

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Minier

Projet De Fin d'Etudes Pour l'Obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat
En Génie Minier

Thème

Etude Générale Sur Les Terres Rares

Présenté par :

Mr. BEDREDDINE Youcef

Devant le jury :

Présidente: Dr. DERAMCHI Karima

Promoteur: Pr. SEBAI Amar

Examineur: Mr. CHANANE Laroussi

Promotion Septembre 2014

REMERCIEMENT

Je tiens à remercier mon Bon Dieu, le tout puissant de m'avoir permis de mener à bien ce modeste travail.

J'exprime mes sincères remerciements à mon promoteur
Pr. Amar SEBAI pour ses précieux conseils et aides, réussissant à me guider tout au long de mon travail.

Je remercie tous ceux qui ont contribué à ma formation depuis mon jeune âge et aux enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique, de nous avoir fait profiter de leur expérience scientifique et pour les précieux enseignements et conseils qu'ils nous ont prodigués tout au long de notre scolarité, et tous les enseignants du Département Génie Minier.

Je remercie tous les membres du jury
La présidente Mme DERAMCHI Karima
Le promoteur Mr SEBAI Amar
L'examinateur Mr CHANANE Laroussi
d'avoir accepté d'examiner mon travail, et d'y avoir porté leur juste appréciation.

Mes remerciements s'adressent également à ma famille qui n'a cessé de m'encourager durant toutes mes études, surtout à mes chers parents.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Plus que jamais Je dédie ce travail à mes chers parents, jamais je ne saurais m'exprimé quant aux sacrifices et aux dévouements que vous consacrés à mon éducation et mes études .les mots expressifs soient-ils restent faibles pour énoncer ma gratitude hautement profonde.

&

Ma Grande Mère ;

&

Mes frères Mouhand Akli, Samir, Karim, Athmane ;

&

Leurs épouses ;

&

Toute la famille BEDREDDINE ;

&

Ma femme et sa famille ;

&

Tous mes amis

Nabil, Houssam, Aissa, H'mida, Riad, Chouayb, Farès, Ishak, Prio, et surtout

Mouh et Farid ;

&

Mes amis de l'Ecole Nationale Polytechnique ;

&

Tout le personnel du département de Génie Minier, à leurs tête le chef du département ;

&

Tous ceux qui me connaissent et je connais.

تعتبر العناصر الأرضية النادرة اهم مصدر للمواد الاولية المستعملة في مجال التكنولوجيا العالية (الهواتف الذكية.الشاشات لاد....) والتكنولوجيات الخضراء (الالواح الهوائية. السيارات الكهربائية.....). هي عبارة عن سبعة عشر عنصر كيميائي بخصائص مميزة فنجدها غالبا مرتبطة مع عدة معادن مختلفة.

فيهذا العمل سوف نتطرق الى خصائص العناصر الرضية النادرة, استعمالها, واهم الحقول المنجمية الاستراتيجية في العالم.

كما نتحدث عن العناصر الأرضية النادرة في الجزائر, الجيولوجيا, المؤشرات و مناطق تواجد الحقول التي تحتوي على هذه المواد
الكلمات المفتاحية : العناصر الأرضية النادرة ، التكنولوجيا العالية ، الصين ، الحقول المنجمية ، الجيولوجيا ، الجزائر

Résumé

Les terres rares se considèrent comme la plus importante source des matières premières utilisées dans le domaine de la haute technologie (smart phones, écrans LED...) et les technologies vertes (les éoliennes, les voitures hybrides...), ce sont dix-sept éléments chimiques avec des caractéristiques spéciales, ils se trouvent souvent associés à des divers gisements.

Dans ce travail, on vise à déterminer les propriétés des terres rares, leur utilisation, leur production et les principaux gisements stratégiques dans le monde.

Dans une seconde partie, on parle sur les terres rares en Algérie, l'environnement géologique, les indices et la localisation des potentiels minéraux contenant les éléments des terres rares.

Mots clés : Les éléments des terres rares, la haute technologie, la Chine, les gisements miniers, la géologie, l'Algérie

Abstract

Rare earth elements are considered as the most important source of the raw materials used in the high technology industry (smart phones, LED screens...) et green technologies such as (eoliens, hybrid cars). They are composed of seventeen chemical elements with special characteristics, often found associated with diverse ores bodies.

In this project, we aim to determine the properties of rare earths, their uses, their production and the principal strategic ores bodies in the world.

In the second section, we discuss the occurrence of rare earth in Algeria, their geology conditions, indices and the localisation of minerals containing potentially rare earth elements.

Key words : Rares earth elements, high technology, China, mining fields, geology, Algeria

Table des matières

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I. GENERALITES

I.1. Définition des terres rares	2
I.1.1. Groupe cérique	4
I.1.2. Groupe yttrique.....	4
I.2. Utilisation des terres rares.....	5
I.3. Les principaux gisements de terres rares	9
a) Chine.....	9
b) Etats-Unis	10
c) Canada.....	10
d) Australie	11
e) Afrique du Sud	11
f) Brésil.....	11
g) Inde	12
h) Malaisie	12
i) Ex-URSS	12
I.4. Réserves et la production mondiale des terres rares.....	15
I.5. Offre et demande.....	19

CHAPITRE II. LA GEOLOGIE DES TERRES RARES

Introduction	24
II.1. Types de gisements	24
II.1.1. Gisements associés aux carbonatites	24
II.1.2. Gisements associés aux complexes intrusifs peralcalins.....	24
II.1.3. Gisements associés aux formations de fer (type fer-oxydes)....	25
II.1.4. Gisements associés à des dépôts alluviaux (placers).....	25

II.1.5.	Gisements associés à des veines métasomatiques	26
II.1.6.	Gisements associés aux complexes intrusifs hyperalcalins.....	26
II.2.	Minerais de terres rares	32
II.2.1.	Monazite	32
II.2.2.	Bastnäsite.....	34
a)	Bastnäsite-(Ce) [(Ce,La)CO ₃ F]	34
b)	Bastnäsite-(La) [(La,Ce)CO ₃ F]	35
c)	Bastnäsite- (Y) [(Y,Ce)CO ₃ F].....	35
II.2.3.	Loparite-(Ce).....	36
II.2.4.	Xénotime :	37
a)	Le Xénotime-Yttrium [Y (PO ₄)].....	37
b)	Le xénotime-Ytterbium [(Yb, Y, ROIS) (PO ₄)].....	37

CHAPITRE III. LES TERRES RARES EN ALGERIE

Introduction	39	
III.1.	Les gisements algériens.....	39
III.2.	Activité minière	41
III.3.	L'indice d'Ihaouhaouène.....	43
Conclusion Générale	45	
Bibliographie	46	



Liste des Figures

Figure I.1. Le groupe cérique.....	4
Figure I.2. Le groupe yttrique	4
Figure I.3. Utilisation des terres rares dans l'industrie.....	5
Figure I.4. Les terres rares et le développement technologique	9
Figure I.5. Vue aérienne de la mine de Bayan Obo en Mongolie Intérieure (Chine)	10
Figure I.6. Localisation des principaux gisements de terres rares en cours de développements hors Chine	14
Figure I.7. Réserves mondiales de terres rares estimées en 2011 (Mt).....	15
Figure I.8. Production mondiale de terres rares de 1950 à 2000.....	17
Figure I.9. Production mondiale actuelle de terres rares (en tonnes).....	17
Figure I.10. Pays producteurs, consommateurs et qui disposent des réserves	18
Figure I.11. La demande en terres rares en 2010.....	19
Figure I.12. Exemple d'augmentation des prix de terres rares (Le cas de dysprosium)	20
Figure I.13. L'offre et la demande mondiale des terres rares (2005-2015)	21
Figure I.14. Prix de quelques éléments de terres rares en \$	23
Figure II.1. La monazite (galleries)	33
Figure II.2. La bastnäsite-(Ce)	34
Figure II.3. La bastnäsite-(La)	35
Figure II.4. La bastnäsite-(Y).....	35
Figure II.5. Loparite-(Ce).....	36
Figure II.6. Xénotime-Yttrium.....	37
Figure II.7. Xénotime-Ytterbium.....	37
Figure III.1. L'atlas tellien.	39
Figure III.2. Potentialités minières Algériennes	42

Listes des tableaux

Tableau I.1 Les terres rares	2
Tableau I.2 Abondance des ETR dans la croûte terrestre (en g/t).....	3
Tableau I.3. Pénurie/excédent de l'offre mondiale prévu pour 2015 (+/- 15 %).....	22
Tableau II.1. Caractéristiques de deux types de gîtes primaires des terres rares.....	27
Tableau II.2. Caractéristiques de deux types de gîtes secondaires des terres rares.....	30
Tableau II.3. Teneurs des principaux minerais de terres rares	32
Tableau II.4. Teneurs des principaux minerais de terres rares	36
Tableau III.1. Exemples de gisements algériens	44



Liste des Abréviations

Md\$	Million de dollars Américain
UV	Ultraviolet
Mt	Million tonnes
MGW	Mégawatt
USGS	United States Geological Survey
CNUCED	Conférence des Nations unies sur le Commerce et le Développement
IMCOA	Industrial Minerals Company of Australia Pty (Ltd)

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Leur présence dans le sol est invisible, durant des centaines d'années nous avons tout ignoré de leurs existences et ils étaient considérés comme sans valeur, il n'est que depuis quelques années que les chercheurs ont reconnu leurs utilités. Aujourd'hui, elles nous dictent notre avenir, elles nous ouvrent un large champ de nouvelles possibilités, elles sont partout, dans les téléphones cellulaires, les voitures électriques, dans les billets de banque. Elles sont plus précieuses que l'or ou le pétrole.

Tout en bas du tableau périodique, des éléments chimiques ont l'air un peu à l'écart et qu'on a tendance à oublier. Il s'agit de 17 métaux qui ont des particularités très recherchées, souvent irremplaçables dans les processus de fabrication de plusieurs produits notamment dans le domaine de la nouvelle technologie, ce sont les terres rares.

Au long de ce projet, je vais résumer le travail en trois chapitres principaux

Le premier chapitre présentera des généralités sur les terres rares.

Le deuxième chapitre donnera un aperçus globale sur la géologie des terres rare.

Le dernier chapitre sera consacré aux terres rares en Algérie.

Je finirai ce projet par un conclusion générale.

CHAPITRE I

GENERALITES

I.1. Définition des terres rares

Les terres rares regroupent 17 éléments chimiques (métalliques) présents dans le tableau périodique. Ce groupe est formé des 15 lanthanides ainsi que de l'Yttrium et du Scandium.

Tableau I.1 Les terres rares (ERAMET)

Le tableau périodique des éléments chimiques est présenté ci-dessous. Les terres rares sont mises en évidence par une couleur orange. Elles comprennent le Scandium (Sc), l'Yttrium (Y), les 15 lanthanides (La à Lu) et les 15 actinides (Ac à Lr). Une légende indique que les terres rares sont les éléments des terres rares.

H	ELEMENTS DES TERRES RARES																He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									
Lanthanides																	
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Actinides																	
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Généralement, de couleur blanc argenté ou gris, ces métaux sont très brillants et s'oxydent facilement au contact de l'air. Ils ont de nombreuses propriétés en commun, ce qui explique pourquoi ils se retrouvent ensemble dans les mêmes gisements géologiques.

Les 17 terres rares se retrouvent dans les mêmes gisements, mais leur distribution et leur concentration varient d'un endroit à l'autre.

Ces éléments n'ont en fait de rare que le nom (qui se réfère à la rareté des minéraux à partir desquels ils étaient extraits à l'origine) puisqu'ils sont

présents à des concentrations plus élevées que l'argent ou le mercure dans la croûte terrestre (leur concentration globale dans la croûte terrestre est de l'ordre de 0,016 %). En revanche, ils sont très inégalement répartis à la surface du globe. Seuls quelques gisements au monde, économiquement parlant, méritent d'être exploités ; ajoutées à cela, elles impliquent de grandes difficultés d'exploitation (main d'œuvre, moyens techniques, impact environnemental, ...).

Tableau I.2 Abondance des terres rares dans la croûte terrestre (en g/t)

21. Sc	22
39. Y	33
57. La	30
58. Ce	60
59. Pr	8,2
60. Nd	28
62. Sm	6
63. Eu	1,2
64. Gd	5,4
65. Tb	0,9
66. Dy	3
67. Ho	1,2
68. Er	2,8
69. Tm	0,5
70. Yb	3,4
71. Lu	0,5

La prédominance, dans les minéraux, soit des lanthanides légers, soit de l'Yttrium et des lanthanides lourds, a conduit à subdiviser la famille en:

- un groupe cérique;
- un groupe yttrique.

Les gisements de minéraux des terres rares sont souvent riches en terres rares légères ou en terres rares lourdes, mais ne contiennent que rarement les deux catégories en quantité importante.

I.1.1. Groupe cérique

Ce sont les lanthanides légers : du Lanthane au Samarium, et sont les plus fréquentes.

Ce groupe contient : Lanthane (La), Cérium (Ce), Praséodyme (Pr), Néodyme (Nd), Samarium (Sm).

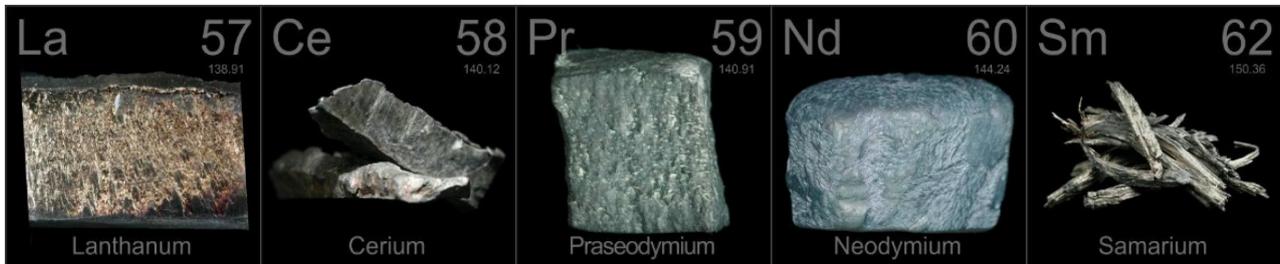


Figure I.1. Le groupe cérique (MTL index)

I.1.2. Groupe yttrique

C'est les lanthanides lourds : du l'Europium au Lutécium ainsi que l'Yttrium, ce sont les moins fréquentes que les cériques mais plus précieuses.

Ce groupe contient : Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Holmium (Ho), Erbium (Er), Thulium (Tm), Ytterbium (Yb), Lutécium (Lu), Yttrium (Y).



Figure I.2. Le groupe yttrique (MTL index)

I.2. Utilisation des terres rares

Le plus ancien usage des terres rares revient au baron autrichien Auer, qui à partir de 1892 employa des oxydes de thorium (99%, radioactif) et de cérium (1%) pour fabriquer les manchons portant son nom : ils procuraient aux lampes à pétrole et à gaz une lumière blanche puissante, et sont toujours utilisés par les campeurs avec leurs lampes à butane.

En 1903 le même Auer inventa les pierres à briquet, qui s'avèrent beaucoup plus commodes que les anciens briquets à silex ou pyrite : le choc d'une lame d'acier provoquait des étincelles enflammant de l'amadou, ou de la poudre d'un fusil ou pistolet. Les nouvelles pierres étaient faites d'un alliage de cérium impur et de 70% de fer : frottées par une molette, elles enflammaient aisément des vapeurs d'essence ou gaz, et furent adoptées par les soldats fumeurs de la I^{ère} Grande Guerre, et sont toujours utilisées dans les briquets à gaz.

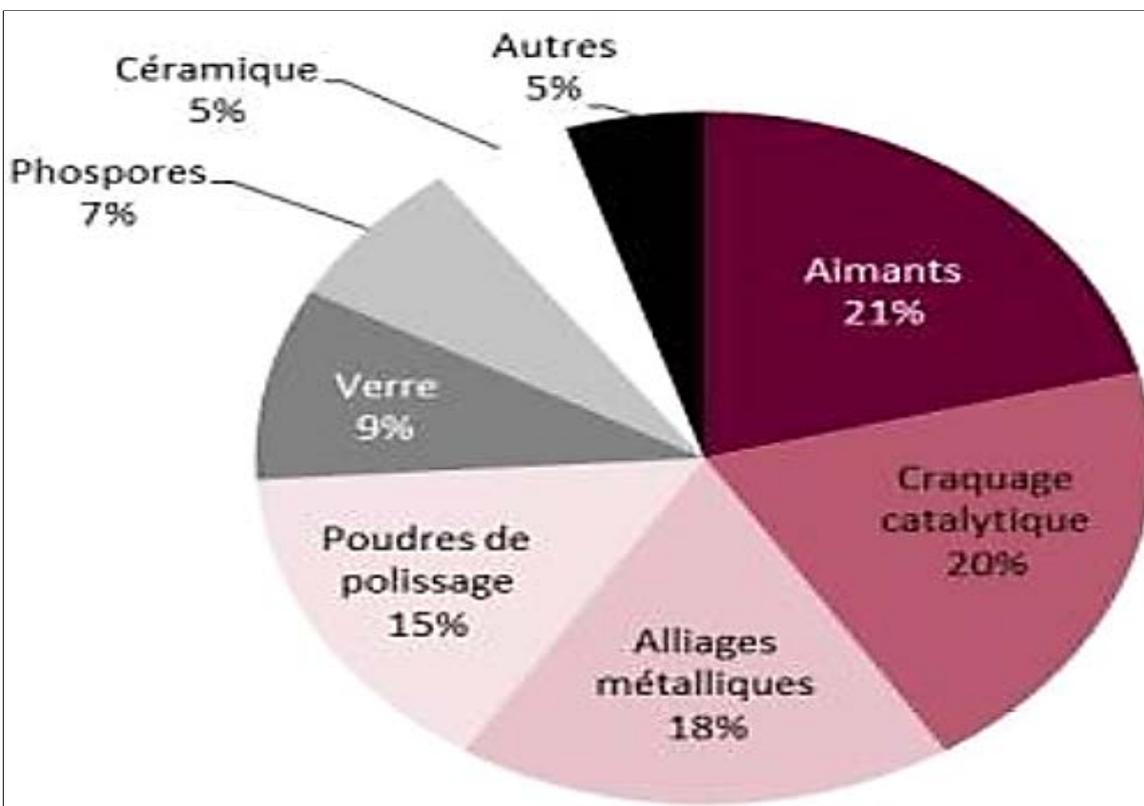


Figure I.3. Utilisation des terres rares dans l'industrie (Sia Partners, 2010)

Ensuite, les terres rares ont été utilisées dans divers domaines parmi lesquels on peut citer :

a) **Métallurgie** : les moteurs des futures voitures électriques et les génératrices d'éoliennes requièrent beaucoup de Néodyme+Fer+Bore pour les aimants permanents. Il en est de même pour les paliers magnétiques, l'outillage portatif, les aciers spéciaux (par exemple les aciers à l'ytterbium servent à renforcer la résistance au choc des tubes de pipelines),

Dans l'aéronautique et les industries spatiales, des alliages d'aluminium sont améliorés par du scandium.

b) **Batteries** : les batteries NiMH contiennent du lanthane et du cérium, et le stockage d'hydrogène serait possible pour les piles à combustible.

c) **Raffinage de l'essence et du gazole** : le cérium et le lanthane protègent le platine des catalyseurs. Dans les pots catalytiques le cérium et le lanthane convertissent l'oxyde de carbone CO et les hydrocarbures imbrûlés en gaz carbonique CO₂ et eau H₂O. Il existe aussi des additifs ajoutés au gazole pour brûler les particules noires émises en abondance au démarrage.

d) **Les super-aimants** : sont l'une des applications majeures, indispensables dans les moteurs électriques (moteurs à courant continu, moteurs pas-à-pas, actionneurs, capteurs) : à égalité de puissance, ils ont un volume 7 à 10 fois inférieur à celui des ferrites.

Il en existe deux classes, fabriquées par frittage de poudres par compression vers 1200 °C, en atmosphère inerte :

- Aimants permanents au néodyme-fer-bore, plus répandus et plus puissants : ils sont très durs et s'usinent par électroérosion ou découpe à la scie diamantée, mais ils ne conservent leur aimantation qu'à moins de 100-150°C, et sont sensibles à l'oxydation ;
- aimants au samarium-cobalt : plus chers à cause du prix du cobalt, ils travaillent jusqu'à 150°C, mais sont mécaniquement fragiles.

Ces aimants ont un beau avenir avec l'essor des voitures électriques et des éoliennes.

e) Eclairages et écrans : plusieurs terres rares sont des luminophores (*phosphors* en anglais), substances s'illuminant un bref instant quand elles sont bombardées par des électrons dans les tubes à vide ou qu'on les éclaire avec une lumière UV, des rayons X ou Gamma.

Dans les lampes fluorescentes une décharge électrique dans un tube à vapeur de mercure produit une lumière UV, qui induit la fluorescence d'un luminophore déposé sur la paroi interne du tube.

On emploie l'euporium pour le bleu, le cérium pour le vert et l'UV, le terbium et le cérium pour le vert, l'euporium ou l'yttrium pour le rouge.

Les leds blanches existent depuis 1993 et sont promises à un bel avenir dans l'éclairage, grâce à leur faible consommation et leur longue durée de vie. Le substratum, une diode InGaN émet une lumière bleue, il est couvert par une couche de luminophore qui la transforme en lumière blanche, et qui utilise du cérium et de l'yttrium ou de l'euporium.

Les tubes cathodiques (ou écrans CRT, *cathode ray tubes*) des anciens téléviseurs et ordinateurs contiennent de l'euporium et de l'yttrium pour la couleur rouge. Il en est de même pour les écrans plats à cristaux liquides (LCD) ou plasma.

D'autres applications sont le renforcement d'images pour écrans à RX (le film argentique est placé entre deux filtres avec terbium, thulium et niobium), les appareils de vision nocturne, les produits phosphorescents dans lesquels la fluorescence dure pendant une dizaine d'heures grâce à de l'euporium, des scintillateurs, des détecteurs de neutrons.

f) Optique et industrie du verre : l'oxyde de cérium est depuis longtemps appliqué au polissage des composants optiques et des glaces. La décoloration du verre contenant du fer est assurée par le cérium, l'erbium et le néodyme. Le cérium sert aussi à absorber les UV dans les lunettes de soleil, le sulfure de cérium rouge colore les plastiques en remplacement du cadmium toxique.

Les verres peuvent être colorés par le néodyme pour le violet, le praséodyme pour le vert clair, l'erbium pour le rose pâle, le cérium pour le jaune à orangé.

L'optique de précision emploie des verres au lanthane pour les microscopes, télescopes, et appareils photo.

Dans les fibres optiques, le verre est dopé par le néodyme, l'ytterbium, l'erbium et le samarium.

Les lasers YAG (grenat à l'ytterbium et aluminium) contiennent aussi du néodyme. D'autres types de lasers avec néodyme, prométhéum, erbium, thulium, holmium, yttrium permettent d'obtenir des faisceaux de couleurs variées. Outre les applications civiles (découpage, soudure, perçage, télémétrie), les lasers sont indispensables pour des applications militaires comme la télémétrie et le guidage des missiles.

g) *Electronique* : emploi d'aimants pour haut-parleurs de qualité, de têtes de lecture des disques durs (aimants au Ne-Fe-B), fabrication de condensateurs céramiques, de supraconducteurs...

h) *Médecine* : les appareils d'imagerie IRMN (imagerie par résonance magnétique nucléaire) font appel à de très puissants aimants permanents au néodyme-fer-bore, pesant plusieurs tonnes contenant le néodyme, le praséodyme, le dysprosium et le terbium ; ils sont remplacés depuis 2008 par des bobines à supraconducteur refroidies à l'hélium liquide. Du gadolinium est injecté dans le patient comme produit de contraste pour l'étude du cœur et de la circulation.

Mentionnons aussi quelques applications diverses comme l'Yttrium pour la fabrication de zircons imitant le diamant, les détecteurs d'oxygène à l'ytterbium, etc.



Figure I.4. Les terres rares et le développement technologique (J.-C. Bünzli, 2013)

I.3. Les principaux gisements de terres rares

a) Chine

Le plus grand gisement mondial est celui de *Bayan Obo* en Mongolie Intérieure, découvert en 1927, qui contiendrait 48 Mt de minerai à 6% d'oxydes de terres rares, sous forme de bastnaésite et de monazite, plus du niobium. Il s'agit de marbres dolomitiques précambriens (Protérozoïque Moyen), restes d'une ancienne plateforme calcaire à algues, métamorphisée à plusieurs reprises, et minéralisée par des venues hydrothermales entre 535 et 398 Ma.

Le marbre fortement plissé est surmonté de gisements de fer rubané (hématite et magnétite), dont l'exploitation donne les terres rares comme sous-produit.

On connaît aussi des gisements latéritiques plus au sud dans les provinces de Yiangxi, Longman et Xunwu, sans doute au dessus de granitoïdes altérés. Leur faible épaisseur implique la destruction de grandes surfaces.

D'autres gisements sont connus dans des filons de bastnaésite à *Maoniuping* (Sichuan) et *Weishan* (Shandong).



Figure I.5. Vue aérienne de la mine de Bayan Obo en Mongolie Intérieure (Chine)

«Le plus grand gisement mondial de terres rares»

b) Etats-Unis

En Californie, l'important gisement de *Mountain Pass*, longtemps le seul du pays, a été découvert en 1947 par des prospecteurs d'uranium, grâce à sa radioactivité. Le principal minéral est la bastnäsite, qui contient outre le cérium, du lanthane, du samarium, du gadolinium, du néodyme, du praséodyme et de l'euprotium. Le minerai se trouve dans huit intrusions de carbonatites dans des gneiss et schistes précambriens, avec autres intrusions de granites et filons. Cette mine, ouverte en 1952, a été fermée en 2002 par suite à la concurrence chinoise et les contraintes écologiques ; un centre de séparation a été remis en activité pour traiter d'anciens stocks.

c) Canada

Trois gisements sont reconnus mais encore inexploités :

- ***Thor Lake (NW Territories)*** : un pluton comportant une syénite néphélinique, dans laquelle une zone horizontale d'origine hydrothermale contient de l'allanite et de l'apatite, ces deux minéraux renferment a les terres rares (cérium, yttrium). Les réserves évaluées à 75 Mt contiennent 1,43% de terres rares ;
- ***Hoidas Lake (nord du Saskatchewan)*** : massif granitique coupé par une grande faille de plus de 10 km de long, avec bastnäsite dont l'origine serait une remontée hydrothermale le long de la faille, avec présence du néodyme, cérium, dysprosium...

- **Le complexe alcalin de Kipawa (Québec)** : la roche est une syénite alcaline âgée de 1033 Ma, plissée sous un chevauchement, dont les terres rares présentes sont le cérium, le dysprosium, l'erbium, le gadolinium, le lanthane, le néodyme et le praséodyme, ce gisement est en cours d'évaluation.

d) Australie

Outre des sables de placers à monazite présents sur les côtes (*Eneabba* et *Capel* dans l'Ouest, *N Stradbroke Island* dans l'Est), trois gisements sont en cours de reconnaissance :

- **Mount Weld (Western Australia)** : gisement de bastnäsite (917000 t de minerai), qui a été exploité à depuis 2011 ; il s'agit d'une carbonatite latéritisée.
- **Nolans**, situé au NNW d'Alice Springs (Northern Territory), comportant un large filon subvertical, correspond à une zone broyée traversant un massif d'orthogneiss ayant un âge de 1800 Ma. La minéralisation consiste en une chérolite, minéral phosphaté voisin de la monazite, riche en thorium et cérium ; la teneur en oxydes de terres rares (cérium, néodyme, praséodyme, dysprosium, europium, terbium) est de 3,1%.
- **Dubbo Zirconia**, au NW de Sydney (New South Wales) a été découvert par une société productrice d'or. Une intrusion verticale de trachyte de 600 x 900 m, d'âge jurassique, contient de la bastnaesite avec cérium, yttrium, néodyme, praséodyme, samarium, ainsi que du tantale et du niobium.

e) Afrique du Sud

La mine abandonnée de *Steenkampskraal*, où le thorium a été exploité à partir de 1952, se trouve à 350 km au nord de Cape Town. Il s'agit d'un filon subvertical peu épais de pegmatite à monazite, d'âge mésoprotérozoïque (1100 Ma), une réouverture est envisagée.

f) Brésil

Des sables côtiers à monazite ont été exploités entre Rio de Janeiro et Bahia, aussi que les sables fluviaux dans l'intérieur.

g) Inde

De vastes étendues de sables côtiers (placers) sont connus dans les états de Kerala, Tamil Nadu et Orissa, avec une radioactivité provenant de leur teneur en thorium (9%) et uranium (0,3%). Ces sables ont été exploités jusqu'en 2004, l'Inde était alors le second producteur mondial, avec seulement 2,5%, puis l'extraction a cessé quand ils ne sont plus restés compétitifs devant la montée de la production chinoise ; il est prévu de reprendre l'extraction.

h) Malaisie

Une usine de concentration est installée à Kuantan en vue récupérer les terres rares contenues dans la monazite des rejets laissés par les importantes mines d'étain (cérium, lanthane, néodyme, praséodyme, samarium).

i) Ex-URSS

La mine de *Lovozero* dans le centre de la péninsule de Kola, est un complexe alcalin, riche en niobium, tantale, zirconium, minéraux rares et terres rares, spécialement la loparite. C'était la principale mine de l'URSS, qui fût ouverte en 1950, puis fermée de 1994 à 1999 après faillite. Profonde de 600 m et accompagnée de galeries, elle semble actuellement remise en service, produisant 10000 t/an, surtout de terres rares à lanthane et cérium. La production est traitée à Smolensk et en Lettonie.

A l'époque soviétique, un autre gisement a été découvert dans la péninsule de Kola, celui d'Africanda dans un petit massif d'ultrabasites, ainsi que des placers à monazite en Ukraine, et un autre gisement à *Kutessay* au Kirghizistan.

Au Kazakhstan: des accords de prospection de terres rares et d'uranium ont été attribués à deux compagnies japonaises, Sumitomo et Toshiba.

Mentionnons les pays qui n'ont jamais été producteurs de terres rares :

- **Groenland** : le complexe alcalin lité de *Kvanafjeld* dans le Sud de l'île est exploré et foré depuis 2007. Il mesure 17 x 8 km dont l'âge est de 1160 Ma ; en son coeur se trouvent des syénites néphéliniques appelées lujavites riches en uranium et zinc, avec des terres rares contenues dans un phosphosilicate.

- **Au Vietnam** : des permis d'exploration ont été attribués à une compagnie japonaise dans les montagnes du Nord (provinces de Lai Chau et autres) ; il s'agirait de zones broyées dans des marbres du Paléozoïque.
- **En France** : on ne connaît pas de gisement ; le BRGM participe au projet européen Promines lancé en 2009, destiné à localiser les ressources naturelles et les possibilités de recyclage.
Des sables à minéraux lourds, faiblement radioactifs, provenant du Massif Central et des Alpes par le Rhône, ont été signalés sur les plages de Camargue.
- **Le Japon**, gros consommateur de terres rares, ne dispose pas de gisements, mais s'efforce de palier aux restrictions chinoises à l'exportation par la récupération dans les déchets d'appareils, et l'obtention d'accords de prospection dans les pays du SE asiatique et au Kazakhstan.
En juillet 2011, une équipe de scientifiques japonais indique avoir trouvé une nouvelle réserve de terres rares dans **les eaux internationales du Pacifique**. Ce même groupe indique que cela peut porter le niveau réserve connue actuellement à environ 100 milliards de tonnes.
Cette même source indique que les réserves sont réparties sur 78 sites à des profondeurs de 3 500 à 6 000 mètres. Même si cette découverte est intéressante étant donné la demande grandissante de ces matériaux, son extraction pose des problèmes environnementaux importants. Une première expédition pour étudier les fonds marins de l'île Minamitori a été menée par la JAMSTEC en juin 2012, et une seconde en janvier 2013. Les chercheurs révèlent en mars que des échantillons de boues prélevés à 5 800 mètres de profondeur présentent une concentration de terres rares vingt à trente fois plus forte que dans les mines chinoises.
- **Madagascar**, le groupe allemand Tantalus Rare Earths a annoncé en 2012 la signature d'une lettre d'intention avec le chimiste français Rhodia pour octroyer à ce dernier un accès exclusif aux terres rares extraites d'un gros gisement à Madagascar.
Selon des données fournies par Tantalus après des forages exploratoires, le gisement découvert à Madagascar dans la région

d'Ampasindava (Nord-Ouest) recèlerait 130Mt d'argile latéritique contenant des terres rares à une concentration de 0,08%.

Il est prometteur car les métaux qui s'y trouvent semblent similaires à ceux exploités en Chine, selon l'entreprise. En particulier, parmi les métaux enfouis, 20% semblent être des terres rares lourdes, les plus recherchées et les plus difficiles à produire (Lagazette, 2012)



Figure I.6. Localisation des principaux gisements de terres rares en cours de développements hors Chine (BRGM, 2012)

I.4. Réserves et la production mondiale des terres rares

La quantité globale de ressources en terres rares n'est pas connue précisément. L'USGS (United States Geological Survey, Institut américain de cartographie) estime en 2011 que les réserves mondiales en oxydes de terres rares sont de l'ordre de 99 Mt.

La Chine est assise sur 36% des réserves mondiales de métaux rares, suivie de l'ex-Union Soviétique(22%), des États-Unis(13%) et de l'Australie(5%).

Selon la Cnuccd (Conférence des Nations Unies pour le Commerce Et le Développement), la Chine, premier producteur mondial de terres rares concentre la moitié des réserves mondiales.

La Russie et les autres pays de l'ex-Union Soviétique ont des réserves prouvées estimées globalement à 19 millions de tonnes métriques, contre 13 millions de tonnes métriques pour les Etats-Unis.

Parmi les pays en développement dotés de réserves figurent le Brésil, l'Inde, la Malaisie, l'Afrique du Sud, le Malawi, la Namibie, la Mauritanie, le Burundi, le Vietnam, la Thaïlande et l'Indonésie.

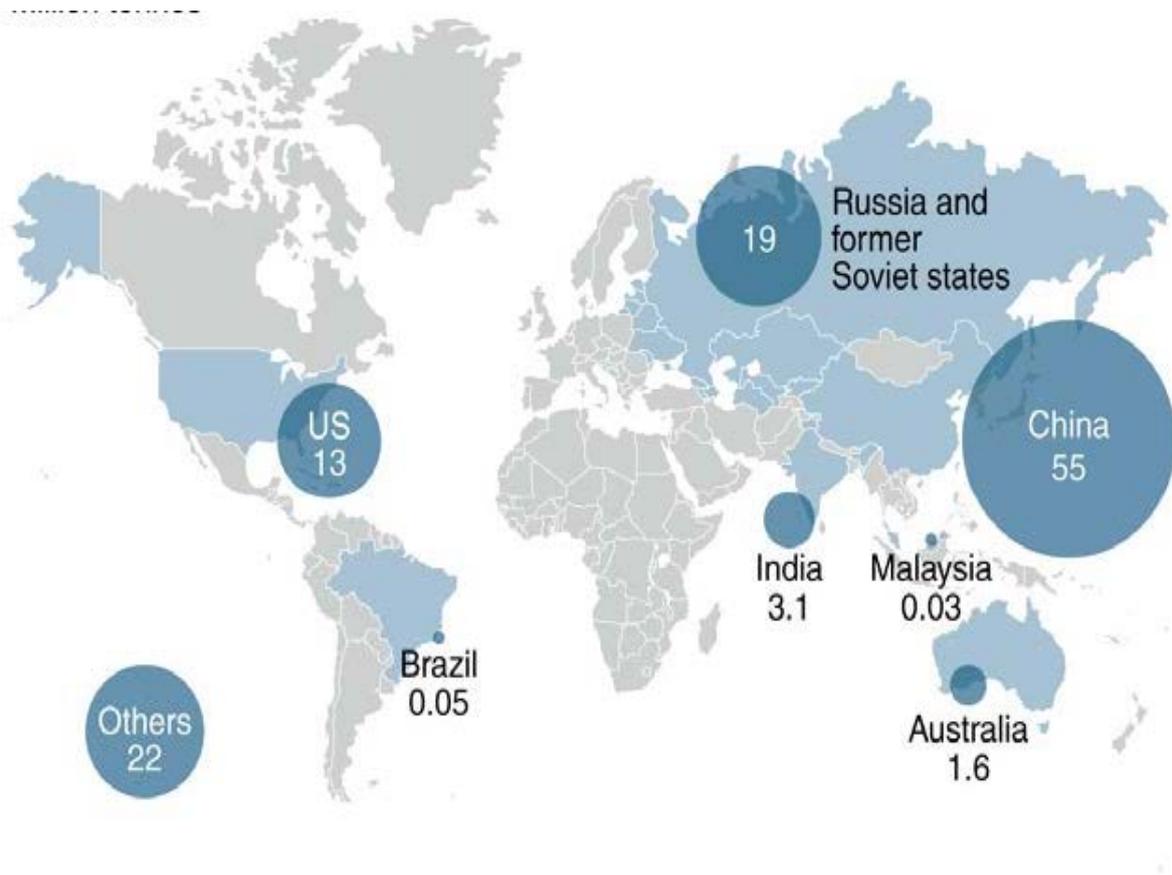


Figure I.7. Réserves mondiales de terres rares estimées en 2011 (Mt) (USGS)

Historiquement, l'Inde et le Brésil furent les premiers pays à produire des terres rares jusque dans les années 1940, lorsque l'Australie et la Malaisie ont commencé leurs productions.

Entre 1960 et 1980, des dépôts ont été exploités aux États-Unis, qui sont alors devenus les premiers producteurs mondiaux devant l'Australie.

Pendant les années 1980, la Chine s'est lancée dans la production, supplantant les États-Unis pour devenir le premier producteur mondial en 1988.

La Chine domine maintenant le marché mondial des terres rares, répondant à 96,8% des demandes d'approvisionnement. Les producteurs dans d'autres pays n'arrivent pas à rivaliser avec les coûts faibles des exportations chinoises.

La mine de Mountain Pass (Californie), est restée active jusqu'en 2002, mais a dû fermer suite à des problèmes environnementaux. Il en résulte qu'à l'heure actuelle, il n'y a pas de chantiers d'extraction de terres rares en dehors de la Chine, mis à part en Inde, au Brésil et en Malaisie.

S'il est estimé que des terres rares sont également produites en Indonésie, au Kazakhstan, en Corée du Nord et du Sud, au Kirgizstan, au Mozambique, au Nigéria, en Russie et au Vietnam, la production de l'ensemble de ces pays ne représente qu'une très faible proportion des 126.000 t de terres rares produites mondialement en 2008 (4% d'augmentation par rapport à 2007), représentant un marché global, avant traitement des produits, de l'ordre de 1,25 Md\$.

La production mondiale a augmentée de 50% au cours des 15 dernières années, en passant de 89 mille tonnes au début des années 2000 à plus de 133 mille tonnes aujourd'hui.

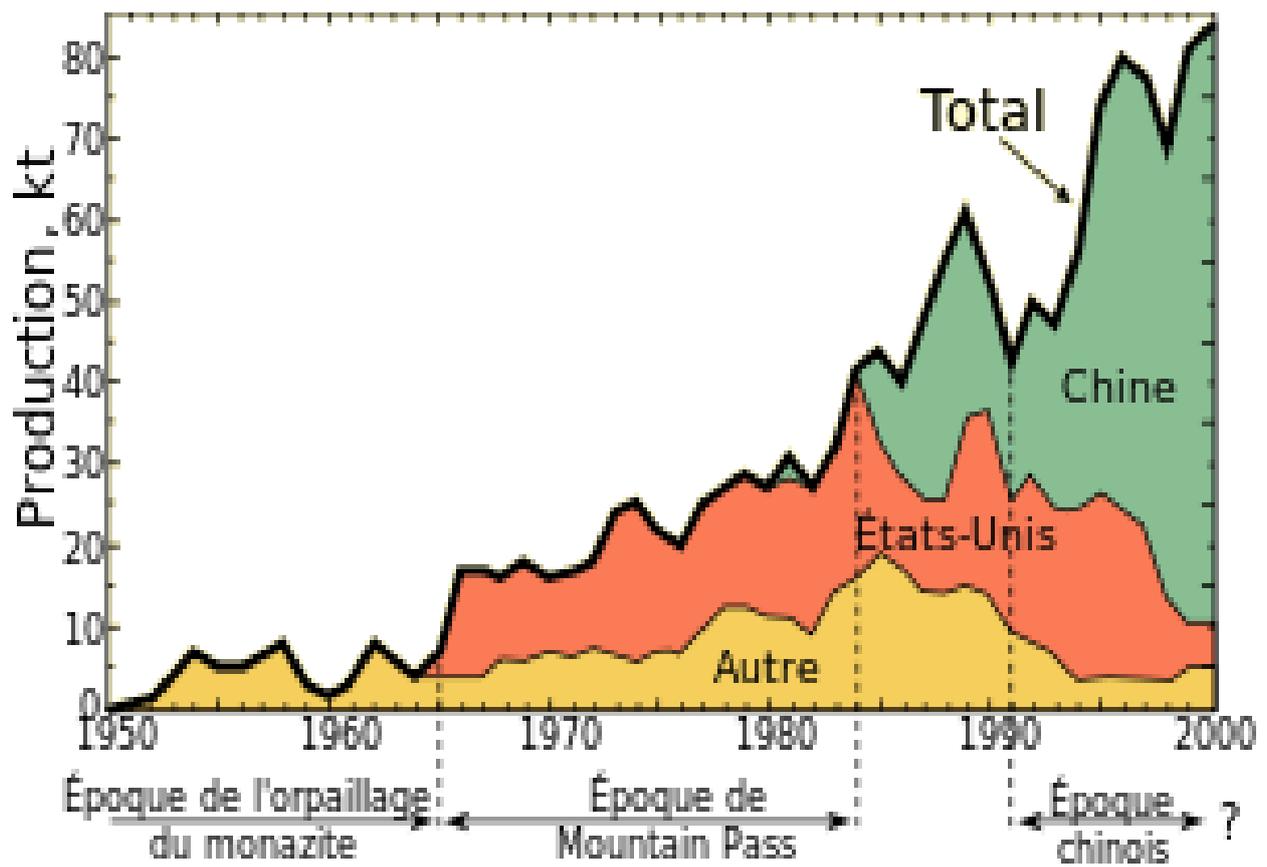


Figure I.8. Production mondiale de terres rares de 1950 à 2000 (USGS, 2002)

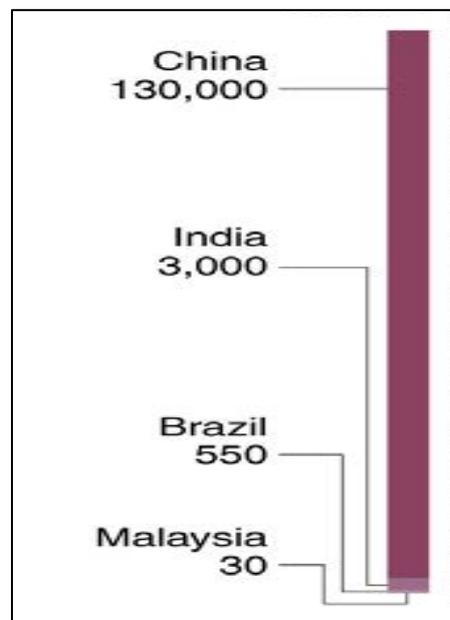


Figure I.9. Production mondiale actuelle de terres rares (en tonnes)

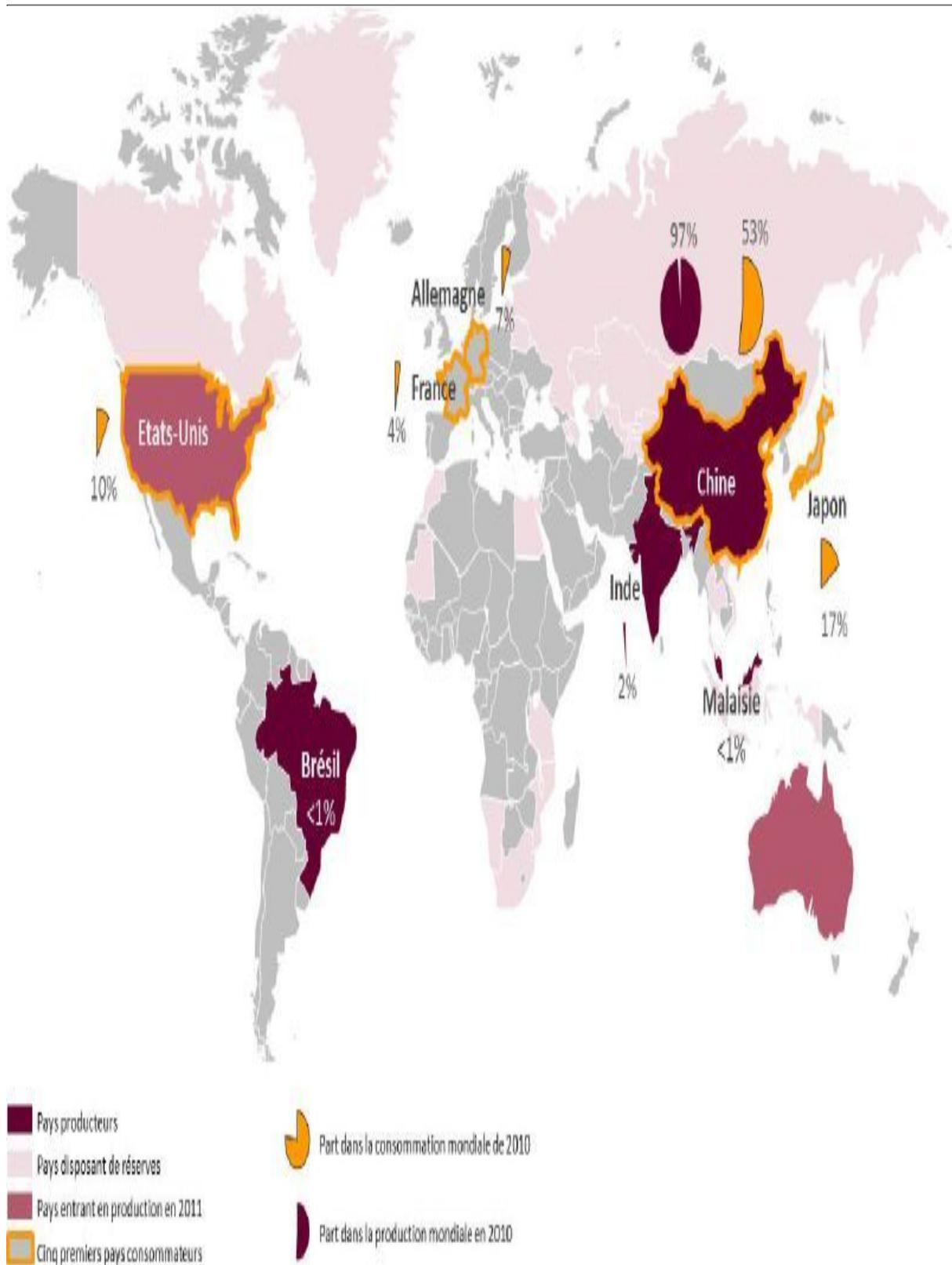


Figure I.10. Pays producteurs, consommateurs et qui disposent des réserves (SIA Conseil, 2012)

I.5. Offre et demande

Comme dans tous les marchés, les principes fondamentaux de base de l'offre et la demande dictent les prix actuels en vigueur. La demande est en dépendance croissante vis à vis des nouvelles technologies de la part de nos économies, associées au quasi monopole de la Chine et à des coûts d'extraction toujours de plus en plus onéreux.

Les États-Unis et le Japon, les deux plus gros consommateurs de terres rares, ont ouvertement exprimé leurs grandes inquiétudes concernant la diminution des approvisionnements et les prix exorbitants atteints par ces métaux stratégiques.

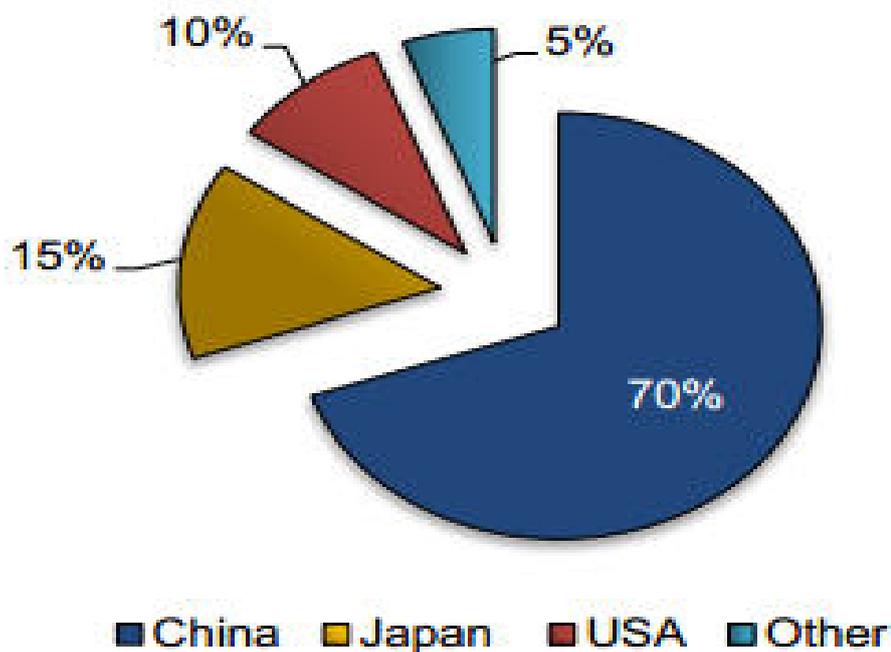
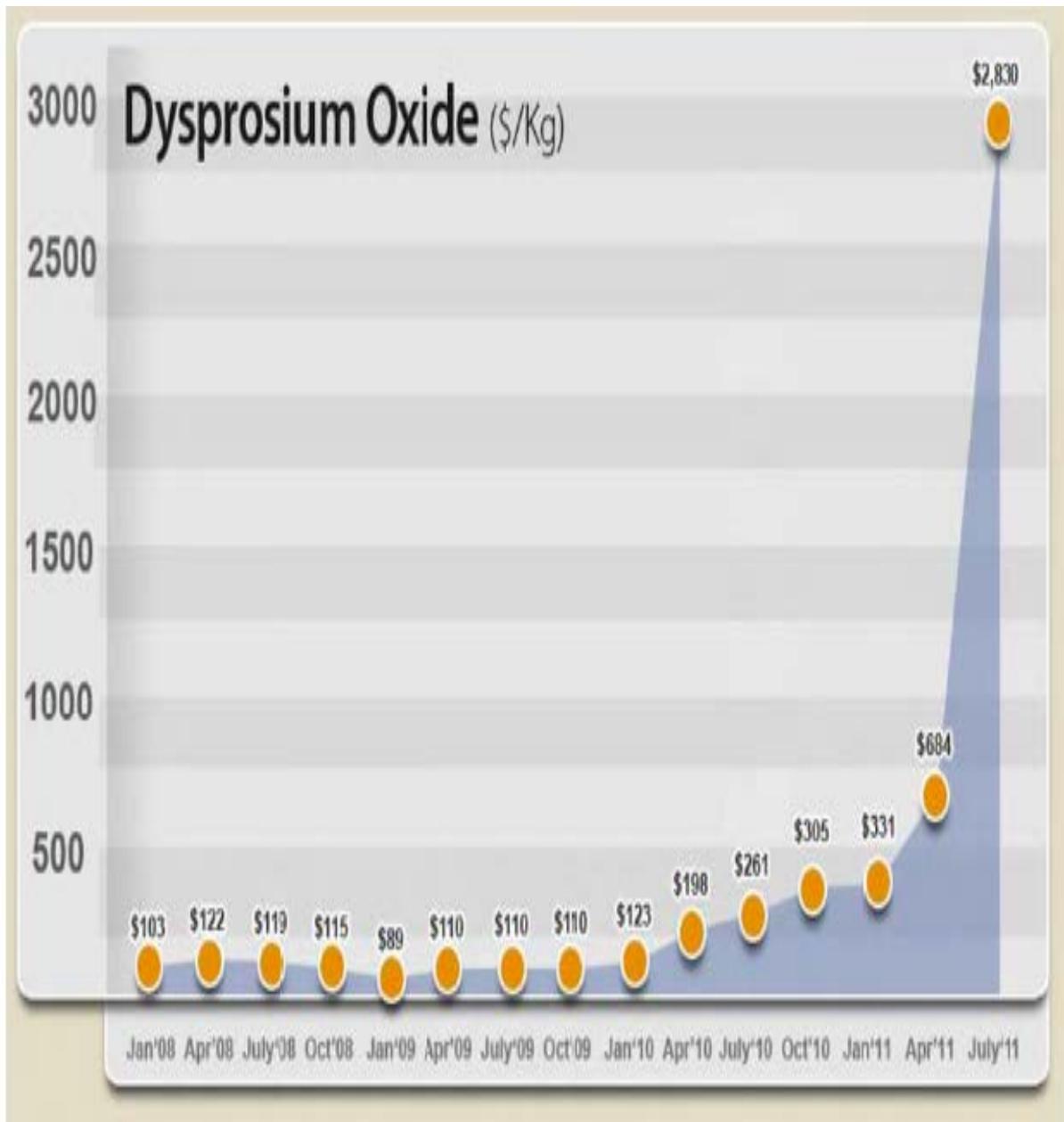


Figure I.11. La demande en terres rares en 2013 (Roskill)

En 2011, les prix de certaines terres rares ont doublé en deux semaines et ont augmenté de plus de 300% pour d'autres. Dans un environnement mondial de plus en plus concurrentiel, de plus en plus dépendant de nouvelles technologies reposant essentiellement sur les terres rares, la Chine utilise sa position de monopole.



en US\$/kg, FOB Chine, période 01-2008 – 07-2011

Figure I.12. Exemple d'augmentation des prix de terres rares (Le cas de dysprosium)

Plusieurs aspects du marché actuel des terres rares se conjuguent pour créer un parfait déséquilibre entre l'offre et la demande. La croissance exponentielle de la demande de ces matériaux face à une production lente, difficile et écologiquement contraignante, associée à un marché qui n'est absolument pas préparé, constituent un ensemble de défis qui demandent des mesures réfléchies pour être surmontés.

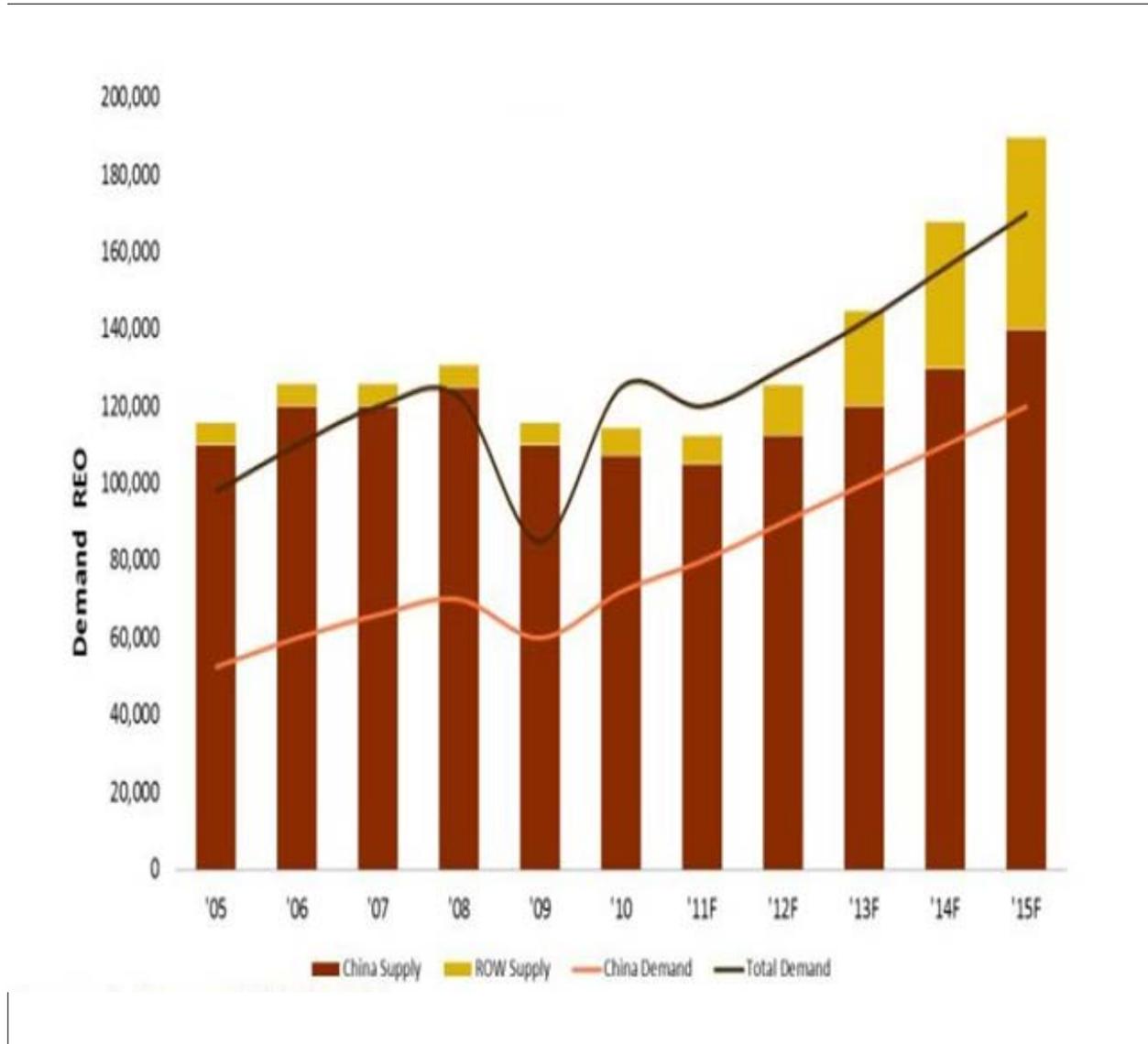


Figure I.13. L'offre et la demande mondiale des terres rares (2005-2015) (IMCOA, 2011)

Des applications différentes et est produit en quantités variables. Ainsi, certaines terres rares seront offertes en faible quantité, tandis que d'autres seront offertes en trop grande quantité, selon les facteurs fondamentaux de l'offre et de la demande des marchés.

Les segments de marché ayant la plus forte croissance sont les aimants permanents, les piles rechargeables et les phosphores, surtout en raison de leur application dans les segments à forte croissance de l'énergie verte et de la haute technologie.

En 2010, le département américain de l'Énergie a établi les cinq éléments des terres rares critiques dans ces marchés qui seront offerts en faible quantité. Quatre d'entre eux sont des terres rares lourdes. Le ministre chinois du Commerce a indiqué que les terres rares lourdes de la Chine seront épuisés d'ici 15 à 20 ans

**Tableau I.3. Pénurie/excédent de l'offre mondiale prévu pour 2015 (+/- 15 %)
(IMCOA, 2011)**

Élément	Tonnes	Etat de l'offre projetée à 2015
Lanthane	1,450	/
Cérium	21,475	/
Praséodyme	1150	/
Néodyme	400	insuffisance
Samarium	3,150	/
Europium	200	insuffisance
Gadolinium	825	/
Terbium	105	insuffisance
Dysprosium	1,500	insuffisance
Erbium	25	insuffisance
Yttrium	200	insuffisance
Ho-Tm-Yb-Lu	1,180	/

Si le prix des terres rares reste encore largement au-dessus des records atteints en 2011, l'année 2012 a été catastrophique pour la Chine. Le pays réalise plus de 90 % de la production mondiale de ces 17 métaux prisés par l'industrie et les hautes technologies. Leurs prix se sont encore effondrés en 2013.

Ainsi, le néodyme a perdu 45 % de son prix, le cérium a chuté de 38 %, le terbium de 46 % et le dysprosium de 65 %. La crise qui touche les principaux consommateurs (industrie automobile, électronique, éolien...) n'explique pas tout, même si la demande de terres rares ne cesse de baisser. La flambée des prix en 2011 (le cours du terbium a par exemple été multiplié par 9...) a provoqué un véritable électrochoc.

D'abord du point de vue de l'offre et face au quasi-monopole de la Chine, des pays ont relancé l'exploration et ont réouvert d'anciennes mines.

L'australien Lynas prévoit ainsi la mise en route l'an prochain d'un nouveau centre de production en Malaisie, le plus important situé hors de Chine avec un objectif de production de 22.000 tonnes annuelles.

De son côté, l'américain Molycorp a redonné vie à la mine de Mountain-Pass en Californie, fermée en 2002. Un investissement de 1,25 milliard de dollars, deux fois supérieur aux prévisions, pour 19.000 tonnes de terres rares en rythme annuel.

A terme, ces deux projets devraient représenter 25 % de la production mondiale.

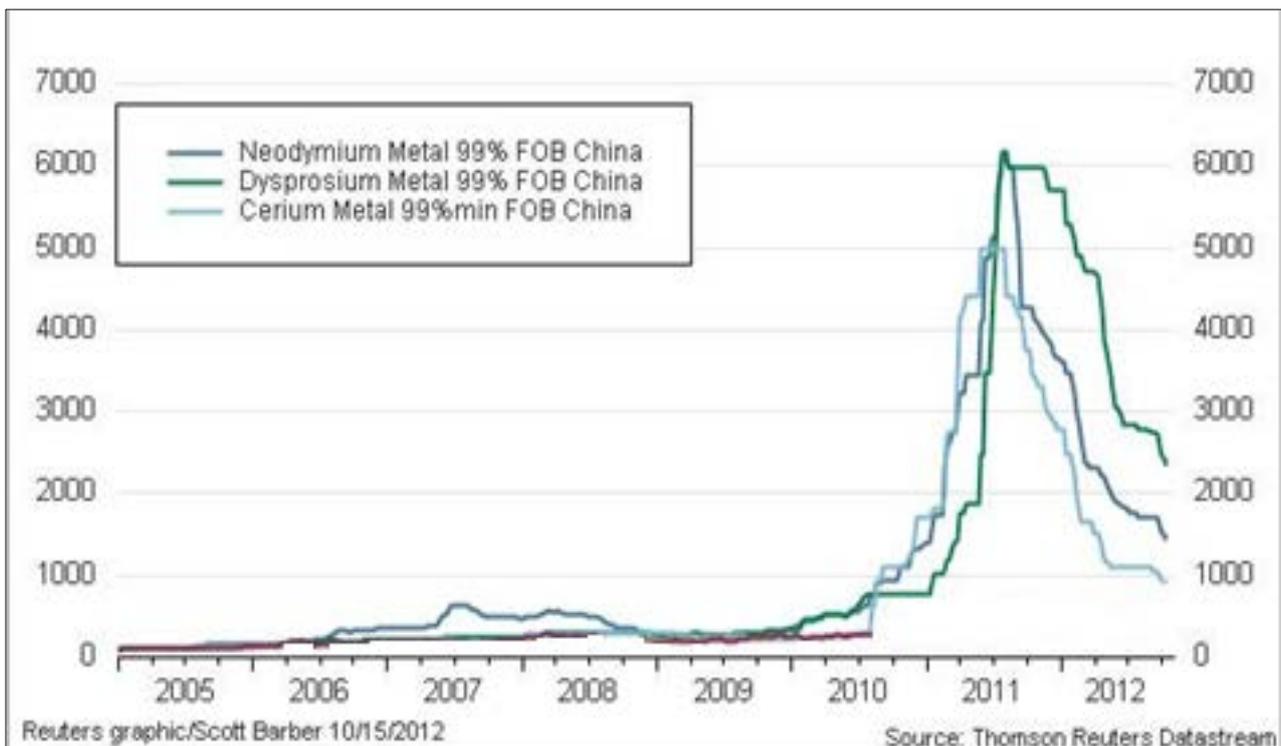


Figure I.14. Prix de quelques éléments de terres rares en \$

CHAPITRE II
LES GISEMENTS DES
TERRES RARES

Introduction

Les terres rares sont présentes à l'état naturel dans un large éventail d'environnements géologiques (Maggy Heintz, 2011), on les retrouve dans plusieurs types de gisements, aussi bien dans des roches sédimentaires qu'ignées ou métamorphiques.

II.1. Types de gisements

On distingue plusieurs types de gisements de terres rares :

- a. les gisements associés aux carbonatites ;
- b. les gisements associés aux complexes intrusifs peralcalins ;
- c. les gisements associés aux formations de fer (type fer-oxydes) ;
- d. les gisements associés à des dépôts alluviaux (placers) ;
- e. les gisements associés à des veines métasomatiques ;
- f. les gisements associés aux complexes intrusifs hyperalcalins.

II.1.1. Gisements associés aux carbonatites

De nombreuses carbonatites sont enrichies en minéraux de terres rares (Orris et Gauch, 2002). Ces carbonatites forment des massifs intrusifs de petites dimensions (3 à 5 km) à l'intérieur des complexes alcalins. Elles sont enrichies principalement en terres rares légères (Castor, 2008). La minéralisation en terres rares se trouve au cœur de la carbonatite ou dans des filons, des réseaux de veines ou d'amas à l'extérieur de la carbonatite.

Les minéralisations en terres rares des gisements de Mountain Pass, Bear Lodge (États-Unis), Bayan Obo (Chine), Palabora (Afrique du Sud) ainsi que d'Oka et de Saint-Honoré (Canada) sont encaissées dans des intrusions de carbonatite (Énergie et ressources naturelle Québec,).

II.1.2. Gisements associés aux complexes intrusifs peralcalins

Plusieurs dépôts sont associés à des roches ignées peralcalines (granite, pegmatite granitique, syénite). Ce sont des gisements de gros volumes, mais de faible teneur (Orris et Gauch, 2002). Ils sont, en général, enrichis en terres rares lourdes comme l'yttrium et le zirconium (Richardson et Birkett, 1996) et certains dépôts peuvent renfermer du béryllium, du niobium et du tantale.

Les gisements de terres rares associés aux roches ignées peralcalines sont notamment ceux de Thor Lake (Territoires du Nord-Ouest, Canada), Lackner Lake (Ontario, Canada), Strange Lake et Kipawa (Québec Canada) ainsi que ceux de Mountain Pajarito (États-Unis) (Énergie et ressources naturelle Québec).

II.1.3. Gisements associés aux formations de fer (type fer-oxydes)

Des minéralisations en cuivre-or-oxydes de fer [gisement de type fer-oxydes (IOCG)] contiennent aussi des terres rares, de l'yttrium et de l'uranium (Orris et Grauch, 2002; Jébrak, 2008). Ces gisements hydrothermaux, riches en magnétite, sont souvent associés au magmatisme felsique. Les terres rares sont exploitées à titre de sous-produits de l'extraction du fer, du cuivre et de l'or.

Les minéralisations en terres rares associées aux formations de fer comprennent les gisements Olympic Dam (Australie), Bayan Obo (Chine), Salobo (Brésil), Pea Ridge (Missouri, États-Unis), Kwyjibo (Québec, Canada) (Énergie et ressources naturelle Québec).

II.1.4. Gisements associés à des dépôts alluviaux (placers)

Des concentrations à caractère économique de terres rares peuvent se trouver dans des dépôts alluviaux. La plupart de ces dépôts sont d'âge tertiaire ou quaternaire. Ils sont issus de la dégradation de roches granitiques ou de roches métamorphiques de haut grade et de la concentration des minéraux lourds. Des placers d'âge précambrien contiennent aussi des minéralisations en terres rares (Orris et Grauch, 2002).

En certains endroits, le minerai de terres rares est exploité comme sous-produit de l'extraction de minerais d'ilménite et de zircon (Klime et al, 1953).

Les minéralisations en terres rares associées aux placers comprennent entre autres les dépôts d'Oak Grove (Idaho, États-Unis), de Hilton Head Island (Caroline, États-Unis), d'Elliot Lake et de Bald Mountain (Ontario, Canada). (Énergie et ressources naturelle Québec)

II.1.5. Gisements associés à des veines métasomatiques

Des minéralisations en terres rares se trouvent également dans des réseaux de veines (stockWorks) qui recoupent des roches alcalines (Castor 1991 ; Jackson et Christiansen, 1993;). Dans certains cas, il s'agit de veines d quartz-carbonate-fluorite-parisite d'origine hydrothermale (Metz et al, 1985) tandis que, dans d'autres cas, ce sont des veines de roches ultramafiques ou des dykes de lamprophyre (Harvey et al, 2002). Les minéralisations sont en général, enrichies en terres rares légères et en yttrium.

Les minéralisations en terres rares associées aux veines sont notamment celles de Lemhi Pass et de Powderhorn (États-Unis) et d'Hoidas Lake (Saskatchewan, Canada). Au moins deux mines associées à des veines de baestnasite-barite-carbonate dans une syénite à quartz sont connues en Chine (Énergie et ressources naturelle Québec).

II.1.6. Gisements associés aux complexes intrusifs hyperalcalins

Les complexes intrusifs hyperalcalins (syénite à néphéline, syénogabbro, phonolite) peuvent renfermer des éléments de terres rares comme substances économiques principales, mais aussi afficher des teneurs intéressantes en tantale et en niobium (McCreath et al, 2007).

La minéralisation en tantale-niobium et terres rares du gisement de Motzfeldt Centre, dans le sud du Groenland, est un cas typique de minéralisations associées aux complexes intrusifs hyperalcalins (Énergie et ressources naturelle Québec).

Ainsi, les gisements d'ÉTR se divisent en gîtes primaires (carbonatites, veines, et famille Fe-Ox) et secondaires (gisements résiduels associés aux carbonatites, placers et paléoplacers) (Sidex, 2001).

Tableau II.1. Caractéristiques de deux types de gîtes primaires des terres rares.
(Sidex)

	<i>Carbonatites à ÉTR</i>	<i>Fe-Ox polymétallique (type Olympic Dam)</i>
GÉOLOGIE		
Contexte tectonique	Généralement zones intra-plaques, parfois bordures de plaques (orogènes ou rifts)	Contextes tardiorogéniques à postorogéniques dans craton ou marge continentale; extension ou transtension
Âge	Quatre grandes périodes: (a) 1800-1550 Ma (orogénie hudsonienne); (b) ~1100 Ma (orogénie grenvillienne); (c) 750-500 Ma (orogénie calédonienne précoce); (d) <200 Ma (fragmentation de la Pangée)	Protérozoïque (<1.9 Ga) à Holocène
Intrusions associées		
Chimie/ Minéralogie	Carbonatites: >50% carbonates (calcite, dolomite, ankérite, carbonates sodiques/potassiques), + pyroxènes sodiques, amphiboles, phlogopite, apatite, olivine et minéraux rares/exotiques, contenant F, Nb, Ta, Th, ÉTR, U, V ou Zr; origine mantellique; spectres ÉTR à forte pente; anomalies Eu mineures/absentes; phases intermédiaires/ tardives souvent enrichies en pyrochlore (Nb); phases très tardives peuvent renfermer ÉTR	Complexes alcalins intermédiaires; rapakivi, diorites granites
Taille	Massifs intrusifs de petites dimensions (3-5 km de diamètre) à l'intérieur de complexes alcalins	Intrusions pas toujours évidentes ou présentes
Roches encaissantes		
Lithologie	Encaissant du complexe alcalin (contenant la carbonatite): pas important	Sédiments, volcanites et intrusions (felsiques à intermédiaires), roches métamorphiques; tous niveaux de métamorphisme

Altération	Auréoles de fénitisation (autour du complexe alcalin): perte de SiO ₂ , ajout de Fe ³⁺ , Na et K; concentrations anormales de terres rares légères, éléments lithophiles à grand rayon ionique et autres éléments incompatibles	Les grands gisements sont associés à de vastes systèmes hydrothermaux; altération en magnétite, hématite, chlorite, épidote, carbonates, albite
Minéralisation		
Site et forme	Gîtes magmatiques: ÉTR au cœur de la carbonatite; gîtes métasomatiques: filons, stockwerks ou amas de remplacement à l'extérieur de la carbonatite (filons et dykes)	Brèches/diatrèmes près de la surface, remplacements dans certains horizons, structures filoniennes, pegmatites, skarn à fer près de l'intrusion en profondeur (voir figure)
Minéralogie	Pyrochlore, fluorocarbonates ou phosphates de terres rares (bastnaésite, parisite, monazite), apatite; gangue de calcite, dolomite, strontianite, quartz, barytine, hématite, magnétite, zircon, allanite, ...	Terres rares légères dans florencite, bastnaésite, monazite; terres rares lourdes et yttrium: substitution cationique dans uraninite et coffinite; sulfures = chalcopryrite, pyrite, parfois bornite, chalcosine hypogène, avec Au; oxydes de fer abondants (hématite, magnétite); parfois fluorine
Exemples		
Étrangers	<ul style="list-style-type: none"> - Mountain Pass (Californie, É.-U.): 91 Mt à 5% d'oxydes d'ÉTR; - Palabora (Afrique du Sud): 2,16 Mt d'oxydes d'ÉTR (minerai de Cu-Nb-P-Fe-Zr-Ni-U-Au-Ag-platinoïdes); - Bayan Obo (Mongolie Intérieure, Chine): 48 Mt d'oxydes d'ÉTR (teneur moy. 6%), 1,5 Gt de fer (teneur moy. 35%) et 1 Mt de niobium (teneur moy. 0,13%); - aussi Afrique (Burundi, Kenya, Tanzanie, Zambie) et Brésil 	<ul style="list-style-type: none"> - Olympic Dam (Australie): 2 Gt à 1,6% Cu, 0,06 kg/t U₃O₈, 3,3 g/t Ag et 0,6 g/t Au; 5 000 ppm ÉTR dans les roches riches en hématite; - Salobo (Brésil): 789 Mt à 0,96% Cu, 0,52 g/t Au (anomalies en Ag, U, Co, As, Mo, F, terres rares légères); - Pea Ridge (Missouri, É.-U.): xénotime et monazite dans pipes bréchiques; - Palabora et Bayan Obo (voir ci-contre)

EXPLORATION		
Géologie	Topographie: forme annulaire reflète petit complexe alcalin (<50 km ²) aux flancs abrupts; réseau de drainage radial et concentrique à cause des fractures associées à la carbonatite	Majorité des placers à monazite situés le long des côtes (sable de plage); source des minéraux de terres rares = roches granitiques ou de haut grade métamorphique
Géochimie	1- Dans carbonatites, tracer contacts des phases intrusives, échantillonner systématiquement pour Nb, ÉTR, P, U et F; 2- phases enrichies en ÉTR ont faibles teneurs en P, Ti, Zr et Nb par rapport phases plus précoces; 3- pyrochlore et monazite détectables dans concentrés minéraux lourds (sols, ruisseaux)	Valeurs anormales en Cu, Au, U, Ag, Ce, La, Co, P, F, Ba, Sr, ÉTR

Tableau II.2. Caractéristiques de deux types de gîtes secondaires des terres rares (Sidex)

	<i>Gîtes résiduels associés aux carbonatites</i>	<i>Placers à monazite</i>
GÉOLOGIE		
Âge	Voir âges des carbonatites (gîte résiduel plus jeune que gîte primaire)	Placers en exploitation: Holocène et fin du Tertiaire
Géochimie	Une fois complexe alcalin avec sols résiduels identifié, utiliser sols/sédiments de ruisseaux (ÉTR, Nb, Ti, P) et minéraux lourds dans sols (anastase, pyrochlore, monazite) pour délimiter zones de minéralisation (ne fonctionne pas si bruit de fond élevé (p. ex. plusieurs petites carbonatites)	Analyser dépôt de sable potentiel pour Ti, Zr, ÉTR
Minéralogie	Pendant altération de surface, calcite, dolomite et apatite dissoutes, et ÉTR remobilisés dans monazite supergène; si altération latéritique très poussée : pyrochlore => florencite et pérovskite => anastase	La monazite (++) , xénotime (+) et anastase (-) contiennent ÉTR; autres minéraux lourds: ilménite, zircon et rutile (économiques) + magnétite, staurotide et grenat (non exploités)
Genèse	Carbonatites affleurantes en milieu tropical humide à pluviosité élevée (ex. bassin de l'Amazone) peuvent se dégrader suffisamment pour former accumulations exploitables de P, Nb, Ti et ÉTR suite à périodes prolongées de météorisation; conditions favorables = absence de système karstique et topographie en forme de bassin	Monazite, xénotime, et anastase = minéraux denses, résistants à altération et transport; accumulations dans sédiments fluviaux, lacustres et deltaïques, mais surtout dans dépôts de dunes et de sables de plage

Exemple		
Étrangers	<ul style="list-style-type: none"> - Lac Martison (Ontario): 57 Mt à 0,4% d'oxydes d'ÉTR; - Tomtor (Russie): centaines de Mt à 3,9% d'oxydes d'ÉTR, 12% P₂O₅ et 0,74% Nb₂O₅; - Mount Weld (Australie): 15,4 Mt à 11,2% d'oxydes d'ÉTR+Y₂O₃; - Araxá (Brésil): 495 kt à 10-11% d'oxydes d'ÉTR 	<p>Australie, Brésil, Inde, Sri Lanka, Malaisie, Chine, Indonésie, Corée, É.-U. (Floride), Afrique du Sud.; monazite (<0,1% dans le sable minéralisé) récupérée comme sous-produit de l'exploitation de Ti-Zr ou Sn, sauf pour gisements brésiliens</p>
EXPLORATION		
Géologie	<p>Topographie: forme annulaire reflète petit complexe alcalin (<50 km²) aux flancs abrupts; réseau de drainage radial et concentrique à cause des fractures associées à la carbonatite</p>	<p>Majorité des placers à monazite situés le long des côtes (sable de plage); source des minéraux de terres rares = roches granitiques ou de haut grade métamorphique</p>
Géochimie	<p>Une fois complexe alcalin avec sols résiduels identifié, utiliser sols/sédiments de ruisseaux (ÉTR, Nb, Ti, P) et minéraux lourds dans sols (anastase, pyrochlore, monazite) pour délimiter zones de minéralisation (ne fonctionne pas si bruit de fond élevé (p. ex. plusieurs petites carbonatites)</p>	<p>Analyser dépôt de sable potentiel pour Ti, Zr, ÉTR</p>
Géophysique	<p>Anomalie radiométrique d'intensité élevée (10-20 fois bruit de fond) coïncidant possiblement avec :</p> <p>(1) anomalie magnétique positive, forme circulaire et fort gradient (sauf si magnétite déstabilisée par altération hydrothermale tardive)</p> <p>Ou</p> <p>(2) anomalie gravimétrique si sols résiduels épais et de densité différente</p>	<p>Sondages sismiques et forage peuvent être utilisés pour déterminer épaisseur des dépôts</p>

II.2. Minerais de terres rares

Deux minéraux en premier ordre dominent la production historique et actuelle de terres rares légères: la monazite et la Bastnäsite, on deuxième ordre on trouve la loparite. Les concentrés de monazite contiennent 55-60% de terres rares, 3-10% de thorium, un peu d'yttrium et un peu d'uranium. La Bastnäsite possède davantage de terres rares, sans thorium ni yttrium (Sidex).

II.2.1. Monazite

Son nom vient d'un mot grec, *monazein* qui signifie "être seul" car ses cristaux se trouvent isolés sur la roche ou un autre minéral, est un minéral primaire de plusieurs métaux de terres rares, notamment du thorium, de cérium et de lanthane.

Trouvée dans les pegmatites phosphatées et en état de trace dans nombreuses roches ignées et métamorphiques, les cristaux de la monazite peuvent être altérés à partir de leur roche mère et transportés vers l'aval de grandes distances et s'accumulent dans les dépôts fluviaux et même dans les dépôts de plage de l'océan. La radioactivité de la monazite a été utilisée comme une aide à la datation radioactive.

La monazite est en fait trois minéraux différents, mais en raison d'un manque de grandes différences entre eux, ils sont désignés comme un seul minéral. Les trois monazites ont des différences dans les pourcentages de leur composition chimique et ces différences se reflètent dans leurs noms respectifs (galleries)

Tableau II.3. Teneurs des principaux minerais de terres rares

NOM:	FORMULE:
Monazite- (Ce)	$(Ce, La, Nd, Th, Y) PO_4$
Monazite- (La)	$(La, Ce, Nd) PO_4$
Monazite- (Nd)	$(Nd, La, Ce) PO_4$

L'exploitation se fait dans les sables de plages, en Australie, Inde, Brésil, Malaisie... (Société Française de Chimie)



Figure II.1. La monazite (galleries)

Les caractéristiques physiques de la roche:

- **Couleur** : jaune au brun ou brun-orange ;
- **Eclat** : vitreux, résineux ou diamant ;
- **Transparence**: les échantillons sont translucides à opaques, mais de petits cristaux peuvent être transparents ;
- **Système cristallin** : monoclinique ;
- **Clivage** : parfait dans un sens, pauvres dans plusieurs autres directions ;
- **Fracture** : inégale à conchoïdale ;
- **Dureté** : varie de 5 à 5,5 ;
- **Densité** : est d'environ 4.6 à 5.7 (lourd pour les minéraux translucides) ;
- **Trait**: est blanc.
(galleries)

II.2.2. Bastnäsite

Son nom vient de sa localité-type, Mine Bastnäs, Riddarhyttan, Västmanland, Suède. Bien qu'un minéral rare et jamais dans de grandes concentrations, il est très répandue et l'une des carbonates de terres rares les plus courantes, est un fluorocarbonate [(TR)FCO₃] à forte teneur en terres cériques et relativement en europium (galleries).

La bastnäsite a été trouvée en gisements de bauxite karstiques en Hongrie, en Grèce et dans les Balkans ;

On la trouve aussi dans les carbonatites, un carbonate rare des roches intrusives, à Fen, Norvège ; Bayan Obo, en Mongolie ; Kangankunde, Malawi ; Kizilcaoren, la Turquie et Mountain Pass, en Californie, USA. À Mountain Pass, la bastnäsite est le principal minéral du minerai ;

Certains bastnäsites ont été trouvés dans les granites au Norvège ; Dépôts Thor Lake, Territoires du Nord-Ouest, au Canada (galleries).

Exploitée en Chine (sous-produit d'une mine de fer, à Bayun Obo, Mongolie Intérieure) et aux États-Unis (Mountain Pass, en Californie) (galleries).

Aux États-Unis, le minerai de 7 à 10 % de teneur initiale est enrichi à environ 60 %, par flottation (Société Française de Chimie).

Bastnäsite contient le cérium, le lanthane et l'yttrium dans sa formule généralisée mais officiellement le minéral est divisé en trois minéraux dont Il n'y a pas une grande différence entre les trois en termes de propriétés physiques, les trois types sont :

a) Bastnäsite-(Ce) [(Ce,La)CO₃F]



Figure II.2. La bastnäsite-(Ce) (dakotamatrix)

b) Bastnäsité-(La) $[(La,Ce)CO_3F]$ **Figure II.3. La bastnäsité-(La) (dakotamatrix)****c) Bastnäsité- (Y) $[(Y,Ce)CO_3F]$** **Figure II.4. La bastnäsité-(Y) (dakotamatrix)**

Les caractéristiques physiques de la roche:

- **Couleur** : pâle blanc, beige, gris, brun, jaune et rose ;
- **Eclat** : nacré, vitreux, gras à terne ;
- **Transparence**: Les cristaux sont translucides à opaques ;
- **Système** : cristallin est hexagonal ;
- **Le clivage** : distinct dans un sens (de base) et pauvres dans trois directions (prismatiques) ;
- **Fracture** : inégale ;
- **La dureté** : entre 4 à 4,5 ;
- **Densité** : varie de 4,7 à 5,0 (bien supérieur à la moyenne) ;
- **Trait** : blanc. (galleries).

II.2.3. Loparite-(Ce)

Niobiotitanate de terres rares $[(Na, Ce, Ca, Sr, Th) (Ti, Nb, Fe) O_3]$ présent en Russie, dans la péninsule de Kola. Les concentrés obtenus titrent environ 32 % de terres rares, surtout cériques. (Société Française de Chimie, mindat)

- ✓ **Couleur** : noir à gris sombre.
 - ✓ **Trace** : brun.
 - ✓ **Morphologie des cristaux** : cubique.
- (Philippe ROSSI, 2014)



Figure II.5. Loparite-(Ce) (mindat)

Tableau II.4. Teneurs des principaux minerais de terres rares. (Société Française de Chimie)

Oxydes de TR, Th et U	Formule	Teneur de l'écorce terrestre (en ppm)	Concentrés miniers (teneurs* en %)		
			Monazite	Bastnaésite	Loparite
Total oxyde de TR		150	~ 60	60-70	~ 32
Lanthane	La_2O_3	18	24	32	28
Cérium	CeO_2	46	46	49	57
Praséodyme	Pr_6O_{11}	5,5	5	4	4
Néodyme	Nd_2O_3	24	17	13,5	9
Samarium	Sm_2O_3	6,5	2,5	0,5	0,9
Europium	Eu_2O_3	0,5	0,05	0,1	0,1
Gadolinium	Gd_2O_3	6,4	1,5	0,3	0,2
Terbium	Tb_4O_7	0,9	0,04	0,01	0,07
Dysprosium	Dy_2O_3	5	0,7	0,03	0,09
Holmium	Ho_2O_3	1,2	0,05	0,01	0,03
Erbium	Er_2O_3	4	0,2	0,01	0,07
Thulium	Tm_2O_3	0,4	0,01	0,02	0,07
Ytterbium	Yb_2O_3	2,7	0,1	0,01	0,3
Lutétium	Lu_2O_3	0,8	0,04	0,01	0,05
Yttrium	Y_2O_3	28	2,4	0,1	0,15
Thorium	ThO_2	10	6,7	0,35	0,65
Uranium	U_3O_8	4	0,3	< 0,05	

La production de terres rares lourdes provient principalement du Xénotime.

II.2.4. Xénotime :

Un minéral présent dans les roches granitiques et les placers dérivés.

Deux minéraux portent le nom de xénotime, ce sont :

a) Le Xénotime-Yttrium [$Y(PO_4)$]



Figure II.6. Xénotime-Yttrium (mindat)

b) Le xénotime-Ytterbium [(Yb, Y, ROIS) (PO₄)]

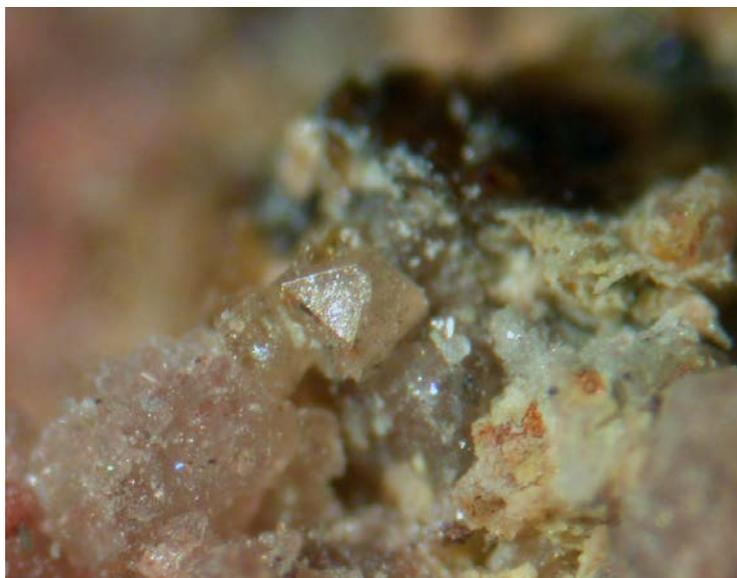


Figure II.7. Xénotime-Ytterbium (mindat)

Les autres ressources de terres rares exploitables sont :

- ✓ L'apatite $Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$,
- ✓ La chérialite $(Ca, Ce)(Th, Ce)(PO_4)_2$,
- ✓ L'eudialyte
 $Na_{15}Ca_6(Fe, Mn)_3Zr_3SiO(O, OH, H_2O)_3(Si_3O_9)_2(Si_9O_{27})_2(OH, Cl)_2$,
- ✓ Les phosphorites $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(OH, F, Cl)_2$,
- ✓ Les argiles à terres rares (adsorption ionique),
- ✓ Les rejets de solutions d'uranium.

CHAPITRE III
LES TERRES RARES EN
ALGERIE

Introduction

La terre algérienne, si généreuse, n'a pas encore livré tous ses trésors enfouis qu'elle cache précieusement au fond de ses entrailles. En plus du pétrole et du gaz, d'autres matériaux viennent s'ajouter à cette richesse inestimable, néanmoins inexplorée. Même les efforts consentis ne sont pas toujours suffisants pour découvrir les lieux où sont enfouis ces produits, qui interviennent dans différents domaines.

III.1. Les gisements algériens

L'Algérie, qui couvre 2 381 741 km², peut être divisée en cinq grandes régions géologiques, de par leur étendue et le contenu de leurs gisements.

La région géologique du Nord de l'Algérie représente une grande zone minière, qui se situe dans la zone de l'Atlas tellien, englobe les massifs Kabyles et l'Edough. Cette importante zone minière a un socle modelé en reliefs escarpés et couvert de plaines littorales qui longent toute la façade méditerranéenne. Les massifs Kabyles captent d'importants gîtes des minerais qui offrent une association atypique de plomb mélangé naturellement avec le zinc, ainsi que d'autres associations de minerais de cuivre, de pyrite, de fer, de baryum, d'arsenic, d'antimoine, de mercure, de nickel, d'argent et d'indium.



Figure III.1. L'atlas tellien. (J. Riser)

Plus au Sud de cette région minière du Nord Algérien, on trouve d'importants gisements de minerais de zinc, de plomb, de cadmium, de galène, de germanium, de pyrite, de cuivre, d'antimoine et de mercure.

L'Oued El Kebir contient une association originale de minerais de plomb et de zinc, ainsi que de cuivre et de mercure. La zone minière d'Aïn M'Lila comporte aussi d'importants gisements d'une association originale de plomb et de zinc. La partie orientale de cette zone détient aussi d'importants gîtes d'une association de sulfures polymétalliques, de magnétite, d'antimoine et d'or. Ainsi que des gîtes d'une association de skarns, de lentilles de chromites, et des gîtes contenant une association de greisen qui se mélange à l'étain, au tungstène et au lithium. Toujours dans cette importante zone minière se trouvent des gîtes de barytine, de fluorine, de célestine, de strontianite qui se situent dans de profondes cavités.

L'existence d'une activité volcanique a généré un magmatisme hypovolcanique et calco-alcalin qui a donné naissance à une minéralisation de gîtes de minerais de type porphyrique où existe une association originale de cuivre qui se mélange à de l'or et à du molybdène. Ainsi qu'une association de skarn, de tungstène et de molybdène ; et enfin, une association d'or, qui se mélange à l'antimoine et à du mercure.

La région des Eglab appartient au plus grand Craton du monde : le Craton ouest-africain qui est dominé par la dorsale Reguibat qui pointe au nord en formant un axe cristallin du Sud-Ouest au Nord-Est de l'Algérie. Cette zone minière englobe les gisements des bassins de Tindouf, et les gisements de Taoudéni. Son socle géologique est constitué de quartzites fins noirs injectés de lentilles de quartz et d'un complexe rhyodacitique, de schistes et de phyllades injectés aussi de lentilles de quartz, de micaschistes, de gneiss et de migmatites.

Les photos satellites de la chaîne de l'Ougarta captent d'importantes zones minières à Ben Tadjine, Erg-er-Raoui, Saoura, qui se situent au Nord-Est de l'Algérie, et à Daoura se trouvant au Sud-Ouest de ce pays. Le socle géologique de cette zone est dominé en surface par un soubassement volcano-sédimentaire et volcanique qui contient d'importants gisements de minerais d'argent, d'arsenic, d'or, de baryum, de cuivre, de fer, de manganèse et une association de plomb qui se mélange à du zinc, du strontium et du tungstène.

L'Atlas Saharien comprend une importante zone minière qui forme une longue suite de reliefs et occupe une grande superficie de l'Algérie. Cette région s'étend de la zone transfrontalière algéro-marocaine, qui se situe au Nord-Ouest de ce pays, jusqu'à la frontalière algéro-tunisienne qui se situe à son flan Sud-Est.

Le grand désert est formé de grandes étendues de dunes l'Erg Oriental et l'Erg Occidental, de plaines caillouteuses, de regs et d'oasis. Le massif des Eglab, à l'Ouest et le massif du Hoggar à l'Est, forment pratiquement la limite méridionale du Sahara algérien et marquent respectivement une zone transfrontalière algéro-mauritanienne et algéro-malienne d'une part, algéro-nigérienne et algéro-libyenne d'autre part. Cette zone minière est très riche en gisements de pétrole et de gaz naturel.

(David BEYLARD, 2009)

III.2. Activité minière

L'activité minière en Algérie est très ancienne et les potentialités minières sont très diversifiées (plus d'une trentaine de substances). Cependant aux gisements anciens de fer, sel, zinc, plomb, baryte, marbre,...sont venus s'ajouter des gisements d'or, wolfram, étain, qui constituent le potentiel minier à exploiter ou à explorer dans le futur, et des indices prometteurs pour le diamant, métaux rares et pierres précieuses et semi-précieuses.

L'inventaire des gisements de matières premières de l'Algérie fait état d'une estimation de la valeur financière supérieure à 2600 milliards \$. L'Algérie n'aurait besoin, selon certaines études, que de 200 milliards de dollars pour se doter des infrastructures modernes nécessaires à l'exploitation, soit environ 7,6% de la valeur financière globale des tous ses gisements de matières premières.

Parmi les ressources répertoriées, figurent les terres rares pour lesquelles un intérêt grandissant se fait sentir partout dans le monde depuis quelques années. Des études scientifiques sont nécessaires pour éclairer les décideurs sur l'opportunité, les mécanismes et les issus de l'exploitation de ses ressources.

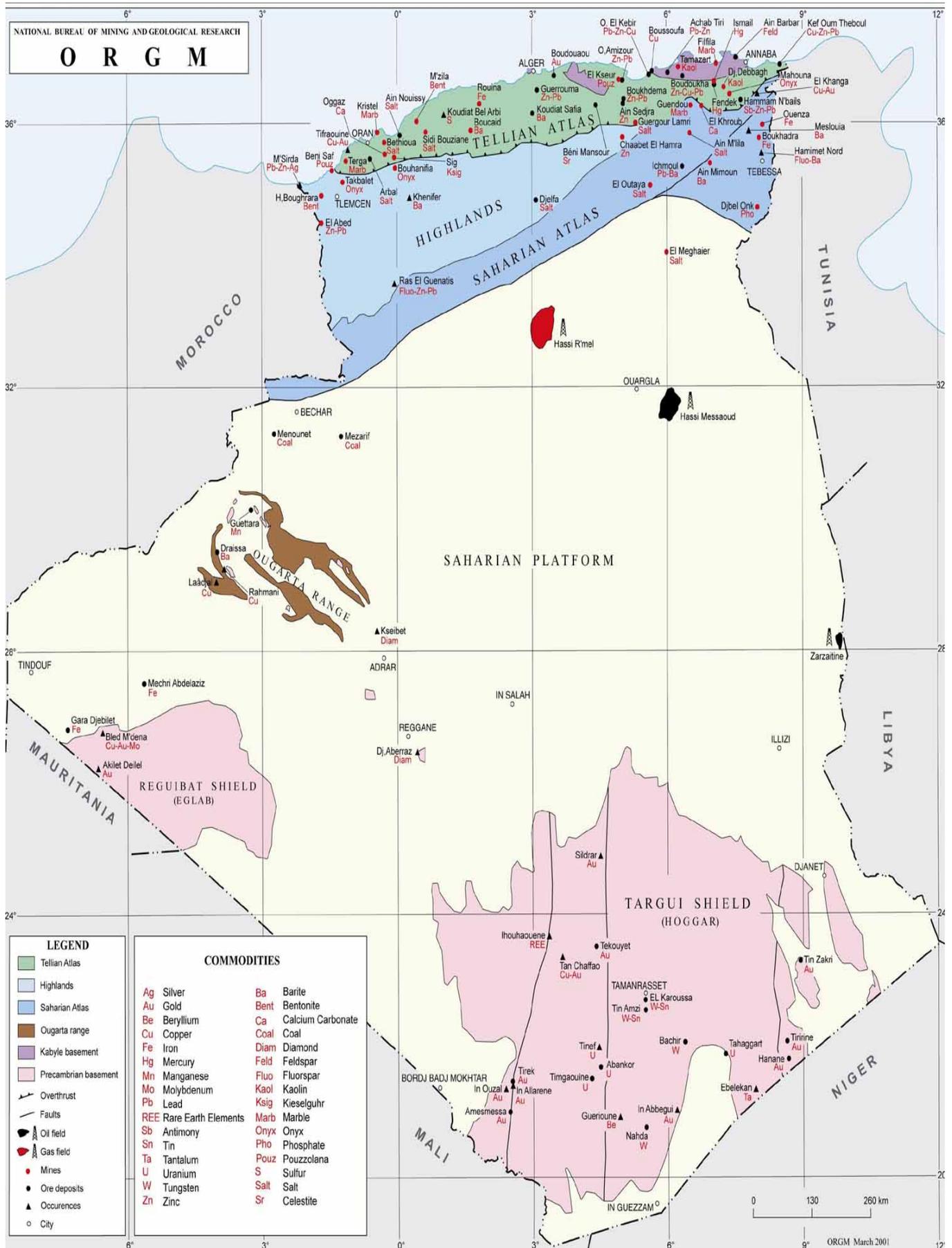


Figure III.2. Potentialités minières Algériennes

L'Algérie disposerait de terres rares, des substances à l'aspect métallique et utilisables notamment dans les produits de haute technologie. Selon Le Président de l'Agence Nationale des Activités minières (ANAM, ex ANPM), il existe des indices de la présence de ces métaux, notamment dans le sud du pays, avec un potentiel en scandium, yttrium ou cérium qu'il s'agit toutefois de bien évaluer et de bien valoriser à terme (C.B, 2014).

III.3. L'indice d'Ihaouhaouène

L'indice d'Ihaouhaouène est situé à 350Km au Nord-Ouest de la ville de Tamanrasset, dans la partie Nord, dans la partie Nord de In Ouzzal.

La minéralisation en terres rares est liée aux affleurements de carbonatites, qui sont spatialement et génétiquement liées aux corps de synètes paléoprotérozoïques.

Les terres rares sont concentrées principalement dans l'apatite, les pyroxènes et les feldspaths potassiques, mais les minéraux propres de terres rares n'ont pas été observés.

Les ressources ont été estimées à 8200 tonnes de TR_2O_3 pour une profondeur de 30m avec des teneurs qui varient de 1.48 à 9% de TR_2O_3

Tableau III.1. Exemples de gisements algériens (EREM, 1983)

Région	Substances utiles	Catégorie d'indice	Teneur	Caractéristiques de gisement
In-Ecker	Ta, Nb, La, Y, Sc	Point de minéralisation	Ta : 0.01 à 0.07% Nb : 0.01 à 0.05% La : 0.05 à 0.1% Y : 0.1 à 1% Sc : 0.05%	Granite Taourirt d'In-Akoulman (3.5 * 5Km) 50 filons de pegmatites ouest de Mertoutek ; Filons de pegmatites et de γ . Massif de γ de Tan-Afella (6 * 8Km).
In-Ecker	Nb, Ta, La, Ce	Indice	Nb : 0.02 à 0.2% Ta : 0.01 à 0.1% La : 0.1 à 0.3% Ce : 0.05 à 0.1%	4 corps de quartz-feldspathiques (0.1 à 0.3m * 200m).
Sérouenout	Ta, Nb, Be, Zr, La, Ce, Hf	6 points de minéralisations	Ta : 0.003 à 0.015% Nb : 0.005 à 0.02% Be : 0.007 à 0.02% Zr : 0.2 à 0.5% La : 0.07 à 0.1% Ce : 0.07 à 0.1% Hf : 0.003 à 0.015%	Massif de granite de Tissellilin à structure concentrique. Filon de pegmatites parmi les cipolins ; Gneiss greisenifiés avec filons de quartz (0.3 à 1 de puissance). Nappe de trachyte ; Filon pegmatoïdes et greisens (1 à 2m * 3.5Km) et partie nord du massif de γ Taourirt d'Amded et leurs dykes acides (0.3 à 3m * 20 à 500m).
Sérouenout	Ta, Nb, Ce, La, Hf, Zr		Ta : 0.003 à 0.05% Nb : 0.007 à 0.3% Ce : 0.2 à 0.5% La : 0.05 à 0.07% Hf : 0.002 à 0.02% Zr : 0.15 à 0.5%	Massif de γ Taourirt de Jessalit ; 40 affleurements de phonolotes (8Km ²) riche en néphéline (30%) et groupe de massif de roches alcalines (syénites, trachytes) de Imadouzène, Idakhiden, Amekchoun nord et sud.

Conclusion Générale

Les terres rares sont un sujet multidimensionnel, complexe et d'une extrême sensibilité, ce sont des éléments chimiques indispensables au domaine des hautes technologies, le grand gisement des terres rare se situe dans la chine qui se considère comme le premier producteur mondiale de ces matières, l'importance de ces éléments permet de classer les gisements des terres rares dans la catégorie des réserves stratégiques.

En Algérie, Nous avons des indices de la présence de ces métaux, notamment dans le sud du pays (indice d'Ihaouhaouene),mais le manque de données statistiques précises a également été un défi majeur à relever surtout, alors que certaines informations sont plus ou moins largement disponibles et plus ou moins cohérentes selon les sources.

l'expansion de l'extraction et de la transformation des terres rares dans le monde, ainsi que la mise au point des solutions de recyclage et de produits de substitution pourraient offrir aux pays consommateurs et importateurs une plus grande flexibilité, quant à la diversification de leurs achats, ainsi qu'une opportunité de réduire leur dépendance vis-à-vis des importations de terres rares et contribuer ainsi à diminuer la pression sur les prix.

Bibliographie

Atlas, Géographie (J. Riser), <http://encyclopedieberbere.revues.org/1213#tocto1n2>

explorer pour les lanthanides au Québec, sidex, 2001,
<http://www.sidex.ca/Vpub/ArtLan/lanthanides-francais.htm#sommaire>

L'inventaire des gisements de matières premières de l'Algérie, PAR DAVID BEYLARD, GENÈVE, 01-07-2009.

La guerre terres rares, <http://www.aetv-balard.com/blog/2012/12/4/la-guerre-des-terres-rares.html>

Les terres rares, <http://globalmetal.fr/le-marche-des-terres-rares/>

Mines et carrières en Algérie : un gisement de partenariat, Wassila Benhamed, El Moudjahid 24/09/13.

Perspectives du marché des terres rares,
<http://www.mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/metaux/metaux-perspectives-terres-rares.jsp>

Philippe ROSSI, « LOPARITE », *Encyclopædia Universalis* [en ligne], consulté le 23 septembre 2014. URL : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/loparite/>

Société Française de Chimie,
http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/donnees/espace_travail/petr/tera/textera.htm

Terres rares : propriétés, usages et types de gisement,
<http://www.mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/metaux/metaux-proprietes-terres-rares.jsp#haut>

Terres rares et enjeux économiques mondiaux, <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/66180.htm>

Terres rares et enjeux économiques mondiaux, <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/66180.htm>