

# LES TERRES RARES

## AU DELÀ DE L'OXYMORE<sup>1</sup>



---

1 L'oxymore (nom masculin) rapproche deux termes que leur sens devrait éloigner, dans une formule d'apparence contradictoire. Exemple : *obscur clarté*. ([http://abardel.free.fr/glossaire\\_stylistique/oxymore.htm](http://abardel.free.fr/glossaire_stylistique/oxymore.htm))

## TABLE DES MATIÈRES

1.Définition.....	5
2.Les terres rares, à quoi ça sert ?.....	6
2.1.Le Scandium – Sc.....	6
2.2.L'Yttrium -Y.....	6
2.3.Les Lanthanides.....	6
2.3.1- Le Lanthane.....	7
2.3.2- Le Cérium.....	8
2.3.3- Praséodyme & Néodyme.....	9
2.3.4- Promethium.....	9
2.3.5- Samarium.....	9
2.3.6- Europium.....	9
2.3.7- Gadolinium.....	9
2.3.8- Terbium.....	10
2.3.9- Dysprosium.....	10
2.3.10- Holmium.....	10
2.3.11- Erbium.....	10
2.3.12- Thulium.....	10
2.3.13- Ytterbium.....	11
2.3.14- Lutécium.....	11
3.Où les trouve-t-on ?.....	11
3.1.Le Scandium.....	12
3.2.L'Yttrium.....	12
3.3.Les lanthanides.....	12
3.3.1- Géologie des gisements.....	12
3.3.2- Exploitation.....	14

3.3.3- Les sables de plage et les dunes.....	15
3.3.4- Mountain Pass.....	16
3.3.5- Le cas de la Chine.....	16

## INDEX DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Les Terres Rares dans la classification périodique des éléments.....	5
Figure 2: Les pierres à briquet, une des premières utilisations des terres rares.	6
Figure 3: Résumé des principaux usages des lanthanides.....	7
Figure 4: Manchon à Incandescence.....	7
Figure 5: Aimant au néodyme.....	9
Figure 6: Abondance des éléments dans la croûte terrestre.....	11
Figure 7 : Exploitation de la Thortvéite à Madagascar.....	12
Figure 8: Monazite.....	12
Figure 9: Production de terres rares en tonnes (en équivalent oxyde).....	14
Figure 10: Evolution du cours de terres rares depuis 2008.....	15
Figure 11: Stradbroke Island (Australie).....	15
Figure 12: Minerai de Mountain Pass.....	16
Figure 13: Origine des Terres rares en Chine.....	17
Figure 14: Mine de Weishan ??.....	17
Figure 15: Extraction de la mine de Maoniuping.....	18
Figure 16: Traitement de minerai à Maoniuping.....	18
Figure 17: Vue perspective de la mine de Baiyun.....	19
Figure 18: BaiYun 2009.....	20
Figure 19: BaiYun 2011.....	20
Figure 20: BaiYun 2013.....	20
Figure 21: BaiYun 2014.....	20
Figure 22: La Lagune et le complexe de Baotou.....	21
Figure 23: La lagune de BaoTou ; cheminée d'évacuation des eaux ?.....	21
Figure 24: Situation : Chakou, Beitou, XigGuang.....	21

Figure 25: Deux vues de Chakou.....	22
Figure 26: Exploitation des argiles à terres rares.....	23
Figure 27: Le site de XingGuang.....	24
Figure 28: Le site de Beitou.....	24

# 1. Définition

Les terres rares sont un groupe d'éléments, comme les alcalins, les gaz rares, etc., qui ont des propriétés chimiques voisines. En d'autres termes, dans la classification périodique des éléments, on les trouve dans la même colonne (la 3ème, voir Figure 1).

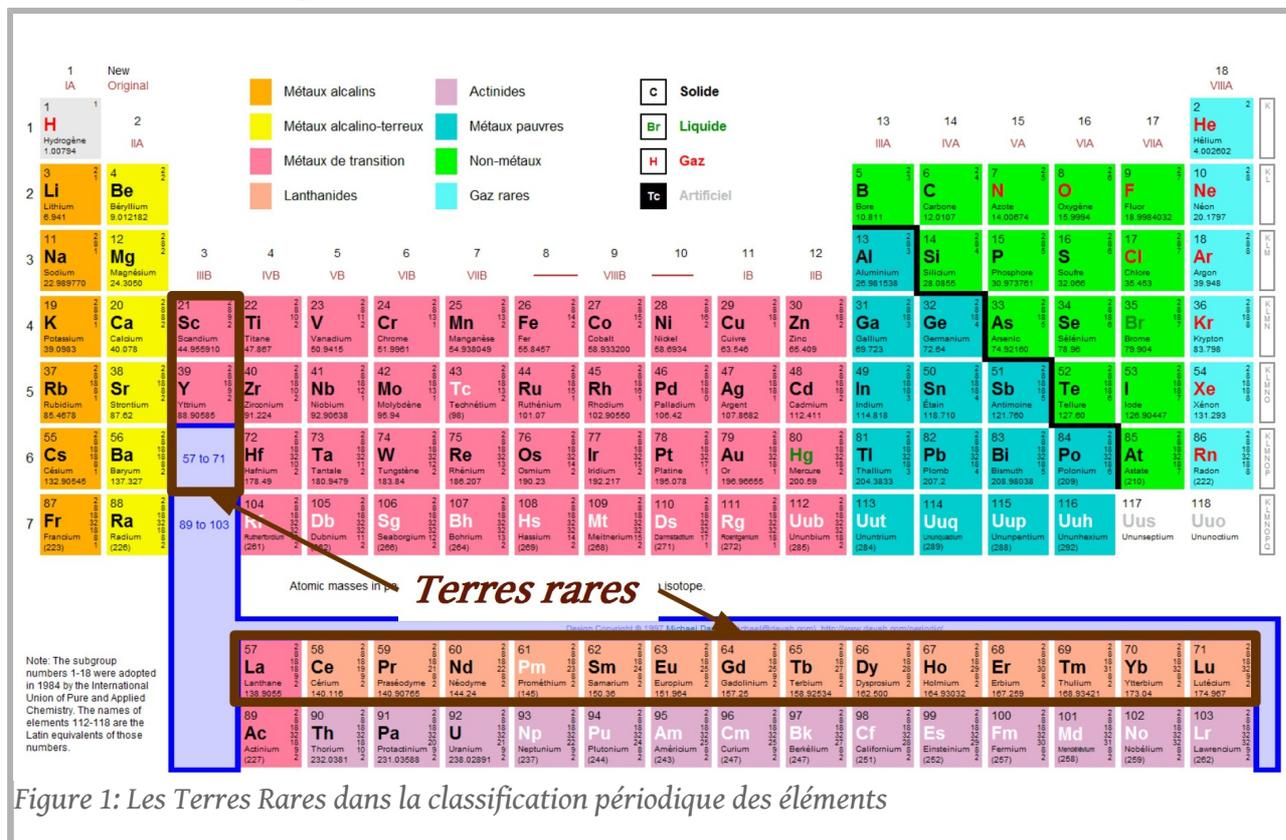


Figure 1: Les Terres Rares dans la classification périodique des éléments

Mais parmi les terres rares, certaines sont encore plus proches les unes des autres : les **Lanthanides** occupent la même case du tableau périodique ! Ceci signifie que, dans ce groupe, les électrons se distribuent, dans une sous-couche, alors que la couche extérieure est la même pour tous ; c'est cette dernière qui détermine les propriétés chimiques\*.

On a ainsi pour toutes les terres rares des propriétés chimiques qui sont aussi proches que le sont celles du Sodium et du Potassium, ou du Baryum et du Strontium.

Ce qui explique qu'on les trouve souvent ensemble dans la nature, et qu'il n'est pas aisé de les séparer.

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.

\*En fait cette explication, basée sur le modèle planétaire de l'atome est dépassée. Les électrons ne se distribuent pas sur des orbites, mais sur des niveaux d'énergie qui correspondent, dans l'espace, à une probabilité de les trouver dans une région donnée, qui n'est pas nécessairement sphérique ou ellipsoïdale. Reste que les terres rares correspondent au "remplissage" du niveau 4f, et que ces électrons là ne participent pas ou peu aux liaisons chimiques...

## 2. Les terres rares, à quoi ça sert ?

Pendant longtemps, disons jusque vers la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, les terres rares n'ont pas servi à grand chose, et leur principale utilisation, ou du moins la plus connue a été la confection de pierres à briquet !

Aujourd'hui, les terres rares sont plus recherchées en raison de propriétés particulières qui permettent des applications très techniques.



Figure 2: Les pierres à briquet, une des premières utilisations des terres rares.

### 2.1. Le Scandium – Sc

Le scandium a deux usages principaux :

- les alliages d'aluminium dont il renforce les qualités mécaniques. Ces alliages sont utilisés dans des applications très exigeantes (sport de haut niveau, aéronautique...). Bien que la proportion de scandium soit faible ( $\approx 0,5\%$ ), l'alliage Al-Sc coûtait en effet 155 \$/kg en 2013...
- les piles à combustible solide (SOFC *solid oxide fuel cell*). L'oxyde de scandium améliore les performances de l'électrolyte (prix 2013 : 5 \$/g – cinq dollars le gramme).

Des usages sont recensés en électronique, en éclairage (tube aux vapeurs de mercure), soins dentaires...

Dans tous les cas les quantités sont très faibles. Le marché mondial est l'ordre de 10 à 15 tonnes par an.

### 2.2. L'Yttrium -Y

L'yttrium est utilisé principalement dans les luminophores<sup>2</sup>. L'oxyde d'yttrium, dopé à l'europium permet d'obtenir la couleur rouge dans les tubes cathodiques, par exemple. On l'utilise également, en moindre quantités dans des applications techniques pour les céramiques, les lasers ou la métallurgie. Le développement des écrans à LED a fait baisser la demande en Yttrium pour les luminophores, et les prix sont à la baisse.

La consommation mondiale est de l'ordre de 6000t par an.

### 2.3. Les Lanthanides

Les lanthanides sont les éléments de numéro atomique de 57 à 71, qui occupent dans le tableau de classification périodique des éléments « la case » située au-dessous de l'yttrium (voir figure 1, page 5)

On distingue classiquement les terres rares *légères* et les terres rares *lourdes*. La limite est située vers le milieu de la série, mais peut varier selon les sources de Samarium/Europium à Terbium/Dysprosium...

<sup>2</sup> Atome ou composé chimique qui émet de la lumière lorsqu'il subit une excitation.  
(<https://fr.wiktionary.org/wiki/luminophore>)

Un résumé des usages des différentes terres rares est donné ci-après Tableau 1, page 8 et schématisées dans la figure ci-dessous, en bas de page.

La plupart des usages, aussi divers qu'ils puissent paraître sont souvent liées à des propriétés magnétiques ou de luminescence. Il est surprenant que des éléments, aux propriétés chimiques très voisines aient des applications aussi diverses et spécifiques.

### 2.3.1- Le Lanthane

\* Les accumulateurs NiMH pour Nickel hydrure de métal sont des accumulateurs électriques rechargeables utilisant de l'hydrure métallique (composé permettant de stocker de l'hydrogène) et de l'oxyhydroxyde de nickel comme électrode. L'hydrure métallique de l'électrode négative est constituée de terres rares et de nickel sous la forme  $LaNi_5$ .

La première utilisation du lanthane fut la fabrication de manchons à incandescence pour les lampes à gaz.

Le premier élément de la série est utilisé dans les batteries NiMH\* qui équipent beaucoup d'équipements techniques, et en particulier les voitures hybrides. À ce titre, une voiture hybride type, comme une Toyota Prius, contient 10 à 15 kg de Lanthane.

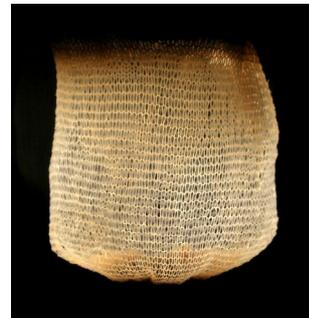


Figure 4: Manchon à Incandescence

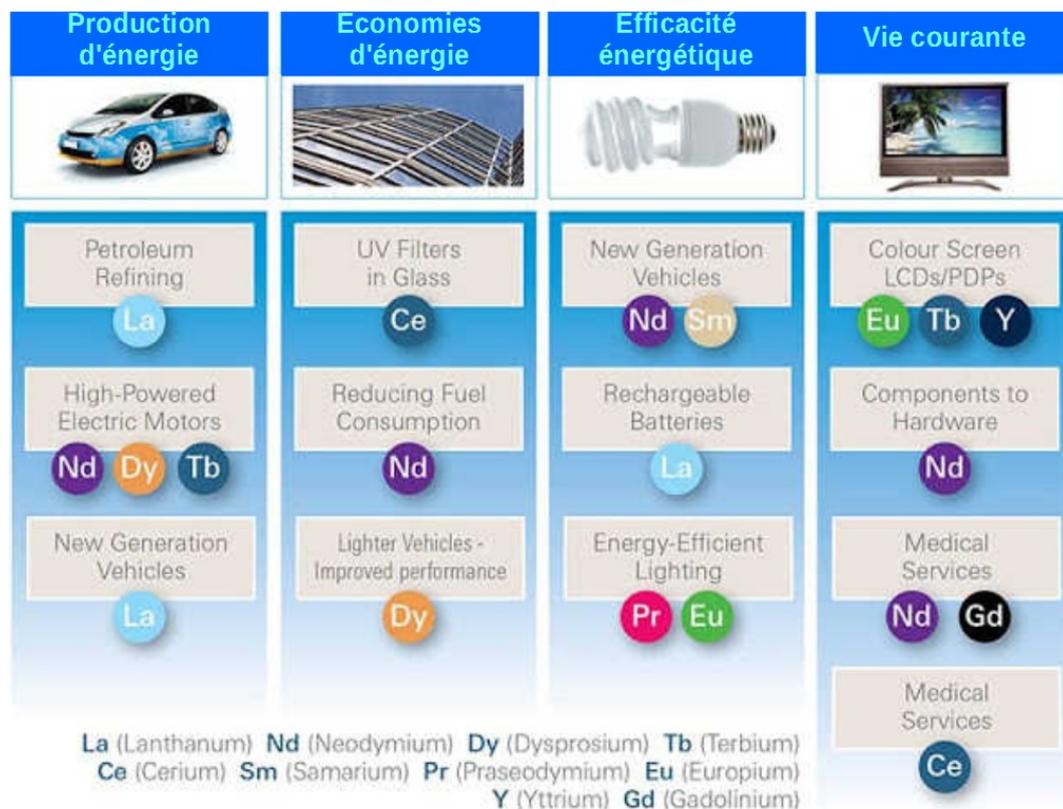


Figure 3: Résumé des principaux usages des lanthanides

<i>La</i> Lanthane	Batteries nickel-métal hydrure ; verres d'indice de réfraction élevé et de faible dispersion ; laser (YLaF) ; verres fluorés ; stockage de l'hydrogène.
<i>Ce</i> Cérium	Agent chimique oxydant ; poudre de polissage du verre (CeO <sub>2</sub> ) ; colorant jaune des verres et des céramiques ; décoloration du verre ; catalyseurs : revêtements de four auto-nettoyants, craquage des hydrocarbures, pots d'échappement ; YAG dopé au Ce : luminophore jaune vert pour les diodes électroluminescentes ; Manchons à incandescence.
<i>Pr</i> Praséodyme	Aimants permanents (allié à Nd) ; Amplificateurs à fibre ; colorants des verres (vert) et des céramiques (jaune) ; lunettes de soudeur (allié à Nd).
<i>Nd</i> Néodyme	Aimants permanents (éoliennes ; voitures hybrides) ; lasers YAG ; colorant violet des verres et des céramiques ; condensateurs céramique ; lunettes de soudeur (allié à Pr).
<i>Pm</i> Prométhium	Applications potentielles de <sup>147</sup> Pm : peintures lumineuses, batteries nucléaires, source d'énergie pour sonde spatiale.
<i>Sm</i> Samarium	Aimants permanents (SmCo <sub>5</sub> ) ; lasers à rayons X ; catalyseurs ; capture neutronique ; masers ; <sup>153</sup> Sm : radiothérapie.
<i>Eu</i> Europium	Luminophores rouges (Eu <sup>3+</sup> ) et bleus (Eu <sup>2+</sup> ) : lampes fluocompactes, écrans renforçateurs pour rayons X, TV ; lasers ; cryptates : sondes biologiques par transfert d'énergie entre molécules fluorescentes.
<i>Gd</i> Gadolinium	Lasers ; capture neutronique : réacteurs nucléaires ; agent de contraste en IRM8 ; Luminophores verts ; écrans renforçateurs pour rayons X ; additif des aciers.
<i>Tb</i> Terbium	Luminophores verts : lampes fluocompactes, écrans renforçateurs pour rayons X, TV ; lasers ; cryptates (voir Eu) ; Terfenol-D (Tb <sub>0,3</sub> Dy <sub>0,7</sub> Fe <sub>1,9</sub> ) : magnétostriction, transducteurs.
<i>Dy</i> Dysprosium	Aimants permanents ; lampes aux halogénures métalliques ; disques durs ; lasers ; Terfenol-D (voir Tb).
<i>Ho</i> Holmium	Lasers chirurgicaux infrarouges ; colorant rose des verres ; standard de calibration en spectrophotométrie ; Aimants permanents.
<i>Er</i> Erbium	Lasers infrarouges (dentisterie) ; Amplificateurs à fibre ; colorant rose des verres et des céramiques.
<i>Tm</i> Thulium	Luminophores bleus pour écrans renforçateurs de rayons X ; supraconducteurs haute température ; lasers YAG infrarouges ; <sup>170</sup> Tm : curiethérapie, radiographie portable.
<i>Yb</i> Ytterbium	Lasers proche infrarouge ; horloge atomique ; acier inoxydable ; <sup>169</sup> Yb : radiographie portable.
<i>Lu</i> Lutécium	Détecteurs en tomographie par émission de positons ; tantalate LuTaO <sub>4</sub> hôte de luminophores pour électrons et rayons X.

Tableau 1: Principaux usages des Terres Rares

### 2.3.2- Le Cérium

Le Cérium est le plus abondant des lanthanides. Sa production est de l'ordre de 24 000 t/an.

Le cérium, réducteur puissant, est utilisé dans les aciers pour piéger l'oxygène et le soufre, mais aussi pour en augmenter la dureté (durcissement structural<sup>3</sup>).

L'oxyde de cérium est la forme la plus utilisée du cérium : c'est un agent de polissage du verre de grande qualité, indispensable dans la fabrication des verres optiques.

Les propriétés catalytiques de l'oxyde de cérium sont utilisées dans le revêtement des fours auto-nettoyants, les pots d'échappement catalytiques et dans l'industrie pétrolière.

### 2.3.3- Praséodyme & Néodyme

Ces deux terres rares sont souvent associées dans la réalisations d'aimants permanents indispensables aux générateurs des éoliennes, et aux moteurs des véhicules hybrides (entre autres). On parle de 600 kg de Néodyme, avec un peu de praséodyme et d'autres éléments pour une éolienne, 1kg pour une voiture hybride.



Figure 5: Aimant au néodyme

### 2.3.4- Promethium

Cet élément a la particularité que tous ses isotopes sont radioactifs. Il n'a que des usages confidentiels, en très petites quantités.

### 2.3.5- Samarium

La principale utilisation du Samarium est la réalisation d'aimants permanents en combinaison avec le Cobalt ( $SmCo_5$ , ou  $Sm_2Co_{17}$ ). Bien que légèrement moins performants que les aimants au Néodyme, ils présentent en revanche une excellente résistance à la démagnétisation et sont stable à plus de 700 °C. parmi les autres usages, on peut citer la catalyse de la dépolymérisation des plastiques, les verres et céramiques dont il augmente la capacité d'absorption des rayons infra-rouge.

### 2.3.6- Europium

Les applications de l'euporium sont liées à la phosphorescence rouge ou bleue, selon le degré d'oxydation. Il est ainsi présent dans les écrans de télévision ou d'ordinateur (0,5 à 1g pour un téléviseur).

### 2.3.7- Gadolinium

Le gadolinium a des applications très ciblées liées à

- ☞ sa grande section de capture des neutrons : radiothérapies , arrêt d'urgence de réacteurs nucléaires,

---

3 Le **durcissement structural** est un procédé permettant de durcir un alliage de métaux. Il nécessite un alliage métastable, dont la forme stable à température ambiante est un inter-métallique constitué de deux phases différentes. Un recuit (...) entraîne la germination de précipités de différentes nouvelles phases plus ou moins stables. Ces précipités, qu'ils soient cohérents ou incohérents avec la phase principale constituent des obstacles sur le chemin des dislocations ce qui augmente la dureté du matériau.  
([https://fr.wikipedia.org/wiki/Durcissement\\_structural](https://fr.wikipedia.org/wiki/Durcissement_structural))

- ☞ son aptitude à conférer aux alliages ferreux de bonnes capacités de résistance à l'oxydation à haute températures,
- ☞ ses propriétés paramagnétiques à température ordinaire : imagerie médicale IRM

Le phosphore de gadolinium a la propriété de convertir les rayons X en lumière verte.

D'autres applications de haute technologie sont en cours de développement.

### 2.3.8- Terbium

Le terbium est utilisé dans les structures électroniques à l'état solide – Solid State Devices, ou SSD en anglais – comme stabilisateur d'autres composants.

En tant que composant du Terfenol-D, le terbium entre dans la composition de matériel électronique qui utilisent les propriétés de magnétostriction de cet alliage. Le Terfenol-D ( $Tb_x Dy_{1-x} Fe_2$ ) est un alliage de Fer, Terbium et Dysprosium dont les dimensions varient selon l'intensité d'un champ magnétique.

Enfin, le terbium est utilisé pour sa luminescence verte aux UV, en particulier, dans l'authentification des billets de banque : associé à l'euprotium divalent (bleu) et à l'euprotium trivalent (rouge), il donne une luminescence blanche intense.

### 2.3.9- Dysprosium

Le dysprosium n'a guère d'utilisation où il est le principal élément en cause. Cependant, on le trouve associé à d'autres terres rares dans nombre d'applications. Nous venons de mentionner le Terfenol-D, mais il faut citer les aimants permanents, les propriétés luminescentes etc.

### 2.3.10- Holmium

L(holmium est l'élément naturel ayant le plus fort moment magnétique<sup>4</sup>. Il est utilisé dans des systèmes magnétiques pour concentrer le flux magnétique et obtenir des champs intenses.

On l'utilise également dans les lasers YIG<sup>5</sup> ou YLF<sup>6</sup> utilisés dans des applications médicales, dentaires ou pour les fibres optiques.

### 2.3.11- Erbium

Les usages communs de l'erbium sont variés. Il est utilisé dans les filtres infra-rouge des photographes et sa résilience rend les alliages plus malléables.

En outre, il sert d'amplificateur de signal dans les fibres optiques.

L'erbium ionique émet une longueur d'onde particulièrement absorbée par l'eau : les lasers ainsi dopés à l'erbium sont utilisés pour des applications médicales ou dentaires.

### 2.3.12- Thulium

Comme l'erbium, le thulium est utilisé pour des lasers chirurgicaux.

---

4 Le moment magnétique est défini comme le moment (la force qui tend à faire tourner cet objet autour d'un axe) que subit un objet à l'application d'un champ magnétique externe

5 Yttrium-Iron-Garnet : Yttrium, fer grenat.

6 Yttrium-Lanthanum-Fluorite : Yttrium, Lanthane, Fluorine



### 3.1. Le Scandium

Le scandium est assez courant en solution solide dans une centaine de minéraux, et c'est en sous-produit de l'exploitation d'autres minéraux que les quelques tonnes de la demande mondiale annuelle peuvent être produits.

Actuellement, il vient essentiellement de Chine, en sous-produit des autres terres rares.

Il existe toutefois des gisements de scandium. Il y est associé à l'Yttrium dans un minéral appelé Thortvéitite (silicate de scandium et d'yttrium,  $(Sc,Y)_2Si_2O_7$ ) que l'on trouve dans des pegmatites à Madagascar, ou en Norvège notamment.



Figure 7 : Exploitation de la Thortvéitite à Madagascar

Le pôle scandium de la thortvéitite, appelée befanamite, a été signalée par Alfred Lacroix dans une pegmatite à Befanamo à 80km au Nord Est de Tananarive. Au début des années 50 on en aurait extrait un peu plus de 40kg.

### 3.2. L'Yttrium

Bien que l'Yttrium soit présent dans de nombreux minéraux, on le produit principalement à partir de gisements de terres rares.

La majeure partie de la production provient de gisements chinois du Sud de la Chine : l'yttrium est adsorbé dans des argiles d'altération avec d'autres terres rares. L'Australie produit également de l'Yttrium à partir de gisements de terres rares.

### 3.3. Les lanthanides

#### 3.3.1- Géologie des gisements

Les lanthanides sont présents dans des minéraux particuliers et peu nombreux :

- Monazite  $(Ce,La,Nd,\dots,Th)(PO_4,SiO_4)$
- Bastnaesite :  $(La, Ce)CO_3F$  (voir photo en page de garde)
- Xénotime  $(Yb,Y,HREE)(PO_4)$  et d'autres minéraux moins fréquents dont certains viennent d'être identifiés : Huanghoite  $[BaCe(CO_3)2F]$ , Streenstrupine...

Figure 8: Monazite



**\* Les roches ignées alcalines**

Alors que les magmas classiques sont composés en majeure partie de silice et d'alumine, et donnent des granites plus ou moins clairs en fonction de l'abondance des minéraux ferro-magnésiens, les magmas alcalins sont riches en carbonates ou en phosphore.

Ces minéraux particuliers sont liés à des types de roches rares : les roches ignées alcalines\*. Il s'agit de roches issues du refroidissement de magmas à la composition chimique particulière.

On connaît moins de 600 affleurements de ces roches dans le monde, et encore sont-ils très différents les uns des autres.

Difficile d'en faire une classification et une synthèse !

Si, parmi ces roches on cherche à décrire et caractériser les gisements de terres rare, la tâche n'en est pas plus aisée.

Les pegmatites\*\* ultra-basiques ou alcalines ont également abrité de nombreux gisements.

L'altération des ces roches dites gîtes primaires peuvent donner des gîtes secondaires par altération, érosion et reconcentration des minéraux ou des éléments. C'est ainsi que sont constitués les gîtes de plage (concentration de monazite dans les plages et les dunes) ou les gîtes d'adsorption dans les argiles chinoises.

\*\* Les pegmatites sont des roches à très cristaux dont la composition peut-être celle des roches magmatiques qui les encaissent ou légèrement différentes : en effet elles sont les résultat des dernières cristallisations des magmas. On les observe souvent en dykes (ou filons).

Table 2: Classification of Rare Earth Elements-Bearing Mineral Deposits		
Association	Type	Example
Peralkaline igneous rocks	Magmatic (alkali-ultrabasic)	Lovozero, Russia
	Pegmatite dikes (alkali-ultrabasic)	Khibina Massif, Russia
	Pegmatite dikes (peralkaline)	Motzfeldt, Greenland
	Hydrothermal veins and stockworks	Lemhi Pass, Idaho
	Volcanic	Brockman, Western Australia
	Metasomatic-albitite	Miask, Russia
Carbonatites	Magmatic	Mountain Pass, California
	Dikes and dialational veins	Kangakunde Hill, Malawi
	Hydrothermal veins and stockworks	Gallinas Mtns., New Mexico
	Skarn	Saima, China
	Carbonate rock replacement	Bayan Obo, China
	Metasomatic-fenite	Magnet Cove, Arkansas
Iron oxide copper-gold	Magnetite-apatite replacement	Eagle Mountain, California
	Hematite-magnetite breccia	Olympic Dam, South Australia
Pegmatites	Abyssal (heavy rare earth elements)	Aldan, Russia
	Abyssal (light rare earth elements)	Five Mile, Ontario
	Muscovite (rare earth elements)	Spruce Pine, North Carolina
	Rare earth elements-allanite-monazite	South Platte, Colorado
	Rare earth elements-euxenite	Topsham, Maine
	Rare earth elements-gadolinite	Ytterby, Sweden
	Miarolitic-rare earth elements-topaz-beryl	Mount Antero, Colorado
Miarolitic-rare earth elements-gadolinite-fergusonite	Wasau complex, Wisconsin	
Porphyry molybdenum	Climax-type	Climax, Colorado
Metamorphic	Migmatized gneiss	Music Valley, California
	Uranium-rare earth elements skarn	Mary Kathleen, Queensland
Stratiform phosphate residual	Platform phosphorite	Southeast Idaho
	Carbonatite-associated	Mount Weld, Western Australia
	Granite-associated laterite	South China
	Baddeleyite bauxite	Poços de Caldas, Brazil
	Karst bauxite	Montenegro
Paleoplacer	Uraniferous pyritic quartz pebble conglomerate	Elliot Lake, Ontario
	Auriferous pyritic quartz pebble conglomerate	Witwatersrand, South Africa
Placer	Shoreline Ti-heavy mineral placer	Cooljarloo, Western Australia
	Tin stream placer	Malaysia

Tableau 2: Classification des gisements de terres rares

Le tableau ci-dessus publié par le site geology.com donne une idée de la variété et de la complexité des gisements de terres rares.

La monazite est un minéral (très) accessoire de nombreuses roches ignées, alcalines, certes, mais pas au point de constituer ces singularités géologiques que nous avons évoquées. Elle possède en outre la particularité d'être résistante à l'altération et à l'abrasion. Aussi la retrouve-t-on dans la fraction dense de beaucoup de sables de plage. Elle a été un sous-produit de l'exploitation des dunes titanifères en Australie, et se trouve en quantité significative dans quelques plages de Guyane.

### 3.3.2- Exploitation

La plupart des types de gisements évoqués ci-dessus ne présentent pas les qualités nécessaires à leur mise en exploitation.

En effet, si l'extraction du minerai ne présente pas de caractéristiques particulières par rapport à n'importe quelle mine, il n'en va pas de même de l'extraction des éléments de leur gangue.

La séparation des minéraux contenant les terres rares se fait souvent selon des méthodes classiques mais l'extraction des éléments, purs ou sous forme d'oxyde est complexe en raison de la stabilité chimique des minéraux, et des propriétés chimiques voisines de ces éléments.

Si l'on considère que les terres rares n'avaient pas de marché important jusqu'à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle, on ne s'étonnera pas que les exploitations minières aient été peu nombreuses.

Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, la première source de terres rares a été l'exploitation des sables de plage ou de dunes côtières, sables dans lesquels la monazite fournissait assez de mélange d'oxydes pour la fabrication des pierres à briquet et autres manchons luminescents de lampes à gaz. L'Australie fournit actuellement une petite quantité de monazite en provenance, probablement de tels gisements, en sous-produits de minéraux titanifères

La production industrielle est résumée dans les courbes ci-dessous :

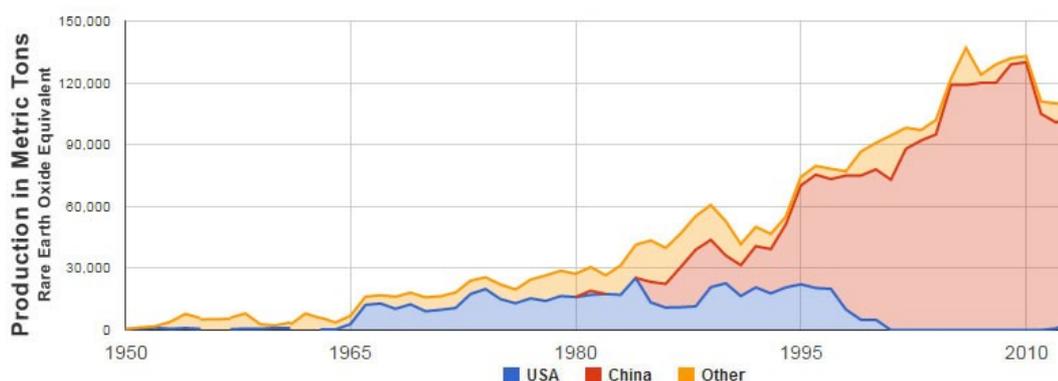


Figure 9: Production de terres rares en tonnes (en équivalent oxyde)

A partir de 1965, jusqu'en 1985/90, l'essentiel de la production a été assurée par la mine de Mountain Pass en Californie. La Chine a ensuite pris le relais.

Il faut être conscient que cette évolution des provenances n'est pas due uniquement à des raisons géologiques ou techniques. Pour qu'un gisement soit exploitable, il faut que les coûts d'extraction et de traitement soit inférieur au cours de produits extraits sur le marché. Or, le cours de

'commodités', en l'occurrence des métaux et substances minérales est très instable et dépend de la conjoncture économique.

Le schéma ci-après donne la variation relative des cours de quelques oxydes de terres rares depuis 2008.

On voit comment, la Chine, devenu producteur quasi exclusif, a pu, par simple décision (de bloquer les exportations) faire exploser les prix des terres rares. Face à cette montée en flèche, des décisions ont été prises de rechercher d'autres sources d'approvisionnement, pour des raisons économiques, et aussi pour des raisons politiques : l'Europe, les États-Unis, le Japon, entre autres, ont soudainement pris conscience de la dépendance de leurs industries *high-tech* de la Chine. La mine de Mountain Pass, en Californie ; fermée depuis 2002, s'est lancée dans une procédure de reprise d'activité, des projets voient le jour au Québec, et au Groenland...

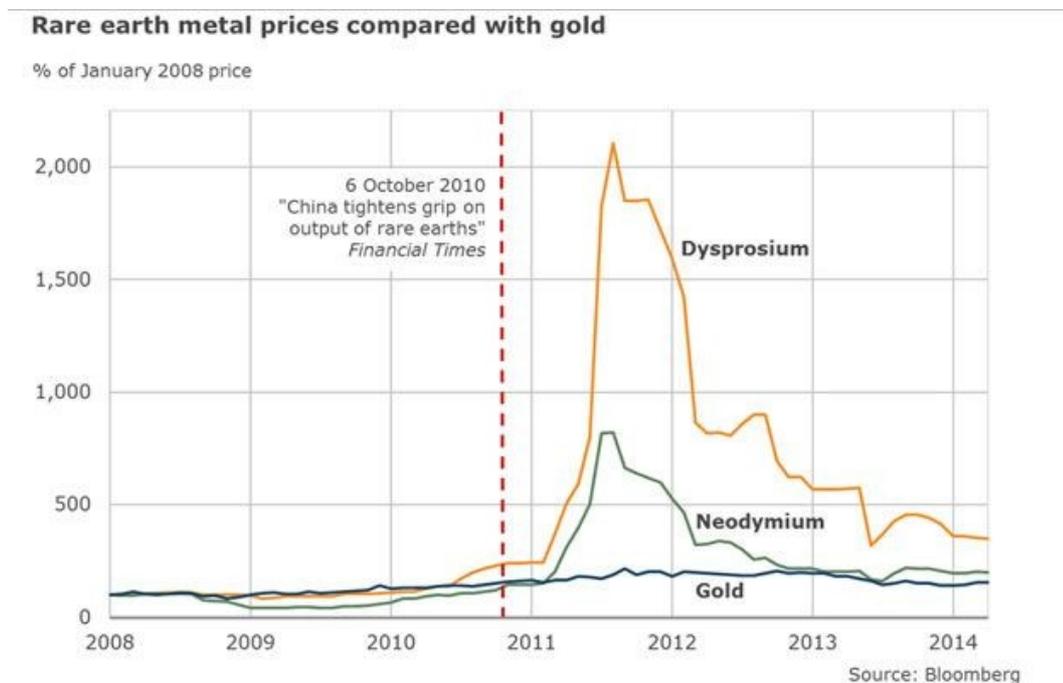


Figure 10: Evolution du cours de terres rares depuis 2008

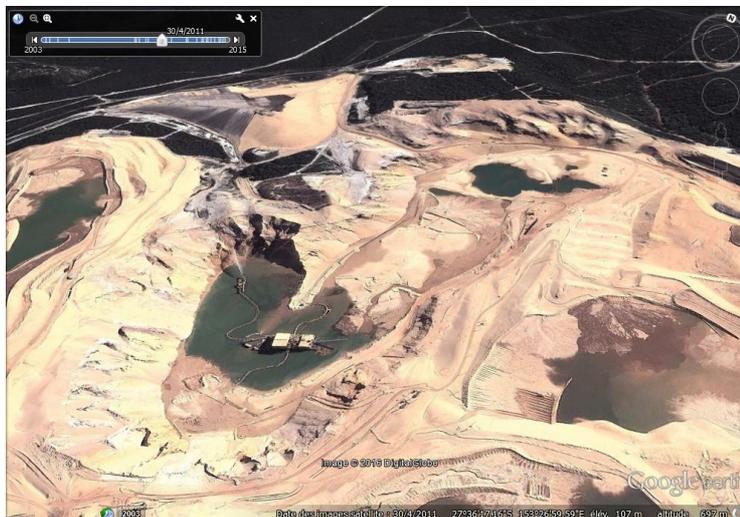


Figure 11: Stradbroke Island (Australie)

Nous examinerons donc les principales sources de terres Rares, et en particulier, le cas des exploitations chinoises.

### 3.3.3- Les sables de plage et les dunes

L'exploitation des sables de plage pour le rutile (oxyde de titane) a été très

active jusque dans les années 70, essentiellement dans les grandes îles sableuses des Nouvelles Galles du Sud, au large de Brisbane. Il existe encore une exploitation sur l'île de Stradbroke. Le principe est simple : une drague suceuse récupère les sables abattus par un puissant jet d'eau. Ceux-ci sont concentrés dans une unité de spirales flottant sur l'eau au fond de l'excavation. Les concentrés sont évacués. Les stériles (sable siliceux) reconstituent la dune. Le procédé tourne en circuit fermé, sans rejets ni apports extérieurs, si ce n'est le gazole. Toutefois, la phase de séparation des éléments est faite à l'extérieur, et peut poser des problèmes environnementaux.

#### 3.3.4- Mountain Pass

La société Molycorp a exploité la principale source de Terres rares de 1965 à 1995. Il s'agit d'intrusions de carbonatites dans des gneiss précambriens vieux de 1 400 millions d'années. Les terres rares sont portées par la bastnaesite, essentiellement.



Figure 12: Minerai de Mountain Pass

De 1995 à 2002, la production est devenue plus difficile en raison de la chute des cours causée par l'arrivée sur le marché des terres rares chinoises.

Parallèlement des problèmes environnementaux concernant le traitement des eaux résiduaires ont coûté de grosses amendes à la société : les minerais de terres rares contiennent des éléments radioactifs de façon systématique (Thorium, Uranium...), éléments que l'on retrouve dans les eaux résiduaires. De nombreuses fuites dans les conduites qui conduisaient ces eaux vers des zones d'évaporation ont été constatées.

Entre 2002 et 2010, le site s'est donc contenté de traiter des minerais extraits, à un faible rythme.

Face au monopole chinois, Molycorp a réouvert la mine et relancé l'exploitation, en 2012, les premières livraisons étaient effectuées.

Mais en raison du coût de l'exploitation (et du traitement des déchets), face à des cours retombés à des niveaux à peine supérieurs à 2009, la société s'est déclarée en faillite en 2015. L'exploitation est à nouveau fermée.

#### 3.3.5- Le cas de la Chine

La Chine a produit en 2014 environ 95000t équivalent oxydes de Terres rares par an, sur les 110 000 produites dans le monde [depuis, Mountain Pass a fermé]. Cette production provient de 4 zones distinctes.



Figure 13: Origine des Terres rares en Chine

**LA MINE DE WEISHAN LAKE, OU XISHAN**

La mine de Weishan lake exploite des carbonatites du créacé. De cette exploitation on ne sait que peu de choses, si ce n'est que la minéralisation principale est de la Bastnaesite. La localisation donnée par l'USGS est douteuse : les installations que l'on trouve aux coordonnées mentionnées ressemblent peu à une exploitation minière ; elles font plutôt penser à une fabrique de briques crues... ?? La production, selon le chiffre de la figure 13 serait de l'ordre de 8 000t/an.



Figure 14: Mine de Weishan ??

**LA MINE DE MAONIUPING**

Il y a encore moins de données sur ce site que sur la mine de Weishan... selon la carte de la figure 13, la production serait de l'ordre de 3 000t/an. Il s'agit de carbonatites tertiaires.

S'agissant, visiblement, de mine à ciel ouvert, la vue aérienne de Google Earth montre une exploitation complexe, mais assez bien organisée dans un site encaissé dans une vallée.



Figure 15: Extraction de la mine de Maoniuping

Plus bas dans la vallée on aperçoit, au-dessus de bassins et lagunes, ce qui pourrait être une usine de séparation des terres rares, ou un simple concentrateur de minerais.



Figure 16: Traitement de minerai à Maoniuping

Étrangement, on ne voit aucun exutoire, ni aucune installation de traitement des rejets...

#### **BAO-TOU, BAIYUN, MONGOLIE INTÉRIEURE**

Avec plus de 80 % de la production chinoise, Le gisement de Baiyun est le plus gros site de production de Terres Rares au monde.



*Figure 17: Vue perspective de la mine de Baiyun*

La géologie est assez bien connue grâce à un rapport de l'USGS<sup>8</sup> : il s'agit d'intrusion dans des séries carbonatées du protérozoïque moyen. La minéralisation est épigénétique, hydrothermale ; elle s'est faite en plusieurs épisodes datés de plus de 550 à 400 millions d'années, paléozoïque ancien. La minéralisation est complexe, mais la Monazite et la bastnaesite sont les minéraux les plus abondants.

Le minerai subit une première concentration sur place avant d'être acheminé par chemin de fer au complexe métallurgique de BaoTou, 150 km au Sud, où sont isolés les éléments des terres rares.

De nombreux articles de la presse quotidienne, française ou étrangères, se sont fait l'écho en 2012 des conditions environnementales désastreuses dans lesquelles cette exploitation est menée. Nous reviendrons sur ce point plus bas, car ces conditions d'exploitation concernent non seulement BaiYun mais aussi les exploitations d'argile au Sud de la Chine et les données industrielles sont, encore une fois, difficiles à obtenir...

---

8 The Sedimentary Carbonate-Hosted Giant BayanObo REE-Fe-Nb Ore Deposit of Inner Mongolia, China: A Cornerstone Example for Giant Polymetallic Ore Deposits of Hydrothermal Origin, Chao & Al, US Geological Survey Bulletin N° 2143, 1997, <http://pubs.usgs.gov/bul/b2143/front.htm>

Il est certain que le traitement sur place des minerais à BaiYun génère des rejets liquides qui sont stockés dans des bassins de décantation que l'on peut voir sur Google Earth. Les photos suivantes montrent plusieurs états de ses bassins au cours de dernières années.



Figure 18: BaiYun 2009

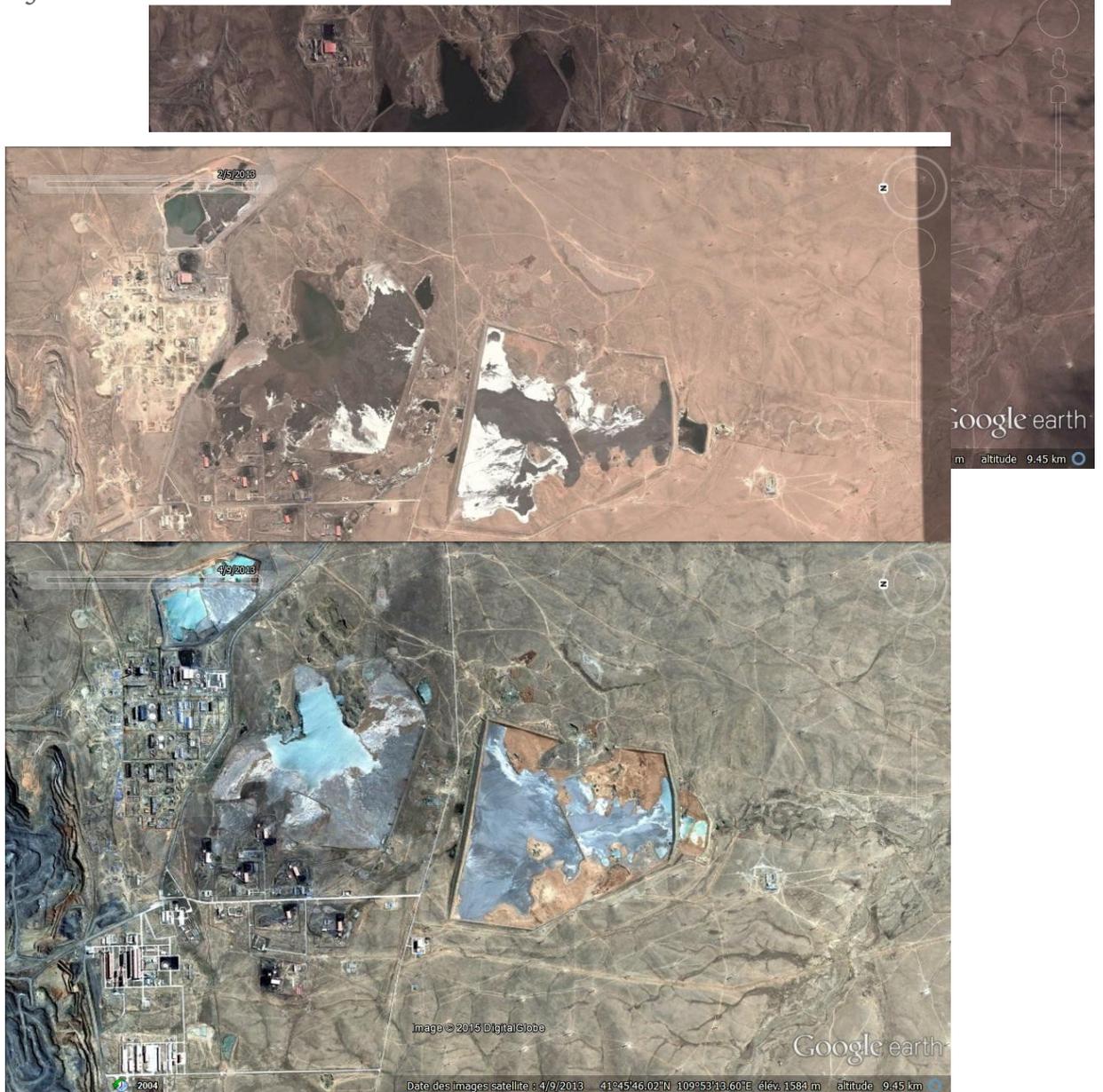


Figure 21: BaiYun 2014

On voit sur les vues successives l'agrandissement des digues, et l'accumulation de zones humides entre les deux digues de part et d'autre de la route Est Ouest (NB le Nord est à gauche sur les photos).



Figure 22: La Lagune et le complexe de Baotou

Les vues aériennes, et photos du complexe de Baotou montrent une usine vétuste, et des émissions de fumées qui semblent loin des pratiques en usage en Europe ou au en Amérique.

Les rejets liquides sont déversés dans un lagune de plus de 10 km<sup>2</sup>. On ne sait rien des conditions de travail et des mesures de protection de l'environnement dans ce complexe. Tout au plus peut-on dire que l'exutoire de ce bassin de de stockage des rejets liquide et boueux n'est pas visible, et une éventuelle installation de traitement des rejets ultimes encore moins. Ces rejets rejoindraient donc directement le Fleuve Jaune.

Sur la photo de cette lagune ci-contre, publiée par 20 minutes, le 1<sup>er</sup> mai 2011, la structure verticale au premier plan pourrait être une cheminée d'évacuation des eaux de surface : les

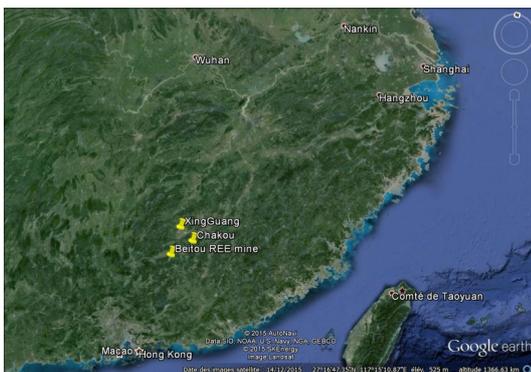


Figure 24: Situation : Chakou, Beitou, XigGuang

lagune de BaoTou ; cheminée d'évacuation

lumières sur le cylindre sont occultées au fur et à mesure de la montée des eaux.

#### LES GISEMENTS ARGILEUX DU SUD DE LA CHINE

Ces gisements sont importants, malgré le faible tonnage produit, car ils sont les plus riches en terres rares

dites lourdes, les moins abondantes et les plus recherchées, malgré la faible demande en tonnes.

La géologie de ces gisements est mal connue. Les terres rares y sont adsorbées sur des argiles d'altération des roches sous-jacentes.

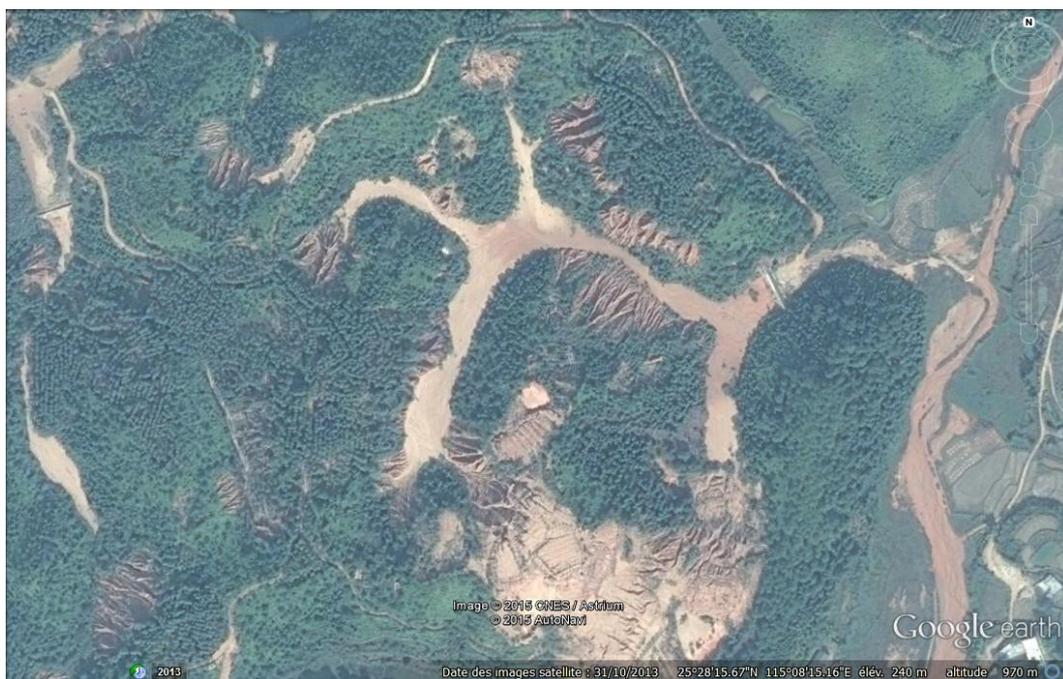
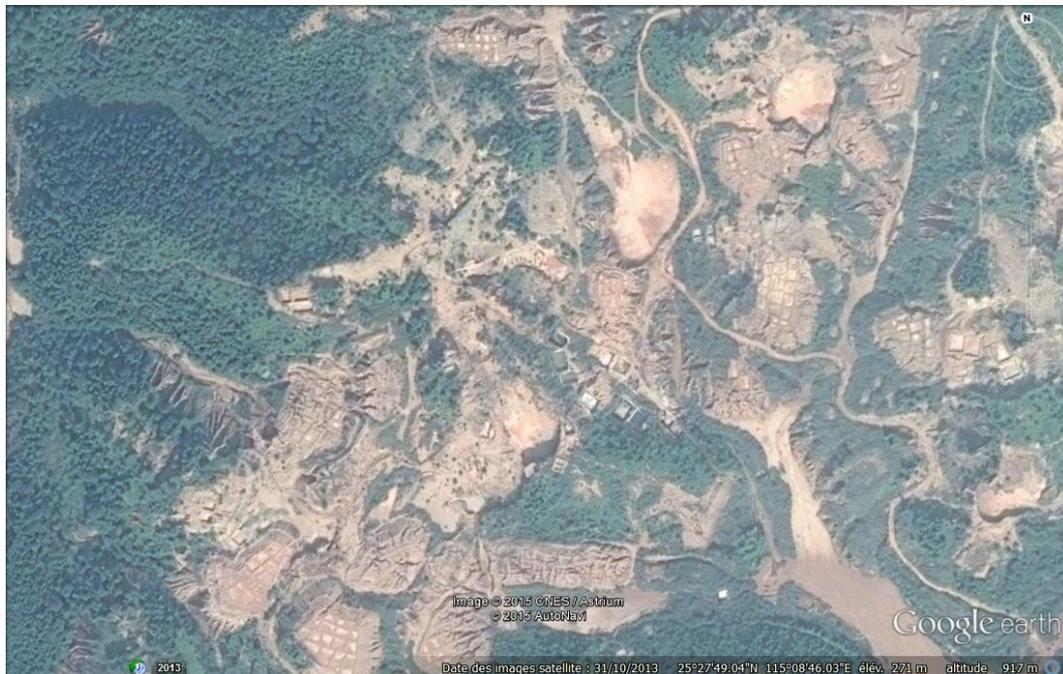


Figure 25: Deux vues de Chakou

Les gisements sont nombreux et de petite taille, mais nombreux, si l'on en juge par les images Google Earth. La figure 24 donne la position de trois de ces gisements. Les deux images montrent une forte coloration des cours d'eau en aval des exploitations. Les photos suivantes, issues d'un portfolio du site Business Insider, permettent d'appréhender les choses au niveau du sol.



Figure 26: Exploitation des argiles à terres rares

Les argiles sont abattues à l'eau puis décantées dans des rigoles et des bacs creusés à même le sol. On ne voit pas, à Chakou, ou dans les autres sites visibles sur Google Earth de bâtiment ou d'installation industrielle liée à ces sites.

Il semble s'agir d'exploitation artisanales, dont l'activité se borne à l'extraction du minéral. On n'a aucune indication sur la nature des méthodes de concentrations, ni sur l'utilité de ces bacs carrés. On ne sait pas ce que devient le produit de ces exploitations, ni où il est traité ...

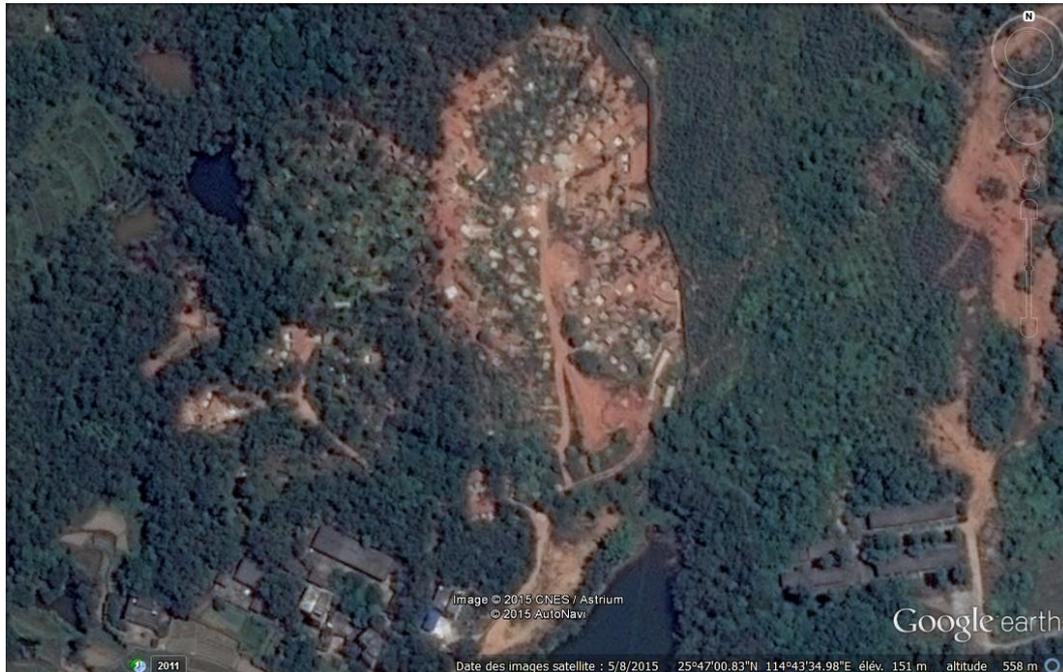


Figure 27: Le site de XingGuang

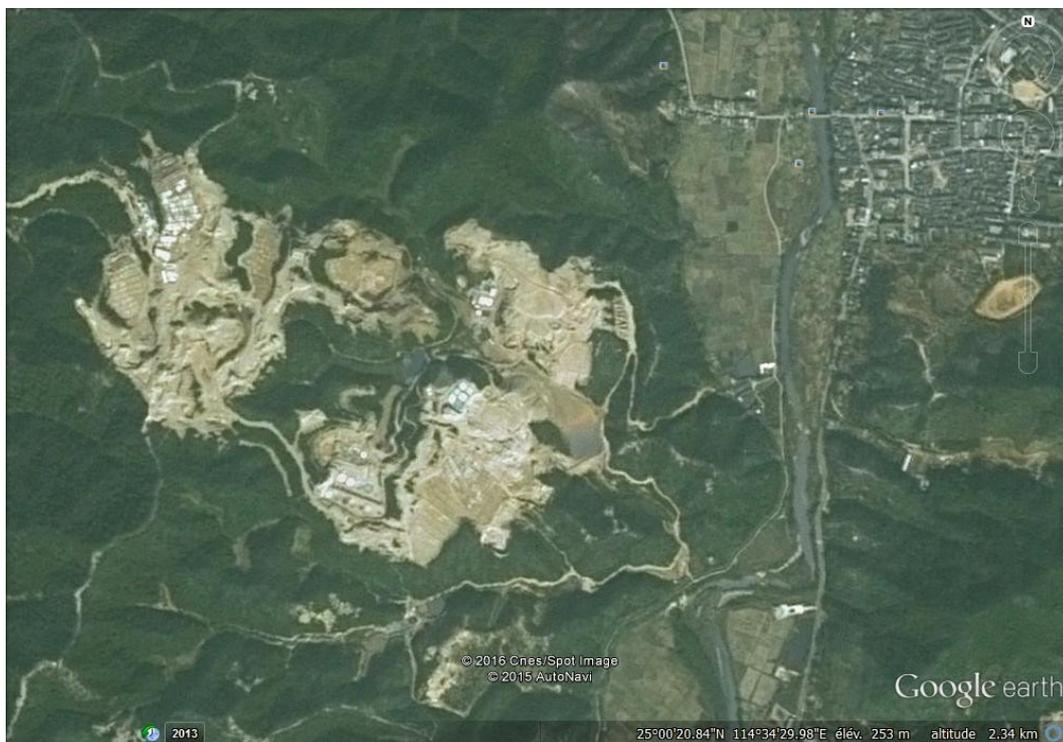


Figure 28: Le site de Beitou

#### **PROBLÈMES D'ENVIRONNEMENT**

On ne peut éviter de consacrer un paragraphe aux problèmes environnementaux soulevés par l'exploitation des terres rares. D'une part,

elle sont fréquemment associées à des éléments radioactifs, et le Thorium est l'un des constituants de la monazite, et d'autre part, la séparation des éléments nécessite des dissolutions sélectives dans des acides forts à température élevées, ce qui génère des rejets boueux chargés d'éléments indésirables.

On a vu, dans le cas de Mountain Pass, que ces contraintes peuvent compromettre la rentabilité d'une exploitation.

Or, en 2011, suite à la décision de la Chine de ne plus exporter les terres rares sous forme de matières premières, les prix se sont envolés sur le marché, ce qui a permis de se rendre compte de la dépendance de l'industrie mondiale vis à vis de la Chine.

Parallèlement des articles ont été publiés dans la presse grand public sur les conditions (désastreuses) de l'exploitation des terres rares en Chine. Il semble bien qu'une dépêche AFP ait été reprise par 20 minutes, The Guardian et Le Monde, entre autres. Le Monde a également enquêté sur place. Tous font référence à un « rapport de Greenpeace, écrit par Jamie Choi ». Malheureusement, ce rapport n'est plus accessible au public et Greenpeace assure qu'il s'agissait d'un simple article « qui n'a pas été archivé » ...

...

A la suite de ces articles, la Chine a annoncé que ces pollutions ont été le fait de mines illégales, et que bon ordre y serait mis. Parallèlement, sans que l'on sache très bien ce qui a motivé cette décision, l'interdiction des exportations a été progressivement assouplie, de telle sorte que la tension sur les prix est retombée.

L'envolée des prix avait eu pour première conséquence la recherche de sources d'approvisionnement alternatives, parmi lesquelles on peut citer, la réouverture de Mountain Pass, et la création d'usines de recyclage en France par Solvay. Ces deux tentatives ont connu le même sort avec le relâchement de la tension sur les prix : Mountain Pass a fait faillite et a fermé en juin 2015, et Solvay a annoncé en janvier 2016 la fermeture de ses deux sites de recyclage des terres rares.

...

