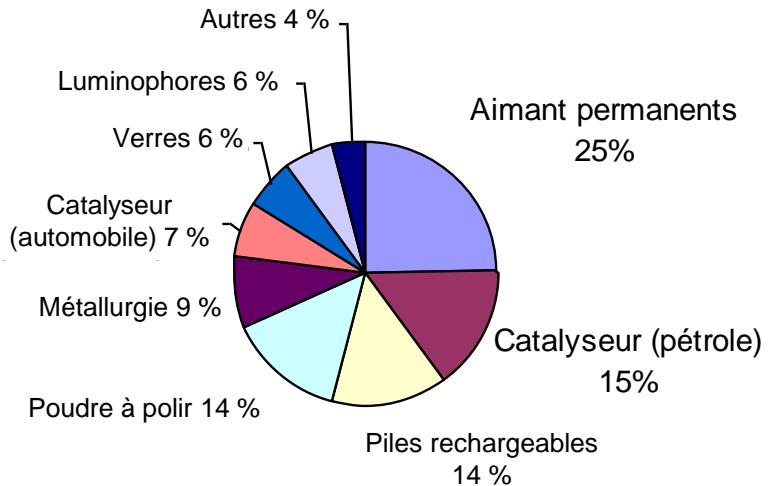


# Terres rares : de la mine au téléphone intelligent



# Terres rares : principales utilisations

Utilisation par les industries (2010)



Source : Volker Zepf, thèse, 2013



# Terres rares : industrie automobile

Les voitures électriques et hybrides peuvent contenir  
de 9 à 11 kg<sup>1</sup> de terres rares

(Deux fois la quantité trouvée dans les voitures à essence)

Additif au carburant diesel  
**Cérium**  
**Lanthane**

Pile hybride NiMH  
**Lanthane**  
**Cérium**

Convertisseur catalytique  
**Cérium/Zirconium**  
**Lanthane**

Plus de 25 moteurs électriques partout dans le véhicule  
**Aimants de Nd**



Pare-brise anti-UV  
**Cérium**

Vitres et miroirs  
Poudre à polir  
**Cérium**

Écran ACL  
**Europium**  
**Yttrium**  
**Cérium**

Capteurs des composants  
**Yttrium**

Moteur et générateur électrique hybride  
**Néodyme**  
**Praséodyme**  
**Dysprosium**  
**Terbium**

<sup>1</sup>Source : « The Race for Rare Metals », The Globe and Mail, 16 juillet 2011



# Usages : aimants permanents

- Découverte majeure (1970)
  - ✓ Miniaturisation, puissance
  - ✓ Réduction du poids et des dimensions
  - ✓ Résistance (température, corrosion, démagnétisation)
  - ✓ Efficacité, économie
  - ✓ Plusieurs types : Sm-Co, Nd-Fe-B, Nd-Fe-Dy-B

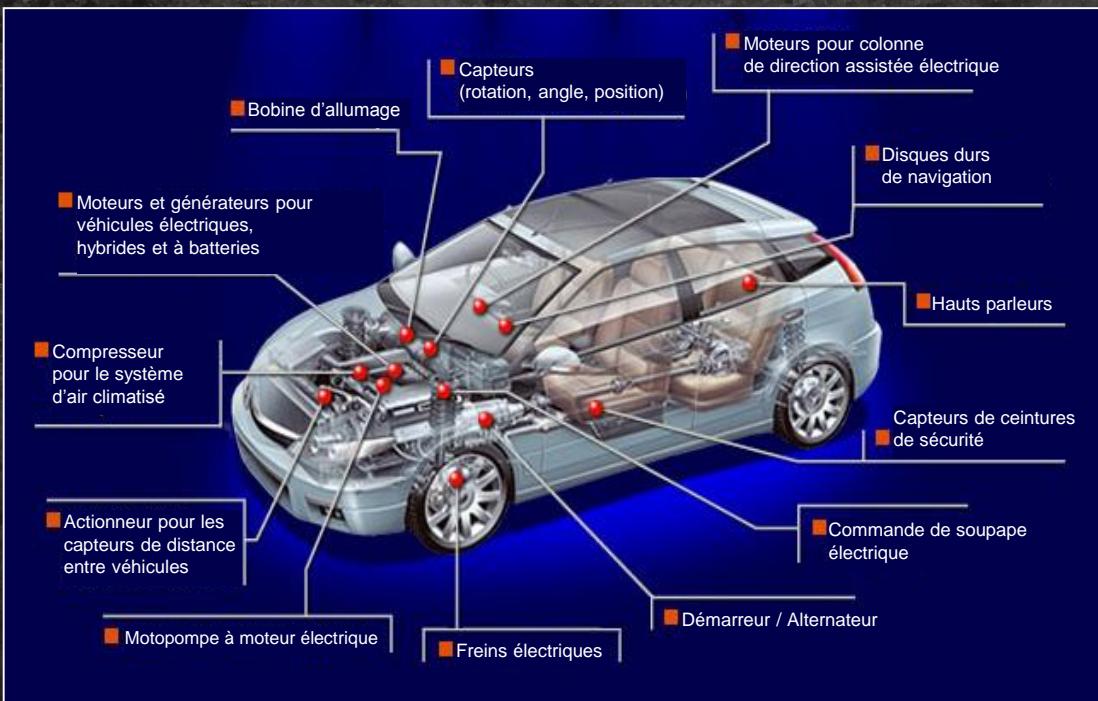


- Nombreux usages
  - ✓ Automobile
  - ✓ Éolien
  - ✓ Électronique
  - ✓ Autres



# Usages : aimants permanents

- Automobile
  - ✓ Moteurs
  - ✓ Capteurs
  - ✓ Actuateurs
  - ✓ Haut-parleurs
  - ✓ Système de freinage
- Aimants
  - ✓ Composés de 30-33 % d'ETR
  - ✓ 1 à 2 kg d'aimants par véhicule
  - ✓ 100 gr Dysprosium par véhicule hybride ou électrique



% OTR : % oxydes de terres rares



## Usages : piles rechargeables

- Batterie NiMH (hydrure métallique de nickel-lanthane) (automobile)
  - ✓ Véhicule hybride
    - Lanthane, cérium, néodyme, praséodyme
    - 4-5 kg par véhicule
- Batterie Li-ions
  - ✓ Véhicules de service
    - Yttrium ( $\text{LiYFePO}_4$ )



## Usages : luminophores et électronique

- Ampoule fluoro-compacte
  - ✓ Éco-énergétique
    - Yttrium, europium, terbium (Dy, Ce, Pr)
- Tube fluorescent et DEL
  - ✓ Éclairage
    - Europium
- Écrans ACL, plasma, IPod, MP3
  - ✓ Couleurs et rendus
    - Yttrium, europium : rouge
    - Cérium, terbium : vert
    - Europium : bleu



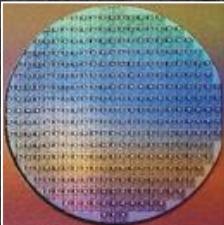
## ► Usages : catalyseur et convertisseur catalytique

- Catalyseur fluidifié de craquage
  - ✓ Raffinage du pétrole (essence, diesel et carburants légers)
    - lanthane, cérium, néodyme, praséodyme
- Convertisseur catalytique
  - ✓ Réduction de la pollution automobile
    - cérium, lanthane, néodyme



## Terres rares : autres usages

- Poudre à polir
  - ✓ Semi-conducteur, transistor, écran ACL, plasma
    - cérium
- Additifs au verre
  - ✓ Lentilles, UV, imagerie rayon-X
    - cérium, lanthane, néodyme
    - gadolinium, erbium, holmium
- Alliages métallurgiques
  - ✓ Acier, superalliage, armement
    - cérium, yttrium, dysprosium, autres



## Terres rares : autres usages

- Agent de contraste pour imagerie par résonance magnétique (Gd)
- Radiographie (Gd, Tb), médicament (Dy)
- Céramique et verre
- Disque compact, mémoire d'ordinateur
- Système de guidage et laser (Nd, Sm)
- Aérospatiale
- Nucléaire (Gd, Dy, Y, autres)
- Lunettes protectrices UV, soudure (Sm, Gd)
- Papier monnaie (Eu)
- Nouveaux usages : RP-LED, PVC



## Terres rares : enjeux

- Recyclage
  - ✓ Cela est technologiquement difficile.
  - ✓ Le recyclage des poudres métalliques se fait déjà.
  - ✓ Le volume de matériau à recycler est encore peu élevé.
  - ✓ Fluorescents et lampes DEL : on note le début d'une filière de recyclage.
  - ✓ Le recyclage réduit la dépendance à de nouvelles sources de terres rares.
- Substances de remplacement
  - ✓ Certaines terres rares jugées irremplaçables.
  - ✓ Les produits de substitution peuvent avoir des performances moindres.
  - ✓ Tout est question du rapport entre : prix / disponibilité / performances.
  - ✓ Les recherches se poursuivent pour trouver ces substances de remplacement.



# Terres rares : avenir

- Marchés et disponibilités
  - ✓ L'arrivée de nouveaux producteurs miniers et de nouveaux transformateurs hors Chine est moins rapide que prévue. Les prix, actuellement bas, ralentissent les investissements.
  - ✓ Les fabricants et les pays utilisateurs recherchent des sources d'approvisionnement fiables et à long terme pour alimenter leurs industries.
  - ✓ Il n'y aurait pas de pénurie à prévoir à moyen terme.
  - ✓ Plus de disponibilité sur le marché stimulerait la recherche de nouvelles utilisations des terres rares.
  - ✓ La consolidation de l'industrie des terres rares se poursuit en Chine.
  - ✓ La considération des enjeux environnementaux, le recyclage et la substitution font maintenant partie des stratégies d'approvisionnement.
  - ✓ Les terres rares les plus recherchées sont : dysprosium, néodyme, europium, terbium, yttrium, (gadolinium).
  - ✓ Certains gisements du Québec sont enrichis en terres rares parmi les plus recherchées.



## Quelques liens

- [www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/mineralProfiles.html](http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/mineralProfiles.html)
- [pubs.usgs.gov/fs/2014/3078/pdf/fs2014-3078.pdf](http://pubs.usgs.gov/fs/2014/3078/pdf/fs2014-3078.pdf)
- [www.rncan.gc.ca/mineraux-metaux/accueil](http://www.rncan.gc.ca/mineraux-metaux/accueil)



# Crédits photographiques

- Page 1 : Wikipédia (Peggy Greb (US department of agriculture))
- Page 3 : [www.periodni.com](http://www.periodni.com)
- Page 4 : Wikipédia (Materialscientist, Jurii, Alchemist-hp)
- Page 5 : Wikipédia
- Page 6 : Wikipédia (Aangelo, Robert Lavinsky, Elya)
- Page 8 : Hatch, USGS (2014a) et Currie
- Page10 : Wikipédia (Dr. Bernd Gross, Peggy Greb (US department of agriculture), Zach Vega)
- Page 11 : Volker Zepf
- Page 12 : The Globe and Mail
- Page 13 : Wikipédia (Cskey, Zach Vega, Molgreen)
- Page 14 : Metal Recycling, United Nations Environment Programme
- Page 15 : Wikipédia (Hatsukari715, J. Hammerschmidt, Robert Scoble)
- Page 16 : Wikipédia (Sun Ladder, Zach Vega, Dan Brady, Nakamichi)
- Page 17 : Wikipédia (Cephas, Stahlkocher)
- Page 18 : Wikipédia ( Fir0002/Flagstaffotos, Dan Brady, AKA, Zach Vega)
- Page 19 : CSSS du Lac-des-Deux-Montagnes, Wikipédia (Nakamichi, Amada44, Emilian Robert Vicol, Bin im Garten)
- Page 20 : Wikipédia (Nakamichi, Dan Brady, Molgreen)
- Page 21 : Wikipédia (Molgreen, Sun Ladder, DLLU, Materialscientist, Jurii, Alchemist-hp)
- Page 22 : Wikipédia (Alchemist-hp)
- Page 23 : Wikipédia (AKA)

