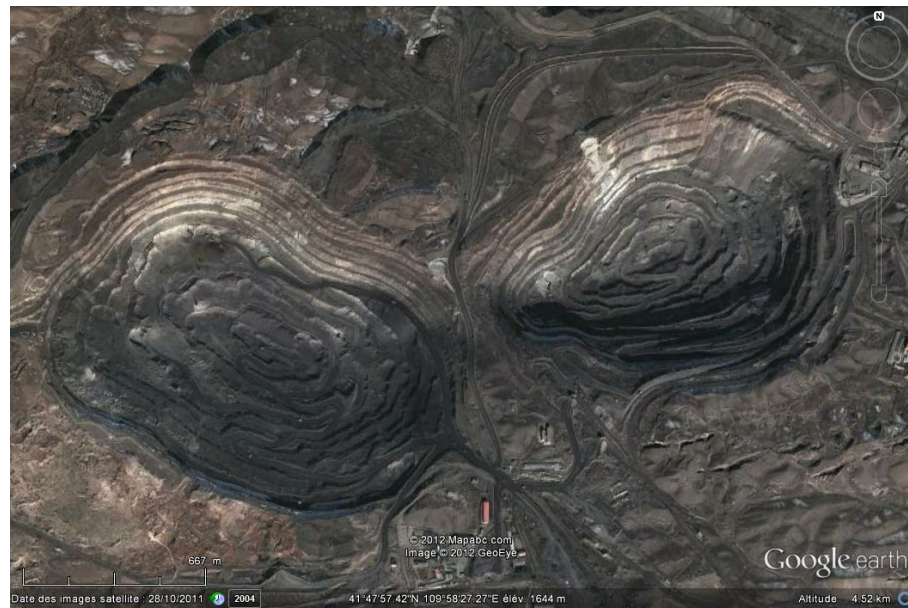


Etude du gisement de **Bayan Obo (REE)** **Chine**



Par
François BERTRAND
3^{ème} Bac Ingénieur Civil, option "Génie Géologique"

Année Académique 2011 – 2012

Table des matières

1	Les terres rares	5
2	Localisation du gisement	7
3	Historique du gisement	7
4	Géologie	8
5	Gîtologie	14
6	Techniques d'exploitation et de traitement du minerai	18
7	Considérations environnementales	19
8	Production, ressources et réserves	20

Table des figures

1	Eléments faisant partie des terres rares, division entre terres rares lourdes et légères (d'après SCHÜLER <i>et al</i> 2011).	5
2	Abondances relatives des éléments chimiques dans la croûte terrestre continentale (d'après HAXEL <i>et al</i> 2002).	6
3	Carte de localisation de Bayan Obo (d'après YANG K.F. <i>et al</i> 2011, modifié).	7
4	Carte géologique de la région de Bayan Obo (d'après CHAO <i>et al</i> 1999, modifié d'après Institute of Geochemistry, 1988).	8
5	Carte géologique de la zone de Bayan Obo (d'après CHAO <i>et al</i> 1999, modifié d'après CHAO <i>et al</i> , 1992).	9
6	Carte et coupe géologiques du gisement (d'après YUAN <i>et al</i> 1992).	10
7	Carte géologique du gisement de Bayan Obo (d'après YANG K.F. <i>et al</i> 2011).	11
8	Carte structurale des gisements <i>Main</i> et <i>East</i> (d'après YANG K.F. <i>et al</i> 2011, modifié d'après INSTITUTE OF GEOLOGY AND GUIYANG GEOCHEMISTRY CHINESE ACADEMY OF SCIENCES 1974).	12
9	Carte géologique du gisement de Bayan Obo (d'après YANG X.Y. <i>et al</i> 2008, modifié d'après LIU <i>et al</i> 2008).	14
10	Classement des gisements mondiaux de terres rares (d'après KANAZAWA & KAMITANI 2005).	15
11	Genèse hydrothermale du gisement de Bayan Obo (d'après YANG X.Y. <i>et al</i> 2008).	16
12	Diagramme de classification CaO-MgO-(FeO+Fe ₂ O ₃ +MnO) de Woolley et Kempe pour les dykes de carbonatites, les marbres dolomitiques et des carbonates sédimentaires de la région de Bayan Obo (d'après YANG K.F. <i>et al</i> 2011).	17
13	Etapas principales dans le processus de traitement du minerai (d'après SCHÜLER <i>et al</i> 2011).	18
14	Risques environnementaux dans le processus d'extraction des terres rares (d'après SCHÜLER <i>et al</i> 2011).	19
15	Production mondiale de terres rares (d'après TSE 2011, mise à jour de HAXEL <i>et al</i> 2002).	20

Introduction

Ce travail de recherche documentaire est consacré au gisement chinois de Bayan Obo (aussi parfois nommé Baiyunebo), le plus gros gisement de terres rares au monde (YANG & LE BAS 2003, [24]).

Avant d'entamer les discussions sur Bayan Obo, il est sans doute utile d'expliquer ou de rappeler dans un premier chapitre ce que sont les terres rares, ainsi que de mentionner leurs applications.

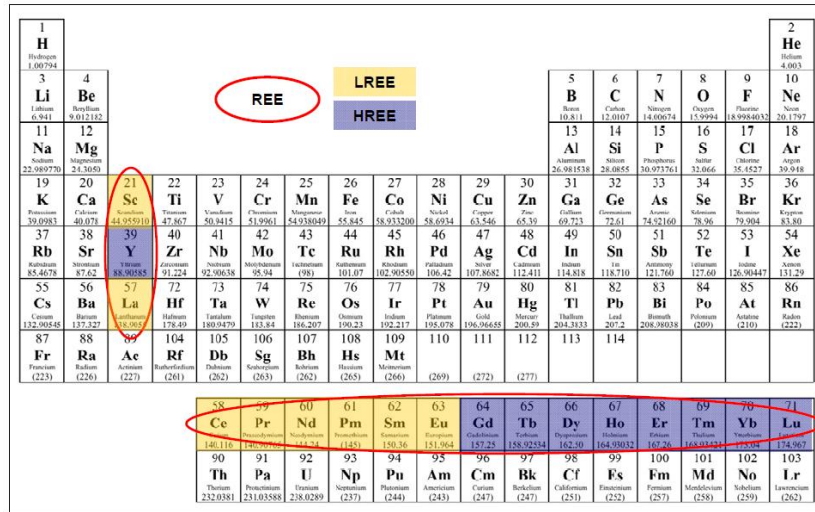
Les chapitres suivants sont consacrés au gisement de Bayan Obo. Dans un premier temps, il s'agit de localiser Bayan Obo. Nous verrons rapidement quelle fut l'histoire de la mine de Bayan Obo. Et puis, la géologie de la région et celle du gisement sont décrites. Après, une large discussion est réservée à la géologie du gisement. Les techniques d'exploitation et de traitement du minerai sont par la suite abordées. Enfin, les chiffres concernant la production et les réserves sont repris et commentés dans un contexte politico-économique global.

En effet, les terres rares, essentielles pour de nombreux produits high-tech, sont devenues des ressources stratégiques. Les Chinois, qui détiennent le quasi monopole de la production, le savent. En 1986, alors que le gouvernement chinois lance son "Programme 863"¹ visant un développement des technologies chinoises et devant permettre une indépendance vis-à-vis des technologies étrangères, Deng Xiaoping, l'ancien dirigeant chinois, déclare : "Les terres rares sont à la Chine, ce qu'est le pétrole au Moyen-Orient" (HURST 2010, [10]).

1. Devant son nom au mois de mars 86.

1 Les terres rares

Les "terres rares" (*Rare Earth Elements* - REE - en anglais) désignent un ensemble de 17 éléments chimiques. Il s'agit du scandium (nombre atomique 21), de l'yttrium (39) et des 15 lanthanides (57 à 71) : le lanthane, le cérium, le praséodyme, le néodyme, le prométhium, le samarium, l'euporium, le gadolinium, le terbium, le dysprosium, l'holmium, l'erbium, le thulium, l'ytterbium et le lutécium. Cependant, selon les auteurs, le scandium n'est pas toujours considéré comme une terre rare.



1 H Hydrogène 1,00784	2 He Hélium 4,003																																														
3 Li Lithium 6,941	4 Be Béryllium 9,012182																																														
5 B Bore 10,811	6 C Carbone 12,0107	7 N Azote 14,00674	8 O Oxygène 15,9994	9 F Fluorine 18,9984032	10 Ne Neon 20,1797																																										
11 Na Sodium 22,989770	12 Mg Magnésium 24,305																																														
13 Al Aluminium 26,981538	14 Si Silicium 28,0855	15 P Phosphore 30,973761	16 S Soufre 32,066	17 Cl Chlore 35,4527	18 Ar Argon 39,948																																										
19 K Potassium 39,0983	20 Ca Calcium 40,078	21 Sc Scandium 44,955910	22 Ti Titane 47,867	23 V Vanadium 50,9415	24 Cr Chrome 51,9961	25 Mn Manganèse 54,938049	26 Fe Fer 55,845	27 Co Cobalt 58,933200	28 Ni Nickel 58,6934	29 Cu Cuivre 63,546	30 Zn Zinc 65,39	31 Ga Gallium 69,723	32 Ge Germanium 72,61	33 As Arsenic 74,92160	34 Se Sélénium 78,96	35 Br Brome 79,904	36 Kr Krypton 83,80																														
37 Rb Rubidium 85,4678	38 Sr Strontium 87,62	39 Y Yttrium 88,90585	40 Zr Zirconium 91,224	41 Nb Niobium 92,90638	42 Mo Molibdène 95,94	43 Tc Technetium (99)	44 Ru Ruthénium 101,07	45 Rh Rhodium 102,90550	46 Pd Paladium 106,42	47 Ag Argent 107,8682	48 Cd Cadmium 112,411	49 In Indium 114,818	50 Sn Étain 118,710	51 Sb Antimoine 121,760	52 Te Tellure 127,60	53 I Iode 126,90447	54 Xe Xénon 131,29																														
55 Cs Césium 132,90545	56 Ba Baryum 137,327	57 La Lanthane 138,90547	58 Ce Cérium 140,12	59 Pr Praséodyme 140,90766	60 Nd Néodyme 144,24	61 Pm Prométhium (145)	62 Sm Samarium 150,36	63 Eu Europium 151,964	64 Gd Gadolinium 157,25	65 Tb Terbium 158,92534	66 Dy Dysprosium 162,50	67 Ho Holmium 164,93032	68 Er Erbium 167,26	69 Tm Thulium 168,93402	70 Yb Ytterbium 173,054	71 Lu Lutécium 174,967																															
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (263)	107 Bh Bohrium (262)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (266)	110 Ds Darmstadtium (269)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Cn Copernicium (277)	113 Nh Nihonium (284)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (290)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessine (294)	118 Og Oganesson (294)																														
																		58 Ce Cérium 140,116	59 Pr Praséodyme 140,90766	60 Nd Néodyme 144,24	61 Pm Prométhium (145)	62 Sm Samarium 150,36	63 Eu Europium 151,964	64 Gd Gadolinium 157,25	65 Tb Terbium 158,92534	66 Dy Dysprosium 162,50	67 Ho Holmium 164,93032	68 Er Erbium 167,26	69 Tm Thulium 168,93402	70 Yb Ytterbium 173,054	71 Lu Lutécium 174,967																
																		90 Th Thorium 232,0381	91 Pa Protactinium 231,03688	92 U Uranium 238,02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkélium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)																

FIGURE 1 – Éléments faisant partie des terres rares, division entre terres rares lourdes et légères (d'après SCHÜLER *et al* 2011).

Ces 17 éléments² sont généralement classés en deux familles : les terres rares légères (LREE) et les terres rares lourdes (HREE) (CORDIER (USGS) 2011, [7]). Il y a une légère différence de rayon atomique entre les deux groupes (KANAZAWA & KAMITANI 2005, [13]). La figure (1) montre la répartition des éléments de terres rares entre ces deux sous-classes.

Ces éléments ont des propriétés physico-chimiques comparables ; ils possèdent des rayons ioniques très proches qui leur permettent de se substituer les uns aux autres dans les minéraux qui les contiennent. Les terres rares sont présentes dans plus de 200 espèces minéralogiques. Néanmoins, seuls quelques minéraux présentent un intérêt économique. De ce point de vue, les plus importants sont la bastnaésite, la monazite et le xénotime.

La bastnaésite, de formule chimique $(Ce, La)(CO_3)F$, est le principal minerai de terres rares légères. La monazite, $(Ce, La, Nd, Th)PO_4$, peut renfermer des quantités importantes de thorium et d'uranium qui engendrent une radioactivité préjudiciable (LAGNY 2011, [14]).

En ce qui concerne la géochimie, les terres rares font partie des éléments incompatibles, cela veut dire qu'elles sont "concentrées dans les liquides silicatés évolués résiduels après cristallisation

2. Une description des ces 17 éléments est fournie en annexe (HURST 2010, [10]).

2 Localisation du gisement

Le gisement de Bayan Obo se situe dans le nord de la Chine, en Mongolie intérieure, aux coordonnées $109^{\circ}59'E$ et $41^{\circ}48'N$. La Mongolie intérieure, région autonome de la République populaire de Chine, est une région quasi désertique. En effet, le gisement de Bayan Obo se trouve dans le désert de Ghobi (YANG X.Y. *et al* 2008, [25]). Ce gisement de terres rares, niobium et fer se trouve à 1600–1700 *m* au dessus du niveau des mers (CAMPBELL & HENDERSON 1997, [3]).

Bayan Obo est situé sur la marge septentrionale du *North China Craton* (craton sino-coréen), bordant au nord la ceinture orogénique d'Asie centrale (YANG K.F. *et al* 2011, [23]).

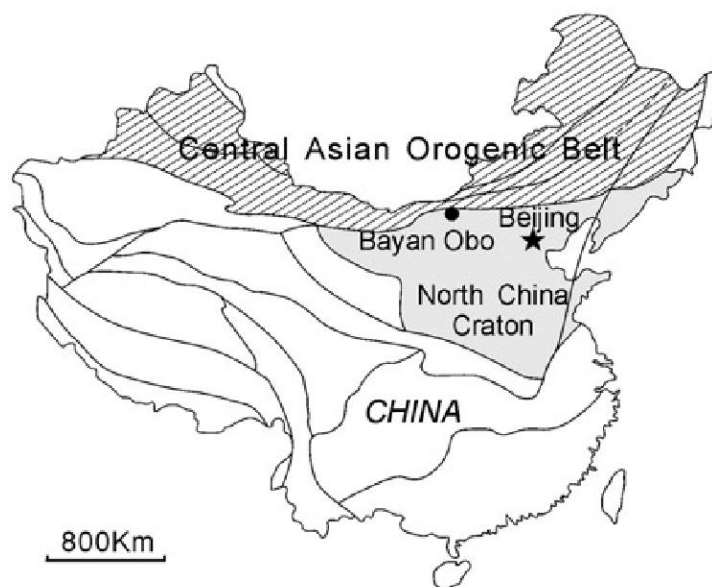


FIGURE 3 – Carte de localisation de Bayan Obo (d'après YANG K.F. *et al* 2011, modifié).

Bayan Obo est situé à environ 600 *km* à l'ouest - nord-ouest de Pékin et à 130 *km* de chemin de fer de Baotou, une ville en bordure du fleuve jaune (Houang-Ho) où les usines qui traitent les minerais et purifient les terres rares ont été construites (LAGNY 2011, [15]). Le tracé de la ligne de chemin de fer est visible sur la carte de la figure (4).

3 Historique du gisement

En 1927, Ding Daoheng, un géologue chinois découvre un gisement de fer à Bayan Obo. A l'époque, les terres rares n'avaient pas encore été identifiées. En 1954, la compagnie minière *Baotou Iron and Steel Company* s'installe pour y exploiter le fer. La production de terres rares démarre en 1957 comme co-produit du fer ; le gisement devient polymétallique. A partir des années 60, les dirigeants chinois veulent maximiser l'exploitation des terres rares à Bayan Obo. En 1963, l'institut de recherche de Baotou sur les terres rares est fondé (HURST 2010, [10] ; Site web de la compagnie minière, [2] ; TSE 2011, [21]).

4 Géologie

D'un point de vue tectonique, le gisement de Bayan Obo se situe sur la plateforme de Mongolie Intérieure, à la limite avec la ceinture orogénique hercynienne plus au nord. Bayan Obo se trouve à 10 km au sud de la profonde faille qui sépare ces deux unités tectoniques (YUAN *et al* 1992, [26]). Cette faille est représentée par un trait noir dans la partie supérieure de la figure (4). La région de Bayan Obo a connu plusieurs périodes de métamorphisme du Protérozoïque au Paléozoïque (CHAO *et al* 1999, [5]).

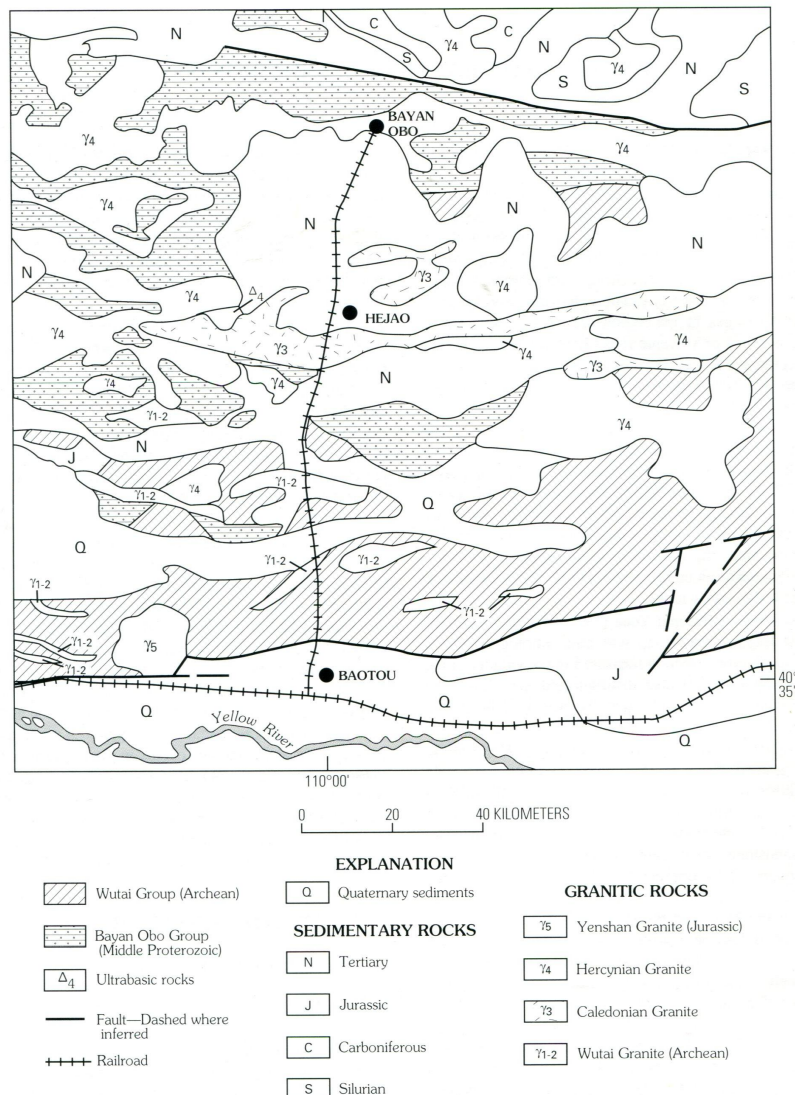


FIGURE 4 – Carte géologique de la région de Bayan Obo (d'après CHAO *et al* 1999, modifié d'après Institute of Geochemistry, 1988).

Le gisement de Bayan Obo est encaissé dans les marbres du Groupe de Bayan Obo du Pro-

dans la section géologique.

A 10 km au nord du gisement, la faille de Kuanggou sépare géologiquement la zone en deux parties.

Au nord de la faille, la lithologie est représentée par le symbole H€u sur la carte de la figure (5). Ce symbole désigne des roches sédimentaires, ce sont les unités H1 à H8 non-divisées du Groupe de Bayan Obo. La séquence est faiblement déformée, elle est non métamorphisée. Elle ne contient aucune minéralisation (YANG & LE BAS 2003, [24]).

Au sud de la faille de Kuanggou, les roches sont plissées en forme d'anticlinal. Le gisement de Bayan Obo est encaissé dans cet anticlinal composé principalement de trois groupes de roches, à savoir, par ordre ascendant : des grès feldspathiques à grains fins à moyens et des quartzites ; des marbres dolomitique ; des schistes et des roches à feldspath et biotite (YUAN *et al* 1992, [26]). Le troisième groupe, l'unité H9, occupe la partie centrale de l'anticlinal. La figure (6) montre une coupe de cet anticlinal à travers le gisement.

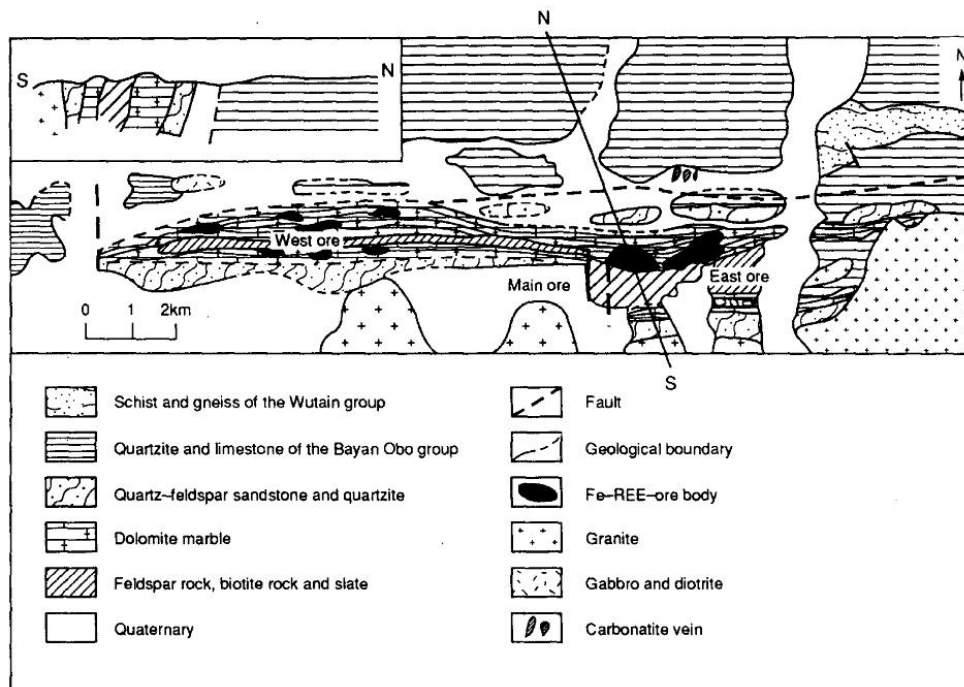


FIGURE 6 – Carte et coupe géologiques du gisement (d'après YUAN *et al* 1992).

Le flanc nord de l'anticlinal présente un pendage 50°-70° S. Le flanc sud est plus raide, on observe un pendage de 70°-80° N et il est même vertical à certains endroits (CHAO *et al* 1999, [5]).

La roche hôte du gisement, l'unité H8, s'étend sur 18 km de l'est à l'ouest et fait jusqu'à 2 km de large (KANAZAWA & KAMITANI 2005, [13]). Quant à son épaisseur, elle fait environ 400 m. Les teneurs en terres rares des marbres H8 vont de 1% à quelques pourcents (YANG X.Y. *et al*

2008, [25]). C'est pourquoi, ils sont parfois considérés comme étant eux-mêmes le gisement de terres rares par certains auteurs comme YANG X.Y. *et al* et YANG K.F. *et al*.

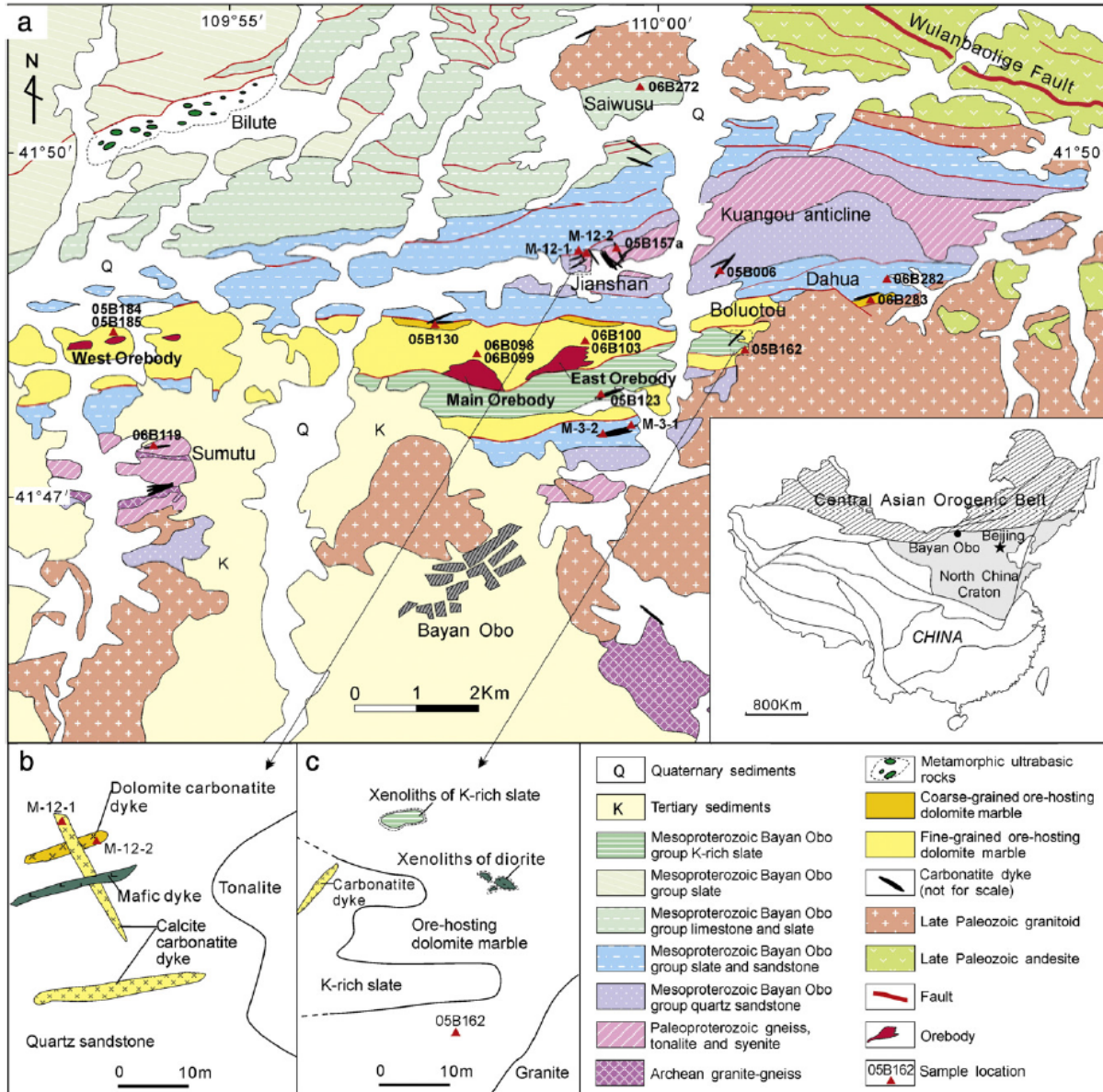


FIGURE 7 – Carte géologique du gisement de Bayan Obo (d'après YANG K.F. *et al* 2011).

Les marbres dolomitiques à Bayan Obo présentent un faciès à grains fins (125 – 250 μm) ou grossiers (> 500 μm). C'est le marbre à grains fins qui constitue principalement le gisement de terres rares. Le marbre à grains grossiers (en jaune foncé sur la figure 7) n'est présent qu'à l'extérieur de celui à grains fins (en jaune clair). Il se pourrait que la texture à grains fins ait été formée par recristallisation du marbre à grains grossiers (YANG K.F. *et al* 2011, [23]). Ces différences de texture ont conduit à subdiviser l'unité H8 : H8c pour le marbre à grains gros-

siers ("coarse-grained dolomite marble") et H8f pour celui à grains fins ("fine-grained dolomite marble") (YANG & LE BAS 2003, [24]).

De nombreux dykes de carbonatites sont présents autour du gisement de Bayan Obo. Il y en a plus de 30 à moins de 3,5 km du gisement principal. Ils ont généralement entre 0,5 et 2 m de large et font 10 à 100 m de long. Sur base de leur composition minéralogique, ces dykes sont classés en trois catégories : type dolomite, type calcite-dolomite et type calcite. Ces trois types de dykes pourraient correspondre à différents stades de l'évolution du magmatisme dans la région. Un affleurement au nord du gisement permet d'observer ce genre de dykes. La figure (7.b) montre schématiquement cet affleurement. On peut voir qu'un dyke de type dolomite est traversé par un dyke de type calcite, cette dernière intrusion est donc la plus récente (YANG K.F. *et al* 2011, [23]).

Les carbonatites sont connues pour leur haute concentration en terres rares. Les dykes de type calcite montrent la plus grande concentration en terres rares, jusqu'à 10%. Les données géochimiques révèlent que les concentrations en terres rares augmentent graduellement avec l'augmentation de calcite dans les dykes. La forte concentration en terres rares dans les dykes laisse supposer qu'un magma a joué un rôle important dans la minéralisation des terres rares (YANG K.F. *et al* 2011, [23]). C'est pourquoi, le contexte tectonique de la région, un système de rift développé sur la marge septentrionale du craton sino-coréen pendant le Protérozoïque Moyen, a été favorable à la mise en place du gisement de Bayan Obo. En zone d'extension, la remontée de magma mantellique est facilitée par l'amincissement de la croûte terrestre (KANAZAWA & KAMITANI 2005, [13]).

Cependant, il est intéressant de noter qu'aucun dyke de carbonatites n'a été identifié dans les marbres H8 sur les figures (7) et (9) (YANG X.Y. *et al* 2008, [25]).

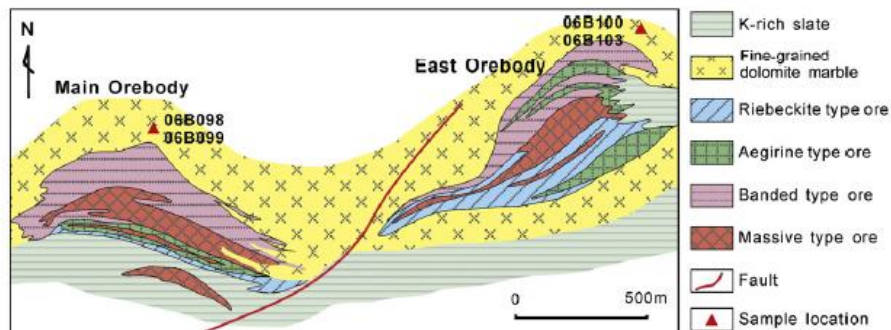


FIGURE 8 – Carte structurale des gisements *Main* et *East* (d'après YANG K.F. *et al* 2011, modifié d'après INSTITUTE OF GEOLOGY AND GUIYANG GEOCHEMISTRY CHINESE ACADEMY OF SCIENCES 1974).

Précédemment, il était question du gisement de Bayan Obo au singulier ; mais en réalité, comme le dévoile la plupart des cartes présentées, le gisement de terres rares de Bayan Obo rassemble trois gisements : le gisement principal (*Main*), un gisement à l'est (*East*) et un gisement à l'ouest (*West*). Ce sont les gisements *Main* et *East* qui sont activement exploités pour le moment. Les teneurs moyennes en oxydes de terres rares de ces deux gisements sont respectivement

de 6% et 5%. La teneur en RE_2O_3 du gisement *West* est légèrement moindre (KANAZAWA & KAMITANI 2005, [13]).

Les deux grandes fosses visibles sur l'image satellite de la page de couverture témoignent de l'exploitation des gisements *Main* et *East*. Cette image provient de GOOGLE EARTH, elle a été prise le 28 octobre 2011. A cette date, la longueur maximale de la fosse principale faisait 1,47 km. Au 7 novembre 2004, une image satellite plus ancienne révèle que la longueur maximale était de 1,37 km.

Comme le montre la figure (8), les gisements *Main* et *East* sont de larges lentilles insérées dans des marbres dolomitiques. La direction de ces lentilles est en relation avec celle de la roche hôte, elles sont parallèles. Quant au gisement *West*, il s'agit en réalité de 16 petits gisements situés dans une zone à 8 km à l'ouest du gisement principal (YANG K.F. *et al* 2011, [23] ; CHAO *et al* 1999, [5]).

Contrairement à ce que semble indiquer la représentation schématique des gisements sur la figure (8), les frontières entre le minerai et sa roche hôte ne sont pas si évidentes. Les limites des gisements sont fixées par des teneurs minimales en terres rares (YUAN *et al* 1991, [26]). Ces teneurs limites sont susceptibles de varier en fonction de la valeur économique des terres rares. En effet, plus leur valeur augmente et plus il devient rentable d'exploiter des roches avec une moindre teneur.

D'un point de vue géologique, comme déjà signalé, l'entièreté de la couche de marbre H8 pourrait être considérée comme gisement de terres rares. En réalité, les lentilles représentées font référence aux gisements polymétalliques Fe-REE. C'est pour cette raison qu'il est possible de superposer les lentilles de la figure (8) sur les gisements de fer ("iron bodies") de la figure (9).

Trois types de minerais sont présents à Bayan Obo : disséminé, rubané et massif. On observe une vaste zone avec ces types de minerais dans les gisements *Main* et *East*. Les minerais disséminés se trouvent le plus à l'extérieur tandis que les minerais massifs sont dans le noyau du gisement, les minerais rubanés dans une zone intermédiaire (CHAO *et al* 1999, [5]).

Au total, on recense 120 minéraux différents. Les principaux minéraux de terres rares du gisement sont la bastnaesite, la monazite et des différents minéraux REE-Nb comme l'aeschynite, la fergusonite et la columbite. L'hématite et la magnétite sont minéraux dominants pour le minerai de fer (CHAO *et al* 1999, [5] ; KANAZAWA & KAMITANI 2005, [13]).

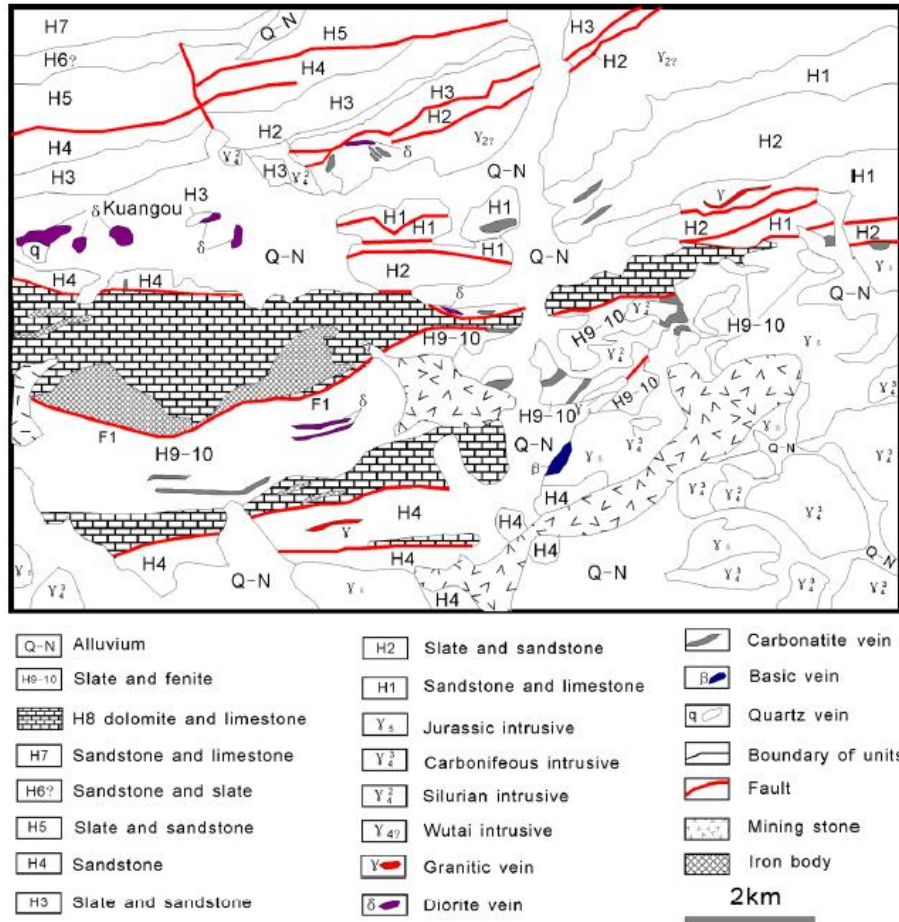


FIGURE 9 – Carte géologique du gisement de Bayan Obo (d’après YANG X.Y. *et al* 2008, modifié d’après LIU *et al* 2008).

5 Gîtologie

Les gisements de terres rares de source primaire sont classés en deux catégories, les gisements magmatiques et sédimentaires. Parmi les gisements magmatiques, on trouve les gîtes associés à des carbonatites ou à des intrusions alcalines et les gîtes hydrothermaux. Les placers et les conglomérats sont classés parmi les gisements sédimentaires (KANAZAWA & KAMITANI 2005, [13]).

La figure (10) montre la distribution des gisements mondiaux selon ce classement. Les auteurs de cette figure, KANAZAWA & KAMITANI, classent le gisement de Bayan Obo dans la catégorie des gisements hydrothermaux. Selon eux, le gisement a été formé par une métasomatose⁴ hydrothermale des roches carbonatées d’origine sédimentaire, mais les fluides seraient liés à une intrusion alcaline-carbonatée. Cependant, cette théorie ne fait pas l’unanimité parmi les géologues.

4. Ensemble des phénomènes aboutissant au remplacement, partiel ou total, d’une roche par une autre.

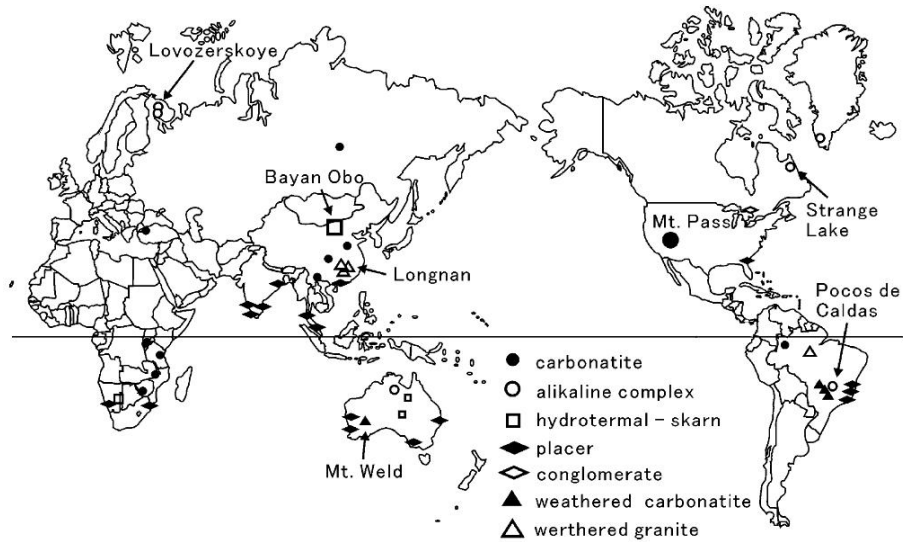


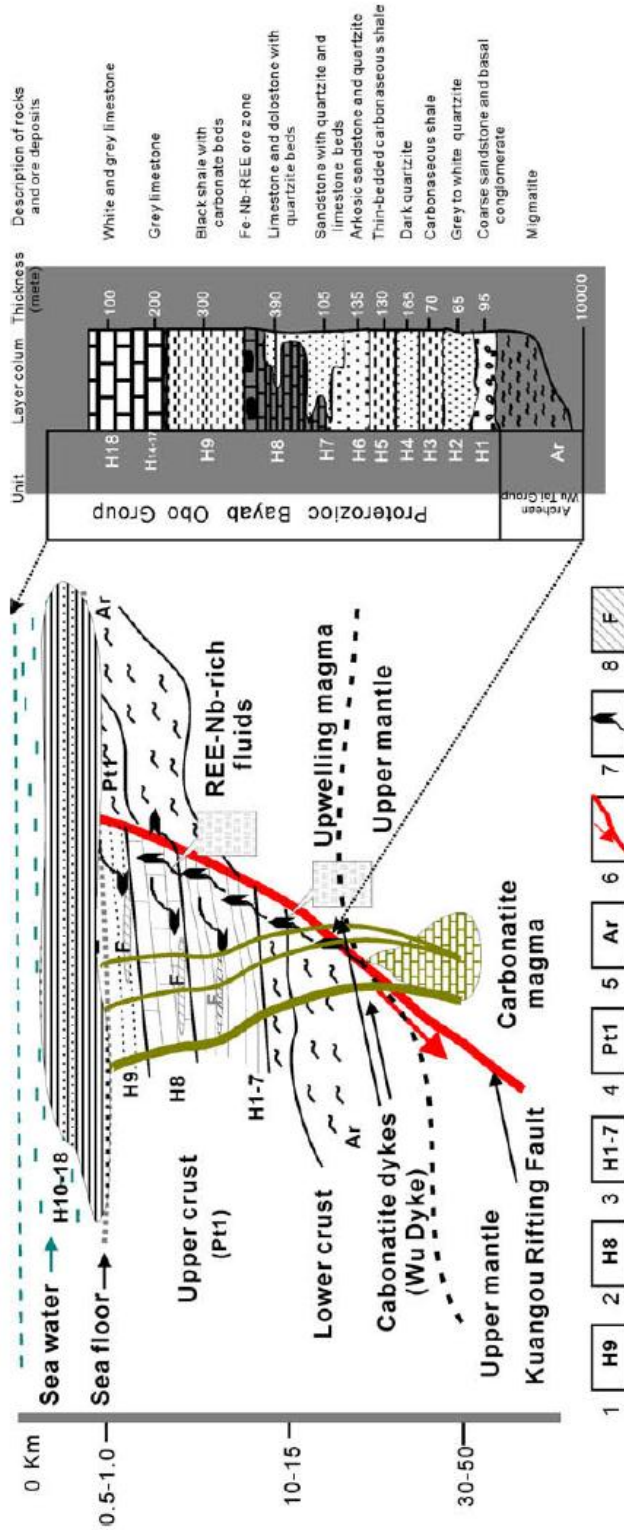
FIGURE 10 – Classement des gisements mondiaux de terres rares (d'après KANAZAWA & KAMITANI 2005).

En effet, depuis la découverte du gisement en 1927, plusieurs études du site ont été menées, mais le grand nombre de modèles proposés reflète la complexité de se prononcer sur l'origine de la formation du gisement de Bayan Obo (YANG *et al* 2008, [25]). S'il est admis que le gîte est lié à du magmatisme, la classification parmi les sous-groupes n'est pas tranchée, soit le gîte découle de la cristallisation d'un magma alcalin, soit le gîte est hydrothermal et il résulte de la réaction du même type de magma avec des eaux souterraines ou d'autres fluides.

En conséquence, les discussions portent principalement sur l'origine du marbre dolomitique abritant le minerai : origine sédimentaire *versus* magmatique.

Beaucoup de géologues, comme CHAO *et al* ([5]), considèrent que la roche hôte est d'origine sédimentaire. CHAO *et al* rejettent l'idée d'une minéralisation des terres rares syngénétique. Néanmoins, le gisement de fer aurait pu être formé syngénétiquement, avant la minéralisation REE-Nb. Les fluides hydrothermaux, associés à du magmatisme et du métamorphisme durant le Paléozoïque, auraient par la suite provoqué la minéralisation REE-Nb par dessus le gisement originel de fer. Le gisement polymétallique se serait formé en plusieurs phases (KANAZAWA & KAMITANI 2005, [13]). Au final, selon CHAO *et al*, l'origine du gisement de terres rares serait métasomatique, hydrothermal et épigénétique.

Selon YANG X.Y. *et al*, après la formation des roches sédimentaires H1-H9, le système de rift régional a canalisé des fluides enrichis en terres rares dérivant du manteau terrestre. Ces fluides hydrothermaux ont alors conduit à la métasomatose des roches sédimentaires. L'apparence stratiforme et l'étendue (18 km sur plus d'1 km) des marbres H8 sont avancées comme indices en faveur d'une origine sédimentaire. La figure (11) synthétise ce mécanisme.



The proposed model for metasomatism related to the intrusion of carbonatite magma and resulting profiles from the H1–H18 layers in the Bayan Obo region. (1) Carbon slate (H9). (2) Calcite and dolomite carbonates (H8). (3) Sedimentary rocks of Bayan Obo Group (H1–H7). (4) Granitic migmatite of the Wutai formation (Pt1) (Wang et al., 2002). (5) Archean basement gneiss (Ar). (6) Proterozoic rift at Bayan Obo. (7) Path of fluid and magma. (8) Fertilization in sedimentary rocks.

FIGURE 11 – Genèse hydrothermale du gisement de Bayan Obo (d’après YANG X.Y. et al 2008).

A l’opposé, des publications plus récentes, comme celles de YANG K.F. *et al* en 2011 et de YANG & LE BAS en 2003, soutiennent que c’est une intrusion de magma carbonatitique qui a conduit à la formation du marbre dolomitique . C’est la présence de dykes de carbonatites près du gisement qui tend à prouver une origine carbonatitique du marbre dolomitique. La composition chimique des marbres dolomitiques est similaire à celle des dykes mais différente des dolomies d’origine sédimentaire.

Pour rappel, les dykes de carbonatites sont de trois types : dolomite, calcite, calcite-dolomite ; tandis que les marbres dolomitiques sont subdivisés selon leur texture : faciès à grains grossiers ou à grains fins. Dans le diagramme ternaire CaO - MgO - (FeO + Fe₂O₃ + MnO) de la figure (12), on observe que les marbres à grains grossiers ont une composition chimique très semblable à celle des dykes à carbonatites calcite-dolomite. Il est probable que ces marbres aient été plus tôt des carbonatites de type calcite-dolomite. Quant au marbre dolomitique à grains fins, il présente une composition comparable à celle des carbonatites de type dolomite.

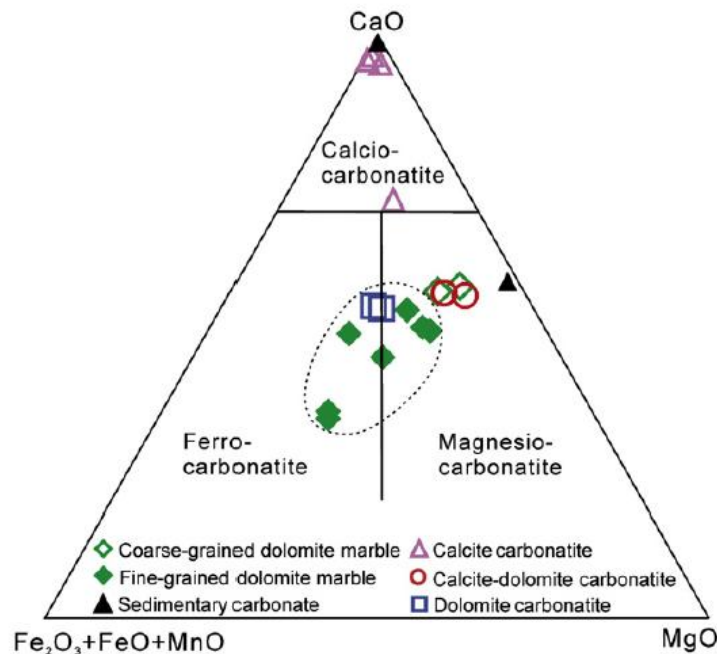


FIGURE 12 – Diagramme de classification CaO-MgO-(FeO+Fe₂O₃+MnO) de Woolley et Kempe pour les dykes de carbonatites, les marbres dolomitiques et des carbonates sédimentaires de la région de Bayan Obo (d’après YANG K.F. *et al* 2011).

De plus, le marbre à grains fins contient des éléments de terres rares comparables à ceux des dykes de carbonatites de type calcite. La teneur en terres rares augmente dans les carbonatites depuis les dykes type dolomite vers les dykes type calcite. Cette tendance est le résultat de la cristallisation fractionnée du magma carbonatitique qui aurait formé l’accumulation en terres rares du gisement de Bayan Obo (YANG K.F. *et al* 2011, [23]). Les terres rares font partie des éléments incompatibles qui cristallisent en fin de cristallisation du magma (ARNDT & GANINO 2010, [1]).

Dans la section géologie, il a été mentionné que les dykes de type calcite sont postérieurs à la formation de ceux de type dolomite. Ainsi, le marbre dolomitique avec une texture à grains fins, la roche hôte du gisement, serait le vestige des plutons de carbonatites de type dolomite par-dessus duquel s'est superposée la minéralisation des terres rares provenant du magma carbonatitique résiduel de type calcite (YANG K.F. *et al* 2011, [23]).

Que ce soit l'une ou l'autre des théories qui soit retenue, les géologues semblent s'accorder sur le fait que la formation du gisement est liée, de près ou de loin, à du magma carbonatitique.

6 Techniques d'exploitation et de traitement du minerai

La première étape est l'exploitation minière (Mining). A Bayan Obo, le minerai de fer et de terres rares est extrait de deux grands fosses à ciel ouvert (Mines *Main* et *Est*) à un taux d'au moins 15.000 tonnes par jour au moyen de pelles électriques. Faute d'eau à proximité, le minerai est transporté sous forme de graviers par chemin de fer jusqu'aux installations de Baotou, à 130 km de Bayan Obo (CASTOR & HEDRICK 2006, [4]).

La deuxième étape, opérée à Baotou, est le broyage de la roche (Milling). Le minerai est réduit en fine poudre (SCHÜLER *et al* 2011, [19]).

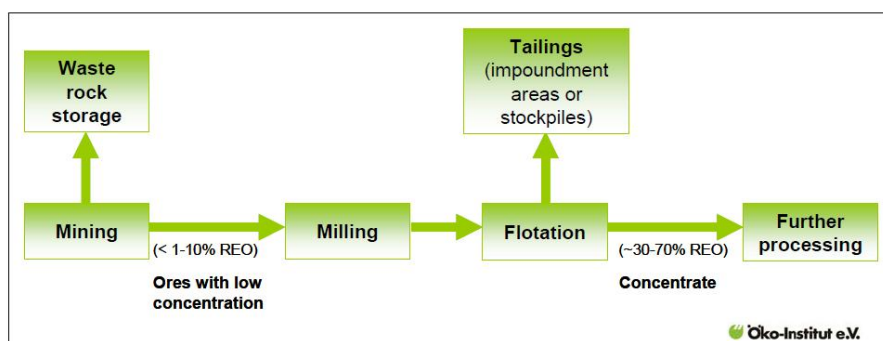


FIGURE 13 – Etapes principales dans le processus de traitement du minerai (d'après SCHÜLER *et al* 2011).

La troisième étape consiste à concentrer les minéraux. A Bayan Obo, le minerai est traité par flottation. Le fer et le niobium sont extraits des minéraux ferrifères et silicatés contenus dans les résidus de flottation tandis que les terres rares flottées donnent, par séparation gravimétrique, des concentrés de basténite et monazite contenant de 30 à 60% d'oxydes de terres rares.

Ensuite, les minéraux subissent des attaques acides. Cette phase chimique produit des hydroxydes et des chlorures de terres rares qui ne sont pas encore utilisables tels quels.

Pour certaines applications, la séparation des terres rares n'est pas nécessaire. Les terres rares sont alors employées sous forme de composés mixtes pour leurs propriétés communes. Un

tel mélange de métaux, appelé "mischmétal", est obtenu par électrolyse des chlorures mixtes.

Pour d'autres utilisations, il faut séparer les terres rares afin de pouvoir exploiter une propriété spécifique. Pour ce faire, à Bayan Obo, on utilise l'extraction par solvant. Ainsi, les lanthanides en solution aqueuse acide sont isolés au moyen d'un agent d'extraction organique non miscible à l'eau. Ce procédé repose sur la distribution différentielle des terres rares entre les phases aqueuse et organique. L'agent d'extraction permet de transférer des ions de terres rares de la phase aqueuse vers la phase organique. En utilisant plusieurs types de solvant, il est possible d'isoler successivement le lanthane, le cérium, le didyme (alliage Nd-Pr), le samarium/europium, le gadolinium/terbium, et puis l'ensemble des autres terres rares, l'yttrium est obtenu en fin d'extraction.

Il est difficile de donner plus de précisions car les processus exacts ne sont pas divulgués par les producteurs (MICHEL 2011, [16] ; SCHÜLER *et al* 2011, [19]).

7 Considérations environnementales

Le processus d'enrichissement progressif en terres rares conduit inévitablement à la formation de déchets. Ce sont ces déchets, ou *tailings*, qui constituent la plus grande menace pour l'environnement. Du thorium (Th), élément radioactif, est contenu dans les *tailings*.

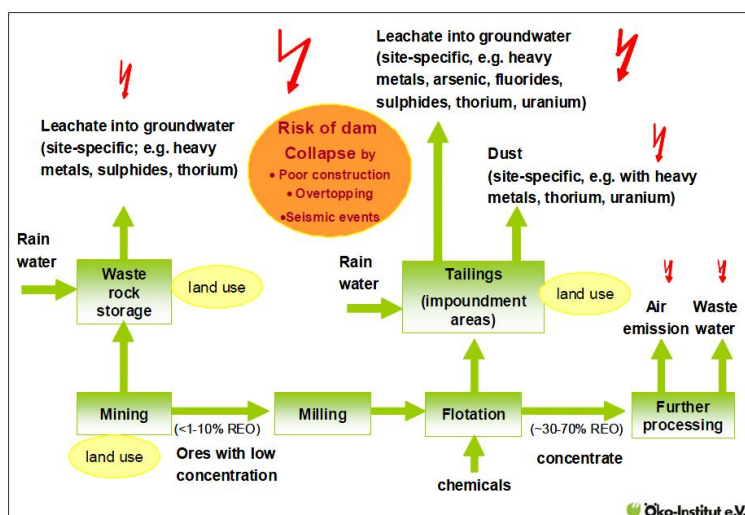


FIGURE 14 – Risques environnementaux dans le processus d'extraction des terres rares (d'après SCHÜLER *et al* 2011).

Les *tailings* sont stockés à proximité de Bayan Obo sur une superficie de 11 km². Cette surface est cent fois plus grande que la taille du bassin de l'usine hongroise d'alumine qui céda en août 2010, relâchant 700000 m³ de boues toxiques. La quantité de déchets provenant de la mine de Bayan Obo (pour le fer et les terres rares) atteindrait 150 millions de tonnes.

Lorsque les *tailings* sont exposés à la pluie, celle-ci peut entraîner des substances toxiques jusqu'aux eaux souterraines. Les eaux contaminées affectent alors les exploitations agricoles de

la région.

La phase de broyage du minerai constitue également une menace. Elle est responsable de l'émission de 61,8 t/an de poussières contenant du thorium. Or, l'exposition prolongée à ces poussières toxiques expose les populations locales à des risques accrus de cancer du poumon.

Au final, 75 m³ d'eaux usées acides et une tonne de résidus radioactifs sont générés par la production d'une tonne de concentré de terres rares (SCHÜLER *et al* 2011, [19]).

Il y a donc un paradoxe entre les applications des terres rares, dans le domaine environnemental, et le procédé d'obtention, polluant.

8 Production, ressources et réserves

Contexte économique mondial

Comme pour la plupart des métaux, la production mondiale de terres rares a augmenté pour suivre l'évolution de la demande. Le développement rapide de l'offre chinoise dans les années 90 a même permis de diminuer les prix des terres rares. Mais l'inondation du marché de terres rares à bas prix a tué la majeure partie des producteurs en dehors de la Chine. En effet, c'est la chute des prix qui, conjuguée à des problèmes environnementaux, a entraîné la fermeture de la mine californienne de Mountain Pass en 2002. La Chine s'est alors retrouvée en situation de quasi monopole.

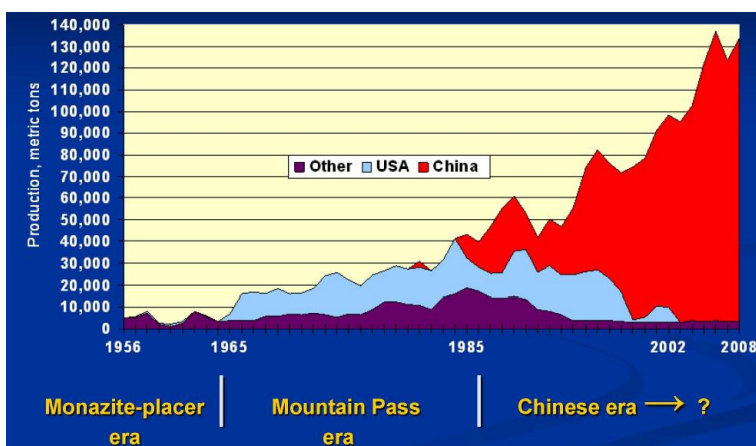


FIGURE 15 – Production mondiale de terres rares (d'après TSE 2011, mise à jour de HAXEL *et al* 2002).

Depuis 2007, les prix des terres rares ont augmenté. La consommation chinoise a significativement augmenté et le gouvernement a décidé de limiter et de taxer les exportations pour assurer son propre approvisionnement (PAPP *et al* 2008, [17]). La consommation d'oxydes de terres rares de la Chine était de 19 000 t en 2010, 52 000 t en 2005 et 87,000 t en 2010 (TSE 2011, [22]).

En 2010, selon l'Institut d'études géologiques des États-Unis (USGS), la Chine a produit 133 000 tonnes d'oxydes de terres rares, soit 97% de la production mondiale. Sur le total de la production chinoise, seul un quota de 30 258 tonnes a pu être exporté⁵. Cette restriction a comme conséquence de menacer les approvisionnements des pays occidentaux, la production hors Chine étant aujourd'hui assez faible (3 600 tonnes en 2010) (CHRISTMANN 2011, [6]; TSE 2011, [21]).

Il n'est pas étonnant que les terres rares, du fait des problèmes d'approvisionnement et des difficultés à les remplacer, possèdent un "criticality index" très élevé. Cet index évalue l'importance d'une substance en terme d'utilisation et le risque de restriction de son offre (ROGERS 2007, [18]).

La réouverture de Mountain Pass est donc prévue (PAPP *et al* 2008, [17]).

A Bayan Obo

Les rares statistiques relatives à la production et aux réserves des gisements chinois sont à considérer avec précaution car les chiffres précis sont maintenus confidentiels par le gouvernement. Les dernières données sont relativement anciennes, elles datent des années 1990 (TSE 2011, [21]).

Les ressources de la mine sont évaluées à 48 Mt à 6% d'oxydes de terres rares. Bayan Obo détiendrait 70% des réserves mondiales sur une surface d'à peine 48 km². C'est en grande partie grâce à l'exploitation minière de Bayan Obo que la Chine atteint 97% de la production mondiale (LAGNY 2011, [15]; YANG K.F. *et al* 2011, [23]).

Après plus de 40 ans d'exploitation, les gisements *Main* et *Est* ont été exploités à 35% de leur capacité (SCHÜLER *et al* 2011, [19]).

5. Cette évaluation ne tient pas compte des exportations clandestines stimulées par les taxes et les prix élevés.

Conclusion

Les terres rares, ces 17 éléments du tableau périodique, sont utilisées dans nombre d'applications environnementales. Bien qu'utilisées en petite quantité, elles sont aujourd'hui irremplaçables dans la fabrication de nombreux produits, ce qui en fait des ressources éminemment convoitées.

Bayan Obo est un gisement polymétallique Fe-Nb-REE situé en Mongolie intérieure. Ce gisement constitue les plus grandes réserves de terres rares au monde.

Le gisement est hébergé par des marbres du Groupe de Bayan Obo, principalement l'unité H8 (marbres dolomitiques). La formation de ces marbres dolomitiques est la principale interrogation concernant le gisement. Les dernières études réalisées tendent à montrer que la minéralisation des terres rares résulterait d'une intrusion magmatique carbonatitique datant du Méso-Protérozoïque. Cependant, une métasomatose hydrothermale est une autre origine possible du gisement. Dans les deux cas, tous les géologues s'accordent à dire que le gîte est lié à du magma carbonatitique.

Références

- [1] ARNDT N. & GANINO C. 2010. *Ressources minérales : nature, origine et exploitation*. Paris. Dunod. 173 p.
- [2] BAOTOU IRON AND STEEL COMPANY. [http ://www.btsteel.com/web/index.html](http://www.btsteel.com/web/index.html). Consulté le 11 avril 2012.
- [3] CAMPBELL L.S. & HENDERSON P. 1997. Apatite paragenesis in the Bayan Obo REE-Nb-Fe ore deposit, Inner Mongolia, China. *Lithos* Volume 42, pp. 89-103. doi : 10.1016/S0024-4937(97)00038-8. Consulté le 4 avril 2012.
- [4] CASTOR S.B. & HEDRICK J.B. 2006. Rare earth elements. pp. 769-792. In KOGEL J.E., TRIVEDI N.C., BARKER J.M. & Krukowski S.T. (eds) *Industrial Minerals and Rocks*. 7e édition : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Littleton. Colorado. 1548 p.
- [5] CHAO E.C.T., BACK J.M., MINKIN J.A., TATSUMOTO M., JUNWEN W., CONRAD J.E., MCKEE E.H., ZONGLIN H., QINGRUN M. & SHENGGUANG H. 1999. The sedimentary carbonate-hosted giant Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit of Inner Mongolia, China : a cornerstone example for giant polymetallic ore deposits of hydrothermal origin. *U.S. Geological Survey*. Bulletin 2143, 65 p.
- [6] CHRISTMANN P. 2011. Terres rares : enjeux et perspectives. *Géochronique* n°118, pp. 31-37. Consulté le 16 mars 2012.
- [7] CORDIER D.J. 2011. Rare earths. 2009 Minerals Yearbook. USGS. 16 p.
[http ://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2009-raree.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2009-raree.pdf). Consulté le 6 avril 2012.
- [8] HAXEL G.B., HEDRICK J.B. & ORRIS G. J. 2002. Rare Earth Elements - Critical Resources for High Technology. USGS. 4 p. [http ://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/fs087-02.pdf](http://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/fs087-02.pdf). Consulté le 6 avril 2012.
- [9] HEDRICK J.B. 2010. Rare earths. 2007 Minerals Yearbook. USGS. 19 p.
[http ://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2007-raree.pdf](http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2007-raree.pdf). Consulté le 6 avril 2012.
- [10] HURST C. 2010. China's rare earth elements industry : What can the west learn ?. Institute for the analysis of global security (IAGS). 42 p.
[http ://www.iags.org/rareearth0310hurst.pdf](http://www.iags.org/rareearth0310hurst.pdf). Consulté le 11 avril 2012.
- [11] INSTITUTE OF GEOCHEMISTRY, ACADEMIA SINICA. 1988. The geochemistry of Bayan Obo ore deposit. Scientific Publishing House. pp. 439-468. [en chinois]. Non consulté.
- [12] INSTITUTE OF GEOLOGY AND GUIYANG GEOCHEMISTRY CHINESE ACADEMY OF SCIENCES. 1974. The geochemical composition and mineralization regularity of Bayan Obo deposit, Inner Mongolia. pp. 8-18. [en chinois]. Non consulté.
- [13] KANAZAWA Y. & KAMITANI M. 2005. Rare earth minerals and resources in the world. *Journal of Alloys and Compounds* Volumes 408-412, pp 1339-1343. doi :10.1016/j.jallcom.2005.04.033. Consulté le 4 avril 2012.
- [14] LAGNY P. 2011. Bref aperçu du monde des terres rares. *Géochronique* n°118, pp. 17-19. Consulté le 16 mars 2012.

- [15] LAGNY P. 2011. Les gisements de terres rares. *Géochronique* n°118, pp. 19-29. Consulté le 16 mars 2012.
- [16] MICHEL J.-C 2011. La production des terres rares. *Géochronique* n°118, pp. 29-31. Consulté le 16 mars 2012.
- [17] PAPP J.F., BRAY E.L., EDELSTEIN D.L., FENTON M.D., GUBERMAN D.E., HEDRICK J. B., JORGENSEN J.D., KUCK P.H., SHEDD K.b. & TOLCIN A.C. 2008. Factors that influence the price of Al, Cd, Co, Cu, Fe, Ni, Pb, Rare Earth Elements, and Zn. USGS. 65 p. <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1356/pdf/ofr2008-1356.pdf>. Consulté le 6 avril 2012.
- [18] ROGERS N.D. 2007. Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. The National Academy of Sciences. 4 p. http://dels.nas.edu/resources/static-assets/materials-based-on-reports/reports-in-brief/critical_minerals_final.pdf. Consulté le 14 avril 2012.
- [19] SCHÜLER D., BUCHERT M., LIU R., DITTRICH S. & MERZ C. 2011. *Study on rare earths and their recycling : Final report for The Greens/European Free Alliance Group in the European Parliament*. Darmstadt. Öko-Institut e.V. 162 p. <http://www.oeko.de/oekodoc/1112/2011-003-en.pdf>. Consulté le 6 avril 2012.
- [20] SMITH M.P., HENDERSON P. & CAMPBELL L.S. 2000. Fractionation of the REE during hydrothermal processes : Constraints from the Bayan Obo Fe - REE - Nb deposit, Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta* Volume 64, 20 p. doi :10.1016/S0016-7037(00)00416-6. Consulté le 4 avril 2012.
- [21] TSE P.K. 2011. China's Rare-Earth Industry. USGS. 15 p. <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1042/of2011-1042.pdf>. Consulté le 14 avril 2012.
- [22] TSE P.K. 2011. China. 2010 Minerals Yearbook. USGS. 30 p. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/country/2010/myb3-2010-ch.pdf>. Consulté le 14 avril 2012.
- [23] YANG K.F., FAN H.R., SANTOSH M., HU F.F. & WANG K.Y. 2011. Mesoproterozoic carbonatitic magmatism in the Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, North China : Constraints for the mechanism of super accumulation of rare earth elements. *Ore Geology Reviews* Volume 40, pp. 122-131. doi :10.1016/j.oregeorev.2011.05.008. Consulté le 4 avril 2012.
- [24] YANG X.M. & LE BAS M.J. 2003. Chemical compositions of carbonate minerals from Bayan Obo, Inner Mongolia, China : implications for petrogenesis. *Lithos* Volume 72, pp. 97-116. doi :10.1016/j.lithos.2003.09.002. Consulté le 4 avril 2012.
- [25] YANG X.Y., SUN W. D., ZHANG Y. X. & ZHENG Y. F. 2008. Geochemical constraints on the genesis of the Bayan Obo Fe - Nb - REE deposit in Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta* Volume 73, pp. 1417-1435. doi :10.1016/j.gca.2008.12.003. Consulté le 4 avril 2012.
- [26] YUAN Z., BAI G. WU C. ZHANG Z. & YE X. 1992. Geological features and genesis of the Bayan Obo REE ore deposit, Inner Mongolia, China. *Applied Geochemistry* Volume 7, pp. 429-442. doi :10.1016/0883-2927(92)90004-M. Consulté le 6 avril 2012.
- [27] XU C., WANG L., SONG W. & WU M. 2010. Carbonatites in China : A review for genesis and mineralization. *Geoscience Frontiers* Volume 1, pp. 105-114. doi :10.1016/j.gsf.2010.09.001. Consulté le 4 avril 2012.

Annexe : Description et applications des éléments de terres rares

Lanthane

- Symbole : *La*.
- Nombre atomique : 57.
- Découvert en 1839 par C.G. MOSANDER.
- Origine du nom : mot grec *lanthanein* qui signifie "caché".
- Abondance dans la croûte terrestre : 39 ppm.
- Applications : Batteries NiMH (automobiles hybrides), catalyse du craquage des pétroles lourds.

Cérium

- Symbole : *Ce*.
- Nombre atomique : 58.
- Découvert en 1803 par M.H. KLAPROTH & J.J. BERZELIUS.
- Origine du nom : astéroïde *Ceres*.
- Abondance dans la croûte terrestre : 66 ppm.
- Applications : Céramiques, catalyse (exemple : filtres antiparticules de l'automobile), polissage du verre (optique), fabrication de verres absorbant les UV.

Praséodyme

- Symbole : *Pr*.
- Nombre atomique : 59.
- Découvert en 1885 par C.A. VON WELSBACH.
- Origine du nom : mots grecs *prasios* et *didymos*, ce qui donne "jumeau vert".
- Abondance dans la croûte terrestre : 9 ppm.
- Applications : Optique (avec Nd), colorant jaune du verre et des céramiques.

Néodyme

- Symbole : *Nd*.
- Nombre atomique : 60.
- Découvert en 1885 par C.A. VON WELSBACH.
- Origine du nom : mots grecs *neos* et *didymos*, ce qui donne "nouveau jumeau".
- Abondance dans la croûte terrestre : 41 ppm.
- Applications : Aimants permanents (alliage néodyme-fer-cobalt pour fonctionnement à températures plutôt basses (Point de Curie : 310°C), indispensables à l'automobile électrique et hybride, aux éoliennes de haute performance).

Prométhium

- Symbole : *Pm*.
- Nombre atomique : 61.

- Découvert en 1947 par J.A. MARINSKY, L.E. GLENDENIN & C.D. CORYELL.
- Origine du nom : mythologie grecque, *Prometheus* vole le feu aux dieux pour le donner à l'homme.
- Abondance dans la croûte terrestre : / .
- Applications : son usage est limité car le prométhium n'existe que sous forme d'isotope instable.

Samarium

- Symbole : *Sm*.
- Nombre atomique : 62.
- Découvert en 1879 par LECOQ DE BOISBAUDRAN.
- Origine du nom : mine russe Samarski.
- Abondance dans la croûte terrestre : 7 ppm.
- Applications : Aimants permanents (alliage samarium-cobalt pour fonctionnement à hautes températures (Point de Curie : 700 à 800°C), par exemple dans les TGV de dernière génération)

Europium

- Symbole : *Eu*.
- Nombre atomique : 63.
- Découvert en 1889 par SIR WILLIAM CROOKES.
- Origine du nom : continent Europe.
- Abondance dans la croûte terrestre : 2 ppm.
- Applications : Luminophores pour écrans plats (couleur rouge) et ampoules à basse consommation d'énergie, protection des billets de banque.

Gadolinium

- Symbole : *Gd*.
- Nombre atomique : 64.
- Découvert en 1880 par J.C.G. MARIGNAC.
- Origine du nom : chimiste finlandais GADOLIN.
- Abondance dans la croûte terrestre : 6 ppm.
- Applications : agent de contraste en imagerie médicale, réfrigération magnétique.

Terbium

- Symbole : *Tb*.
- Nombre atomique : 65.
- Découvert en 1843 par C.G. MOSANDER.
- Origine du nom : ville de Ytterby en Suède.
- Abondance dans la croûte terrestre : 1 ppm.
- Applications : Luminophores pour écrans plats (couleur verte) et ampoules à basse consommation d'énergie, aimants permanents.

Dysprosium

- Symbole : *Dy*.
 - Nombre atomique : 66.
 - Découvert en 1886 par LECOQ DE BOISBAUDRAN.
 - Origine du nom : mot grec *dysprosilos*, qui est difficile à obtenir.
 - Abondance dans la croûte terrestre : 5 ppm.
- Applications : Aimants permanents au néodyme-fer-bore : son addition permet d'augmenter la température d'application des aimants au néodyme, il entre aussi dans la composition de certains lasers.

Holmium

- Symbole : *Ho*.
- Nombre atomique : 67.
- Découvert en 1879 par P.T. CLEVE & J.L. SORET.
- Origine du nom : nom latin de la ville de Stockholm, *Holmia*.
- Abondance dans la croûte terrestre : 1 ppm.
- Applications : Composants d'aimants à très haute intensité magnétique.

Erbium

- Symbole : *Er*.
- Nombre atomique 68.
- Découvert en 1843 par C.G. MOSANDER.
- Origine du nom : Ytterby en Suède.
- Abondance dans la croûte terrestre : 3,5 ppm.
- Applications : Lasers pour applications médicales, également utilisé comme pigment rose pour les verres céramiques.

Thulium

- Symbole : *Tm*.
- Nombre atomique : 69.
- Découvert en 1879 par P.T. CLEVE.
- Origine du nom : *Thule*, ancien nom de la Scandinavie.
- Abondance dans la croûte terrestre : 0,5 ppm.
- Applications : Aimants ferritiques pour fours à microondes

Ytterbium

- Symbole : *Yb*.
- Nombre atomique : 70.
- Découvert en 1878 par J.C.G. MARIGNAC.
- Origine du nom : Ytterby en Suède.
- Abondance dans la croûte terrestre : 3 ppm.

- Applications : Fibre optique (amplification du signal), cellules photovoltaïques, sources de rayons X pour analyseurs portables.

Lutécium

- Symbole : *Lu*.
- Nombre atomique : 71.
- Découvert en 1908 par G. URBAN & C.A. VON WELSBACH.
- Origine du nom : *Lutetia*, ancien nom de Paris.
- Abondance dans la croûte terrestre : 1 *ppm*.
- Applications : génération de rayons X, catalyse.

Yttrium

- Symbole : *Y*.
- Nombre atomique : 39.
- Découvert en 1788 par J. GADOLIN.
- Origine du nom : Ytterby en Suède.
- Abondance dans la croûte terrestre : 33 *ppm*.
- Applications : Eclairage fluorescent, luminophores pour écrans plats, céramiques, supraconducteurs à haute température, lasers, aciers inoxydables résistant aux hautes températures, piles à combustible à oxydes solides.

Scandium

- Symbole : *Sc*.
- Nombre atomique : 21.
- Découvert en 1879 par LARS FREDERICK NILSON.
- Origine du nom : *Scandia*, Scandinavie en latin.
- Abondance dans la croûte terrestre : 22 *ppm*.
- Applications : Lampes halogènes, aéronautique, piles à combustible à oxydes solides.