



ROYAUME DU MAROC  
ACADÉMIE HASSAN II DES SCIENCES ET TECHNIQUES



**«Les métaux stratégiques :  
Enjeux scientifiques et économiques»**

**Mardi 1<sup>er</sup> novembre 2016**





**Sa Majesté le Roi Mohammed VI - que Dieu Le garde -  
Protecteur de l'Académie Hassan II  
des Sciences et Techniques**

**Séminaire organisé, le 1<sup>er</sup> novembre 2016, dans le cadre de  
la commémoration du X<sup>ème</sup> anniversaire de l'installation de  
l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques  
par Sa Majesté Le Roi Mohammed VI, que Dieu L'assiste,**  
par  
**L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques,**  
et  
**Le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche  
Scientifique et de la Formation des Cadres;  
(Direction de la Recherche Scientifique et de l'Innovation)**

**Dossier préparé par**  
***Le Collège de l'Ingénierie, Transfert et Innovation Technologique,  
Académie Hassan II des Sciences et Techniques***

Dépôt légal : 2017MO2135

ISBN : 978-9954-716-00-7

Réalisation : **AGRI-BYS S.A.R.L.**

Achevé d'imprimer : Mai 2017

Imprimerie Lawne : 11, rue Dakar, Océan, 10040-Rabat, Maroc

# Sommaire

<b>I- Introduction</b> .....	7
<b>II- Allocution de Monsieur le Secrétaire perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques</b> .....	8
<b>III- Conférences</b> .....	11
<b>III-1- Conférence 1</b> : «Le Cobalt, métal au service de l'écologie, met le Maroc comme producteur, au 10 <sup>ème</sup> rang mondial», par Ismail AKALAY, Directeur Général des activités minières et industrielles au Maroc, Managem, Maroc.....	11
<b>III-2- Conférence 2</b> : «Géologie, chimie des terres rares et développement durable», par Pierre TOULHOAT, Directeur Général Délégué et Directeur Scientifique, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, France.....	20
<b>IV- Table ronde : «Métaux rares : Quelle stratégie pour le Maroc?»</b> Débat et recommandations.....	37

## I- Introduction

Dans le cadre de la commémoration du 10<sup>ème</sup> anniversaire de son installation par Sa Majesté Le Roi Mohammed VI, que Dieu L'assiste, l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques, en partenariat avec le Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche scientifique et de la formation des cadres, a organisé le Mardi 1<sup>er</sup> Novembre 2016 un séminaire sur «Les métaux stratégiques : Enjeux scientifiques et économiques».

Les métaux stratégiques regroupent une cinquantaine de métaux. Ils sont actuellement considérés comme indispensables aux industries de pointe et de hautes technologies. Ils sont aussi l'objet de grands enjeux économiques et stratégiques à l'échelle de notre planète.

Ces métaux concernent, l'Antimoine, le Cobalt, le Gallium, l'Indium, le Magnésium, les métaux du groupe Platine, le Tantale, le Niobium, les Terres rares (avec quinze lanthanides, le Scandium et l'Yttrium) ... sans oublier le Lithium, le Nickel, et quelques autres métaux dont l'usage est en pleine expansion et les ressources concentrées dans certains pays du globe.

L'investissement dans les technologies avancées utilisant les métaux rares peut s'avérer hasardeux si des difficultés d'approvisionnement ou des quotas d'exportation des pays détenteurs de réserves limitent leur exportation. A ce titre, l'exemple des terres rares est édifiant. Ces métaux connaissent des utilisations diverses dans les industries innovantes et de haute valeur ajoutée. On rencontre dans la fabrication des lasers, des téléphones portables, des tablettes, des batteries, des véhicules hybrides, des panneaux solaires et des ampoules à basses consommations,.... Les domaines d'utilisation sont importants et diversifiés. Actuellement, 97% de la production des terres rares est d'origine chinoise alors que la Chine ne détient que 35 à 40% des réserves mondiales de cette richesse. Ce monopole pose des problèmes d'investissement dans l'exploitation des gisements.

Le Maroc possède des ressources avérées des terres rares dans les phosphates et certains gisements miniers. Cependant, aucune industrie nationale n'a investi dans l'exploitation de cette ressource. Aussi, la recherche scientifique nationale, dans ce domaine, est très limitée.

Les métaux rares à haute valeur ajoutée constituent, pour notre pays, un enjeu scientifique, géostratégique et de développement durable. Le présent séminaire entre dans ce cadre et a pour but de sensibiliser la communauté scientifique, les industriels et les décideurs à l'importance de cette thématique.

La rencontre a regroupé, en plus des académiciens, des professeurs universitaires, des doctorants, des étudiants de Master, des représentants de Managem, de l'ONHYM, de l'OCP, du Ministère de l'Industrie et R&D-Maroc.

La demi-journée s'est déroulée selon le programme suivant :

**8h30-9h00** : Accueil des participants

**9h00-9h30** : Ouverture officielle

**9h30-10h15** : Conférence 1

**«Le Cobalt, métal au service de l'écologie, met le Maroc comme producteur, au 10<sup>ème</sup> rang mondial», par Ismaïl AKALAY, Directeur Général des activités minières et industrielles au Maroc, Managem**

**10h15-10h45** : Pause

**10h45-11h30** : Conférence 2

**«Géologie, chimie des terres rares et développement durable», par Pierre TOULHOAT, Directeur Général Délégué et Directeur Scientifique, Bureau de Recherches Géologiques et Minières**

**11h30-12h00** : Débat

**12h00-13h30** : Table ronde; «Métaux rares : Quelle stratégie pour le Maroc?»

Modérateur: M. Smani

Rapporteur : M. Ziyad et A. Boukhari

Intervenants :

- Un représentant de l'ONHYM
- Deux représentant de l'OCP
- Un chercheur marocain dans le domaine de Terres rares
- Les deux conférenciers invités.

**13h30-13h45** : Lecture des recommandations et clôture

## II- Allocution de Monsieur le Secrétaire perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques

**Madame la Ministre,**

**Monsieur le Directeur général délégué du Bureau de Recherches Géologiques et Minières,  
Mesdames et Messieurs les Académiciens,**

**Chers invités,**

**Mesdames et Messieurs,**

C'est avec un réel plaisir et un grand intérêt que je participe avec vous à la séance d'ouverture de cet important séminaire sur le thème «les métaux stratégiques : enjeux scientifiques et économiques», organisé par le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de la Formation des Cadres et l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques. En fait, c'est une proposition de Mr. le Ministre Lahcen Daoudi, que je suis très heureux de saluer aujourd'hui et à qui je souhaite la bienvenue, que l'Académie a pris l'initiative de préparer cette réunion que nous organisons avec l'aide du Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de la Formation des Cadres avec le concours du service d'action culturelle et de coopération auprès de l'Ambassade de France à Rabat. Merci à tous ceux qui ont contribué à concrétiser cette initiative.

Permettez-moi de saisir cette occasion pour présenter mes sincères remerciements au collège ingénierie, transfert et innovation technologique de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques pour le travail accompli et pour la préparation et la réussite de l'organisation de cette importante manifestation.

Le thème choisi pour ce séminaire est d'une importance indéniable puisqu'il concerne les métaux stratégiques et les terres rares ainsi que les enjeux scientifiques et économiques qui leur sont liés; il vise aussi à examiner les opportunités de développement liées à la production et l'exploitation de ces «matériaux précieux» et de leur contribution dans le développement économique de notre pays. Cette importance est également justifiée par la participation d'un nombre important de chercheurs, de gestionnaires et de scientifiques prestigieux qui vont débattre des questions liées à la production, à la géologie et la chimie de ces métaux et de discuter de la stratégie à adopter pour la réussite d'une politique de gestion de ces ressources et l'amélioration de leur productivité et de leur durabilité dans notre pays.

**Mesdames et Messieurs,**

Depuis la formation de notre Planète «Terre» dite la planète bleue parce que de l'espace elle apparaît essentiellement bleue, notre monde est en transition permanente : énergétique, climatique, démographique, industrielle, géopolitique. Les mines ont suivi ces transitions



depuis l'âge de la pierre, du fer, du bronze, du charbon, puis au XX<sup>ème</sup> siècle les mines d'or, d'uranium et de métaux de base dits métaux majeurs. Actuellement, nous vivons une nouvelle transition minière, celle des métaux stratégiques et des terres rares.

En vérité, il n'existe pas de définition ou de liste définitive de métaux stratégiques. Il existe, en effet, une cinquantaine de métaux qui sont considérés comme stratégiques, dont le cobalt (qui fera l'objet, dans un instant, d'une conférence qui sera présentée par Mr. Ismail Akalay, Directeur Général des Activités Métaux de base et Cobalt à Managem au Maroc), le tungstène, le gallium, le platine, le palladium, le fluor, le graphite, ainsi que les terres rares (qui feront aussi l'objet d'une autre conférence au cours de cette matinée, présentée par Mr. Pierre Toulhoat, Directeur Général délégué et Directeur Scientifique du BRGM en France). Ces métaux sont caractérisés essentiellement par le volume de leur production qui reste faible, comparé à ceux des métaux dits majeurs, par la technicité de leur extraction (sauf exception, liée à un accident géologique, il n'existe pas de mine de métaux rares, leur production est issue de celle d'un métal primaire), par la fluctuation de leur coût et par la croissance de leur utilisation dans l'industrie et la fabrication des produits de haute technologie. Certains de ces métaux sont cruciaux pour des applications d'avenir : Par exemple, l'indium pour les écrans plats ou les panneaux solaires, le lithium pour les batteries de véhicules électriques, certaines terres rares pour les aimants permanents des génératrices des éoliennes, le titane pour des applications médicales et aéronautiques, le rhénium pour l'aéronautique...

Cette multiplication des usages s'inscrit dans une période de développement économique fulgurante des marchés émergents : la demande de l'industrie pour ces métaux est portée par une croissance appelée à se renforcer avec le temps.

Toutefois, comme tous les métaux extractifs, les métaux stratégiques et les terres rares sont assujettis aux aléas de l'épuisement et de pénurie du fait de l'explosion de la demande industrielle mondiale. Selon une étude de l'Institut Mckinsey, il y aura d'ici 2030, 3 milliards de nouveaux consommateurs dans la classe moyenne, à l'échelle de la planète. Trois milliards de nouveaux consommateurs qui auront besoin de Smartphones, tablettes et autres produits High Tech contenant des métaux stratégiques. Comme pour les terres rares, le recours au recyclage permettrait de limiter les besoins de consommation et de pérenniser la production de métaux stratégiques.

Par ailleurs, l'appel à la science, à la recherche scientifique et à l'innovation, constitue un recours d'un salut fort probable pour la production et la durabilité de ces métaux stratégiques. L'objectif étant de savoir comment agir sur l'ensemble de la chaîne de valeur des métaux stratégiques en proposant des solutions grâce à la recherche scientifique et le savoir-faire au niveau national.

**Mesdames et Messieurs,**

Votre séminaire est une occasion pour réfléchir et échanger sur les enjeux de la recherche scientifique dans le domaine des métaux stratégiques et des terres rares et d'évaluer les perspectives. C'est aussi une opportunité de faire un état des lieux des usages en métaux stratégiques dans nos capacités technologiques, de quantifier nos forces et vulnérabilités et de fixer en particulier des axes de recherche porteurs qui concernent spécifiquement les problèmes de production et de durabilité de ces métaux dans notre pays.

Permettez-moi à la fin de cette brève allocution, de renouveler mes sincères félicitations aux organisateurs de cette journée et aussi de présenter mes vifs remerciements aux éminentes personnalités scientifiques présentes avec nous, ils contribueront tous, j'en suis sûr, à enrichir vos débats.

L'Académie Hassan II des Sciences et Techniques qui s'enorgueillit d'être sous la protection tutélaire de Sa Majesté Le Roi Mohammed VI, que Dieu Le garde, suivra avec beaucoup d'intérêt les résultats de vos travaux et sera attentive à vos conclusions et recommandations.

**Je souhaite plein succès à votre séminaire et je vous remercie pour votre attention.**

### III- Conférences

**III-1- «Le Cobalt, métal au service de l'écologie, met le Maroc comme producteur au 10<sup>ème</sup> rang mondial»**, par Ismaïl AKALAY, Directeur Général des activités minières et industrielles au Maroc; Managem

Le cobalt a été extrait du minerai, pour la première fois, par le chimiste suédois Georg Brandt en 1735. Il a démontré que ce métal est à l'origine de la couleur bleue que son minerai communiquait aux verres.

La production mondiale actuelle est de 90 000 tonnes et 94% du cobalt est sous forme de sous-produit des minerais de nickel et de cuivre.

Le cobalt est considéré comme métal stratégique. Une ressource stratégique est une ressource nécessaire pour les besoins militaires et industriels d'un pays. Elle n'est pas produite ou n'est pas accessible en quantité suffisante pour satisfaire les besoins précités.

La communauté européenne, les Etats Unis et la Chine ont classé le cobalt comme métal stratégique.

Aux Etats Unis c'est l'agence "Defense Logistics Agency" DLA qui est chargée d'acheter, de vendre et de stocker les ressources stratégiques.

En Chine, c'est le "State Reserve Bureau" qui joue le rôle de gestion du cobalt.

**1) US Geological Survey (2014) a classé le Maroc comme 10<sup>ème</sup> producteur mondial du cobalt**



Top 10 des pays producteurs de Cobalt :

1. République Démocratique du Congo (RDC) : Production 60 KT / Réserves 3.4 million T
2. Chine : Production 7 KT / Réserves 80 KT
3. Canada : Production 6.7 KT / Réserves: 140 KT
4. Russie : Production 6.2 KT / Réserves: 250 KT
5. Australie : Production 4.5 KT / Réserves: 1,2 million T
6. Brésil (avec Cuba) : Production 3.7 KT / Réserves: 89 KT
7. Cuba (avec le Brésil) : Production 3.7 KT / Réserves: 89 KT
8. Nouvelle Calédonie : Production : 3.5 KT / Réserves: 370 KT
9. Zambie : Production 3,000 KT / Réserves: 270 KT
10. Maroc : Production 1.8 KT / Réserves: 20 KT

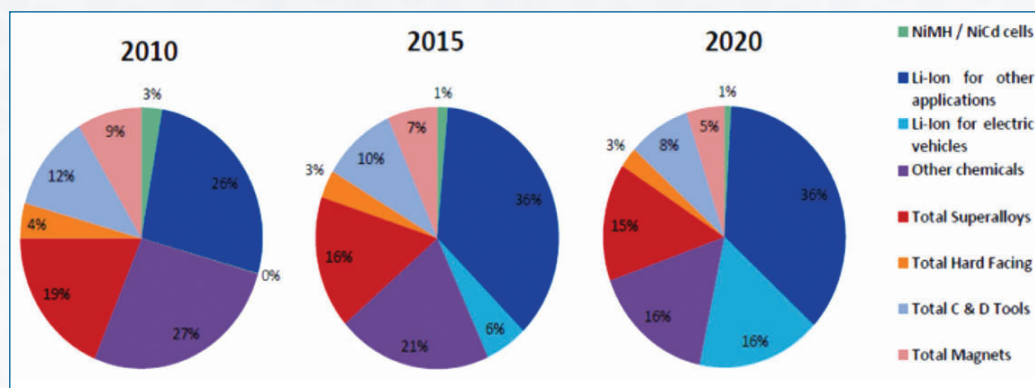
Source: US Geological Survey – édition 2014

**2) La consommation mondiale du cobalt a évolué d'une utilisation, au début du 20<sup>ème</sup> siècle comme pigment à une consommation, de 79% du cobalt produit, dans l'industrie chimique et des superalliages.**

**Evolution de la consommation mondiale de Cobalt :**

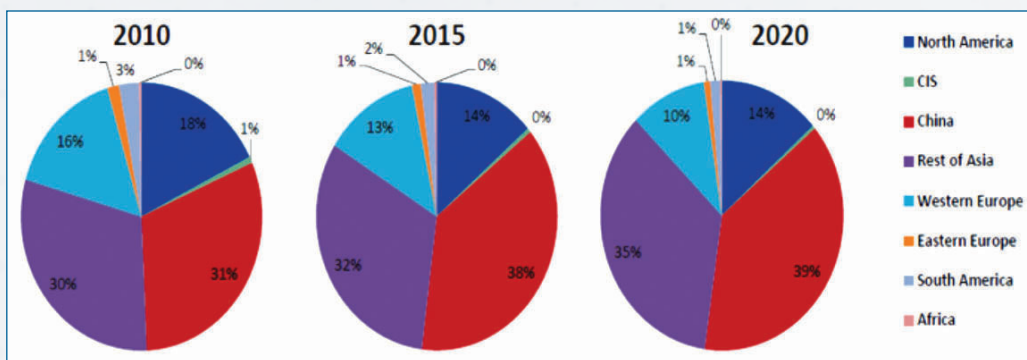
La production globale au niveau mondial en 1916 avoisinait les 550 tonnes, dont 400 étaient utilisées pour les pigments.

Aujourd'hui, l'industrie chimique et les superalliages représentent 79% de la consommation mondiale



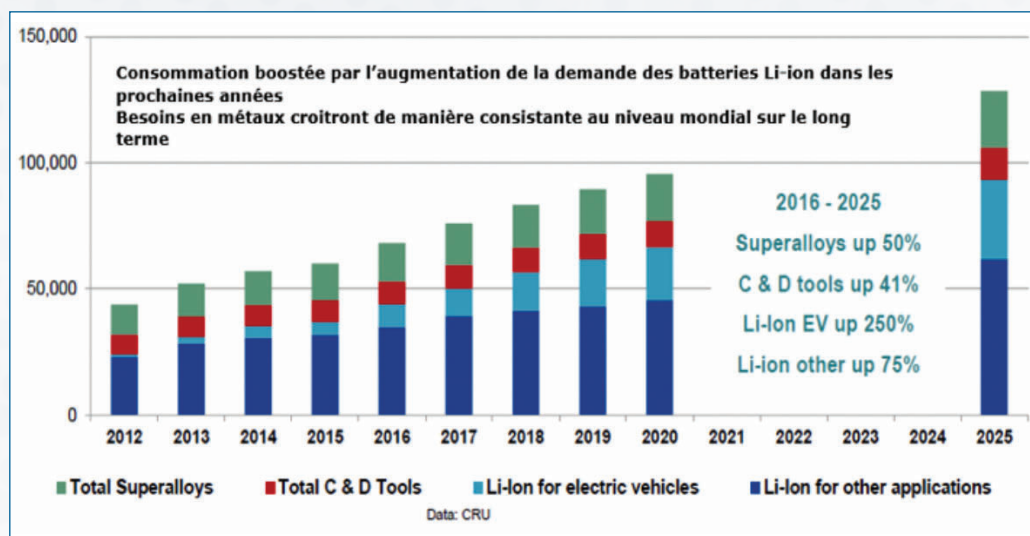
En 2007, l'Amérique du nord et l'Europe de l'ouest ont totalisé 34% de la consommation mondiale de Cobalt.

La **Chine** accapare aujourd'hui 38% de la consommation mondiale pour répondre au boom que connaît son **industrie chimique**.



Source : CRU

Selon le **CRU**, référence américaine en intelligence des marchés des métaux et matières premières, l'évolution de la consommation mondiale de Cobalt connaîtra un bond de **68%** entre **2015** et **2025**.



Source : CRU

**3) Le cobalt sera de plus en plus utilisé dans la fabrication des batteries lithium et on s'attend à une montée en puissance des batteries pour les voitures électriques.**

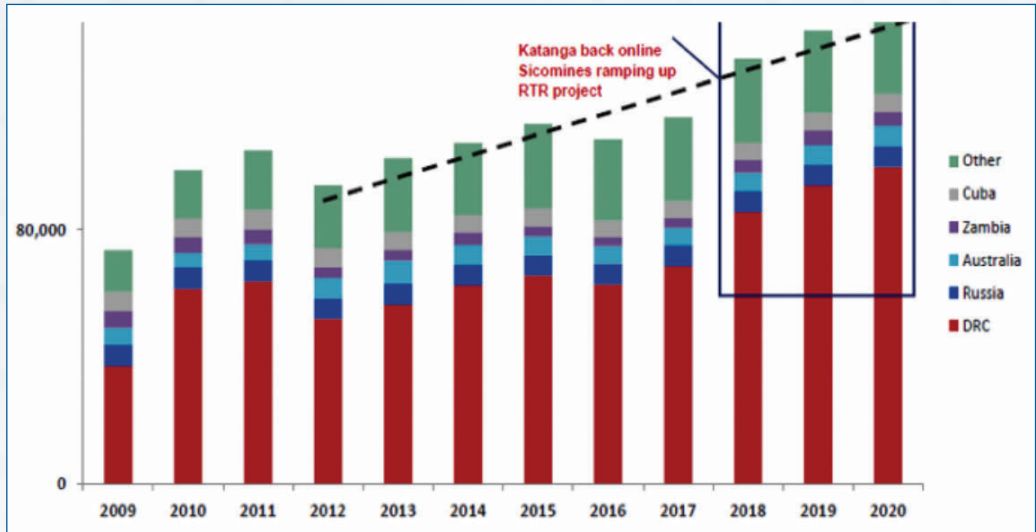
La voiture électrique sera l'avenir du cobalt si :

- Les gouvernements accordent des subventions pour encourager la transition;
- Les coûts de fabrication sont maîtrisés;
- Les fabricants assument la baisse de leur marge de profit;
- Le changement des mentalités s'opère chez les clients malgré la cherté des voitures électriques;

- Les réserves de cobalt sont assurées;
- Aucune technologie alternative ne vient apporter de meilleures perspectives.

#### 4) Qu'en est-il des réserves minières de cobalt?

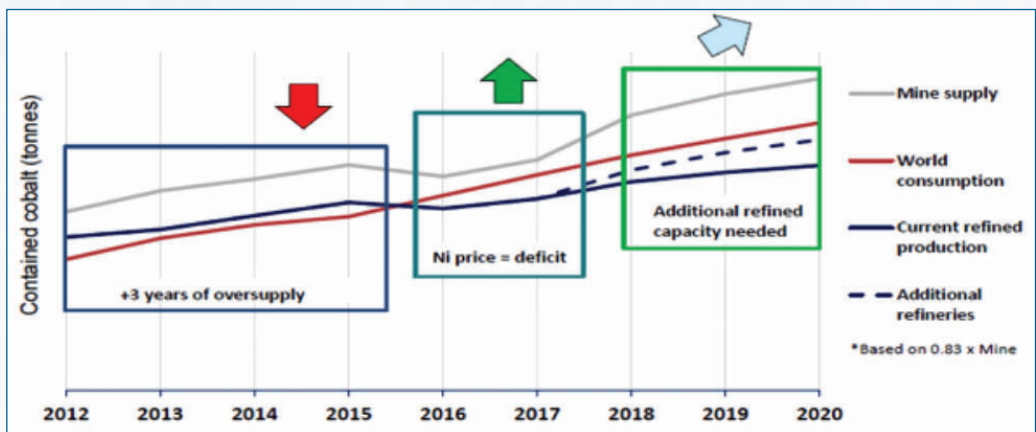
Les réserves minières de Cobalt – Actuellement bonnes, mais jusqu'à quand?



Source : CRU

5) L'offre et la demande sur ce métal auront un impact sur l'évolution des prix. Comme on le voit sur un graphe ci-dessous les spécialistes des prévisions s'attendent à une augmentation des prix du cobalt à partir de la fin de 2016 où la demande va être plus importante que la production.

La balance de demande en Cobalt et les prévisions d'évolution des cours.



Source : CRU

## 6) La fabrication d'une batterie Li-ion nécessite :

Elle nécessite par KWH :

- Lithium : 160 g
- Graphite : 1 kg

Cobalt en fonction de la batterie :

LCO (60% Co) : 1,44 kg

*LCO : Lithium Cobalt Oxyde*

NMC (10 à 20% Co) : 0,36 kg

*NMC : Lithium 1/3, Nickel 1/3 Manganèse, 1/2 Cobalt*

NCA (9% Co) : 0,22 kg

*NCA : Lithium Nickel aluminium Cobalt*

À horizon 2025 le besoin sera de 135 GWh soit : 90.000 T Co

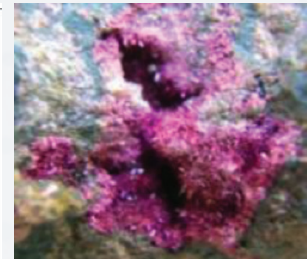
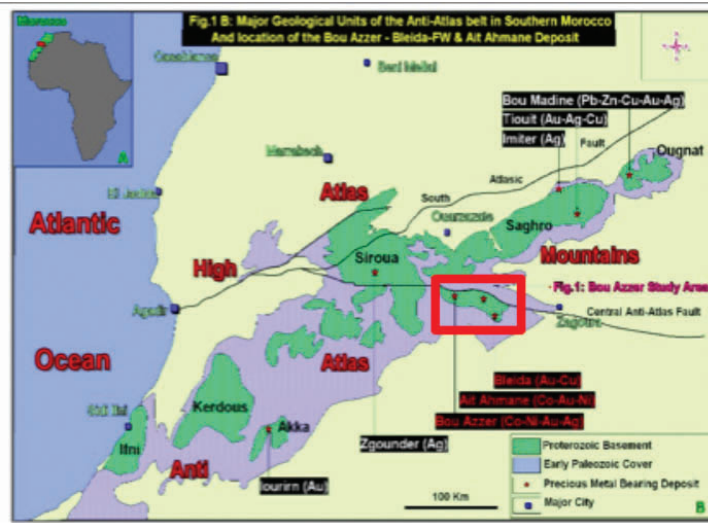
**7) Au Maroc le cobalt est produit par la société CTT (Cobalt Tifnout Tiranimine...) filiale du groupe minier privé marocain MANAGEM.**

**Le minerai de cobalt est extrait de la mine de Bou-Azzer l'une des plus anciennes mines au Maroc.**



## Historique de la mine :

**Début 1928 :** L'exploration du cobalt dans la boutonnière remonte au début du 20<sup>ème</sup> siècle par la prospection à vue et par la découverte de l'érythrine, à Jamaâ lfnaa, qui était utilisée pour ses qualités raticides. Cette prospection a rapidement abouti à la découverte des principaux indices à l'affleurement de Bou-Azzer.



**1934 :** Démarrage de l'exploitation minière à caractère industriel par la SMAG (Société Minière de Bou-Azzer El-Graara), pour s'interrompre pendant la deuxième guerre mondiale.

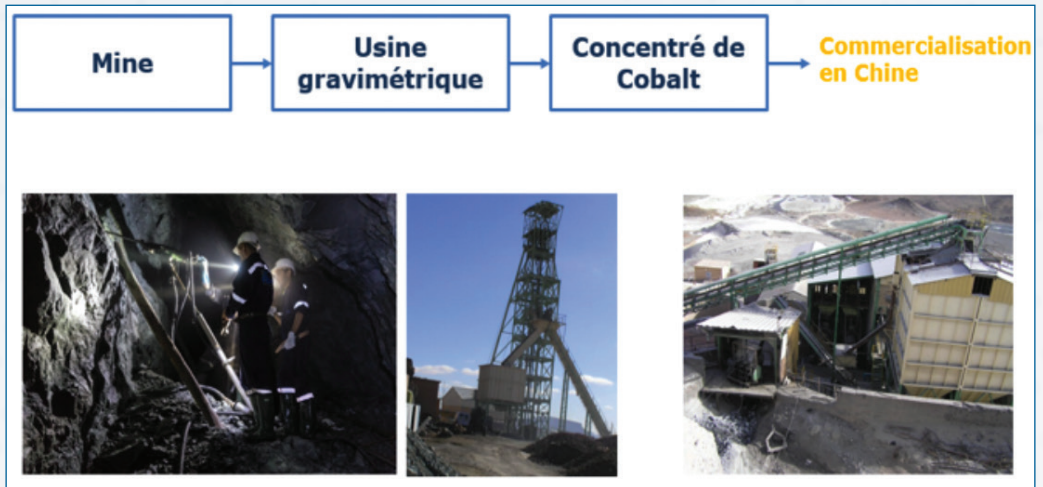
**1944 :** A la reprise, l'activité a été améliorée par une laverie pneumatique.

**1953-1957 :** Construction d'une usine d'enrichissement et réalisation d'une campagne de géophysique (magnétométrie et résistivité) en 1956. Cette campagne a permis de définir la morphologie de la serpentine sous couverture ainsi que les grands traits structuraux.

**1958 :** Poursuite d'exploitation de la mine sous la direction de l'ONA représentée par la Compagnie de Tifnout Tiranimine (CTT).

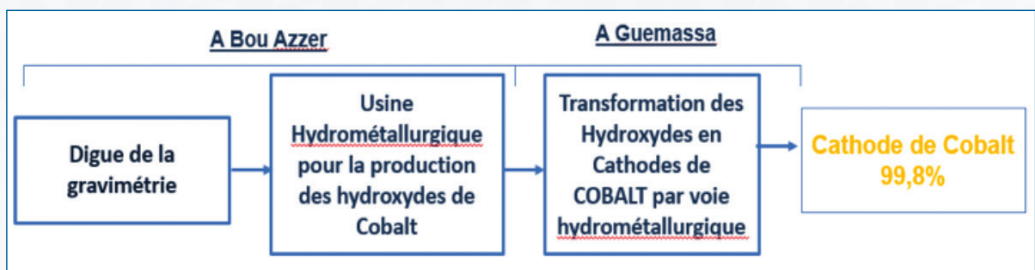


Chaines de Valeurs :



À partir de 1995 : Naissance de l'hydrométallurgie, valorisation aval et domestication de la valeur ajoutée; **Production de la cathode de COBALT**

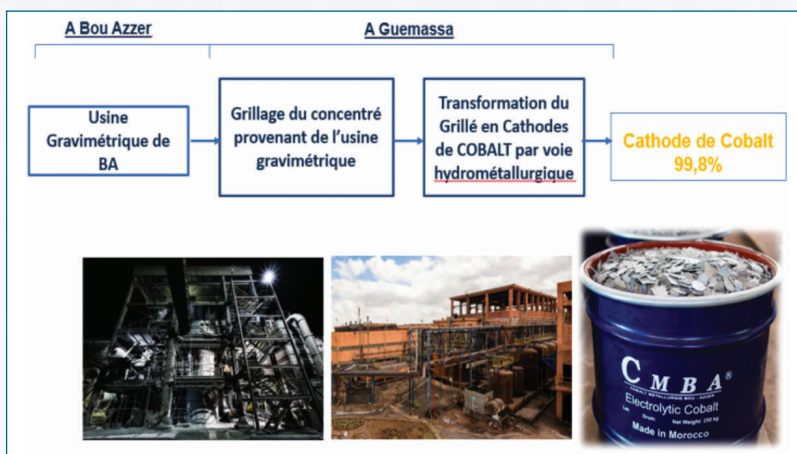
- Valorisation de la digue des rejets de la gravimétrie :





À partir de 1998 :

- Valorisation du Concentré de Co :



## Production de la cathode de Cobalt au Maroc



## Destinations du Cobalt du Maroc



La marque du cobalt marocain est un atout sur le marché :

La cathode marocaine de cobalt dont la marque est CMBA est connue et appréciée mondialement. C'est ainsi que le bureau de la réserve de l'état (SRB) chinois a acheté et stocké du cobalt marocain.

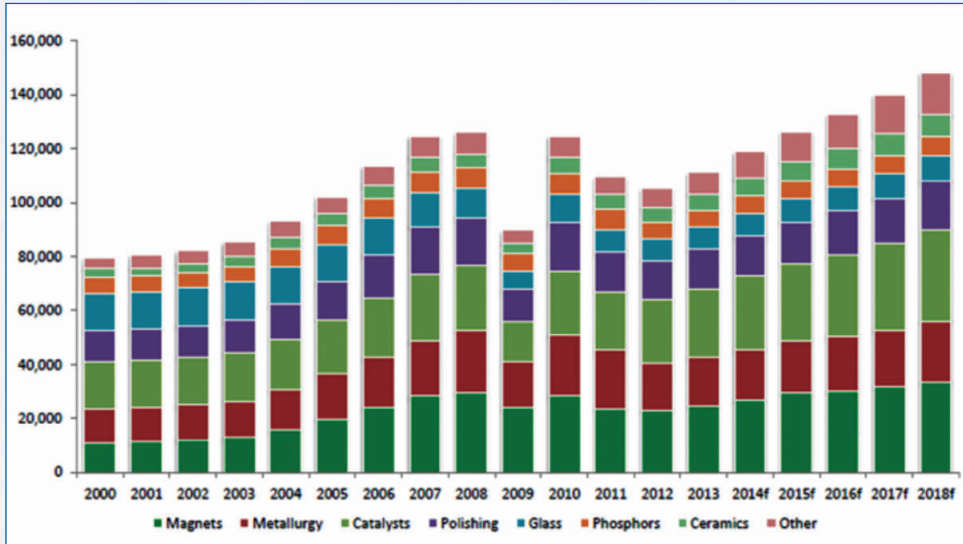
De part la maîtrise des techniques d'exploration géologique, d'exploitation minière et de valorisation du métal Managem, en s'appuyant sur son centre de recherche, a permis au pays de devenir un important producteur de ce métal stratégique.

**III-2- Conférence 2 : «Géologie, chimie des terres rares et développement durable»**, par Pierre TOULHOAT, Directeur Général Délégué et Directeur Scientifique, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 3 avenue Claude Guillemin, 45060-Orléans Cedex. France, [P.toulhoat@brgm.fr](mailto:P.toulhoat@brgm.fr)

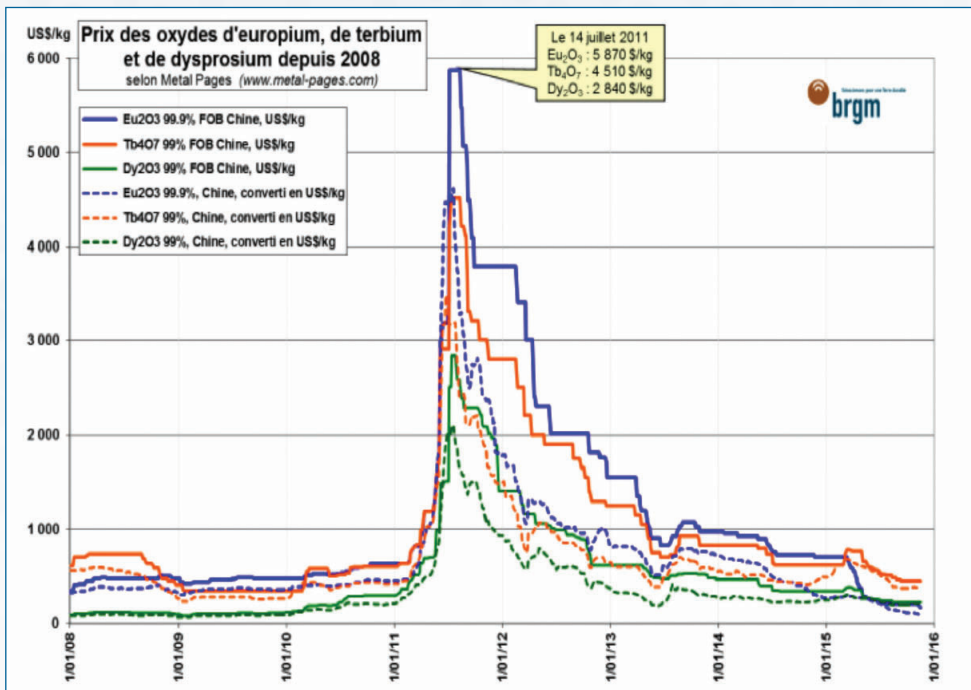
### **Rappel des enjeux**

Plusieurs facteurs sont à l'origine de l'augmentation continue de la demande mondiale en métaux stratégiques. Tout d'abord, la croissance démographique mondiale poursuit en s'infléchissant à peine. Mais c'est le développement d'une classe moyenne mondiale, définissable par un pouvoir d'achat compris entre 10 et 100 \$US/ jour qui soutient la consommation de produits à forte composante technologiques, ou de biens d'équipement toujours plus gourmands en métaux et minéraux industriels. Ceci explique la forte croissance de la production mondiale de produits industriels riches en petits métaux dans des domaines très variés. Ce qui caractérise également cette évolution de la demande, c'est qu'elle peut être influencée par des évolutions technologiques à court terme, provoquant en 2 à 5 ans de fortes inflexions dans la demande. Ceci est dû à l'accélération de l'innovation due à la capitalisation des connaissances et à la révolution numérique qui facilite grandement cette capitalisation. Ainsi, les LED de forte puissance remplacent progressivement les lampes dites «basse consommation», qui avaient elles-mêmes remplacé les lampes à incandescence. Nous verrons un peu plus loin comment la demande et les cours des terres rares en ont été influencés. A ces enjeux économiques s'ajoutent des enjeux géostratégiques. Ainsi, la domination de certains pays comme la Chine sur la production de terres rares, a provoqué dès le second semestre 2010 et en raison de restrictions à l'exportation, de fortes tensions sur le marché et la chaîne d'approvisionnement de ces éléments. Une hausse continue et exponentielle des du cours des différentes terres rares a été observée jusqu'à mi-juillet 2011, puis il s'en est suivi une explosion de la bulle spéculative. Les pays occidentaux ont profité de cette crise pour réagir et encourager la recherche de nouvelles ressources en dehors de la Chine et ont soutenu l'innovation en matière de traitement de nouveaux minerais de terres rares (e.g. eudialyte)

## World: Rare earths consumption by end-use, 2000 to 2018 (t)



Roskill, (2015)



K. Bru, P. Christmann, J.F. Labbé, G. Lefebvre (2015)

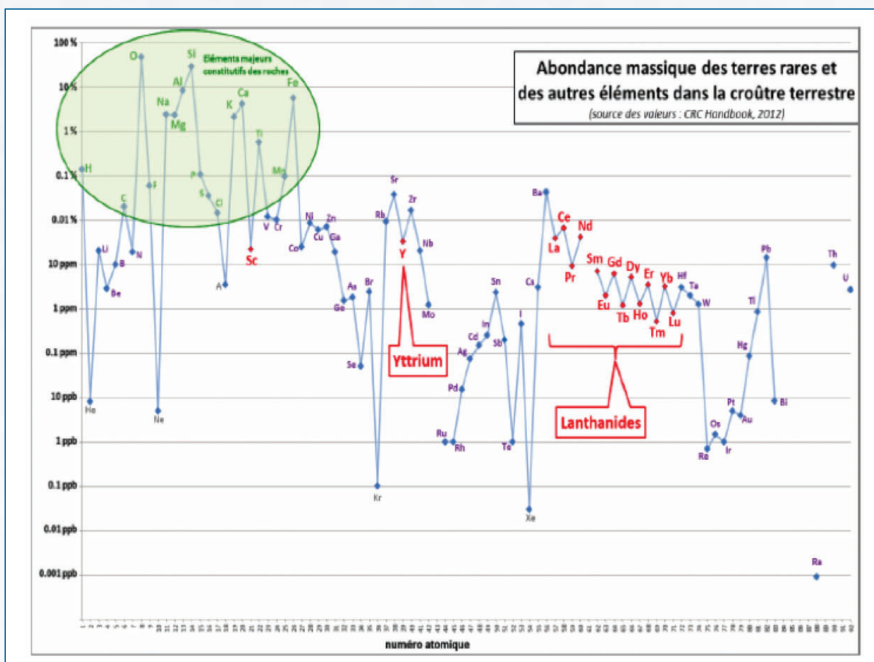
D'autres facteurs sont susceptibles d'infléchir la demande en métaux, et de confier un caractère stratégique à ceux qui sont indispensables aux besoins actuels et à venir de

l'humanité, notamment en relation avec le domaine de l'énergie. Ainsi, le développement des énergies renouvelables a fortement accru la demande de métaux comme le lithium, et le cobalt, également très fortement sollicité dans le développement des véhicules électriques. Les générateurs de grande puissance des éoliennes contiennent des quantités importantes de terres rares comme le Nd et le Dy, utilisés dans les aimants permanents pour le Nd, et pour augmenter la température de Curie pour le Dy. D'ici 2030, on s'attend à une croissance des besoins de près de 700% pour le Dy, de plus de 2000% pour le Nd. L'avènement des bio-carburants de 2° et 3° génération, utilisant des déchets et sous-produits issus de la biomasse va nécessiter le développement de nouveaux catalyseurs, engendrant une croissance vertigineuse de la demande en certains métaux comme le Ru et le Co. (EIP RawMaterials, Strategic Evaluation Report 2015)

### Définition, abondance

On appelle Terres Rares les 14 lanthanides stables du bloc des éléments 4f (du La au Lu) et l'yttrium ainsi que le scandium qui appartiennent à la même colonne (IIIB du tableau périodique). Toutefois l'appartenance du Sc à ce groupe reste matière à débat car son comportement dans les environnements géologiques est généralement différent de celui des autres terres rares. Le Prométhéum est le seul des 15 lanthanides à ne pas avoir d'isotope stable. Possédant une demi-vie extrêmement courte, il est quasi inexistant dans la nature.

Les plus abondantes (La, Ce, Nd) sont très proches du Ni, Cu et Zn! On s'aperçoit en fait que ces terres rares ne sont pas si rares! Les platinoïdes sont par exemple bien moins abondants.



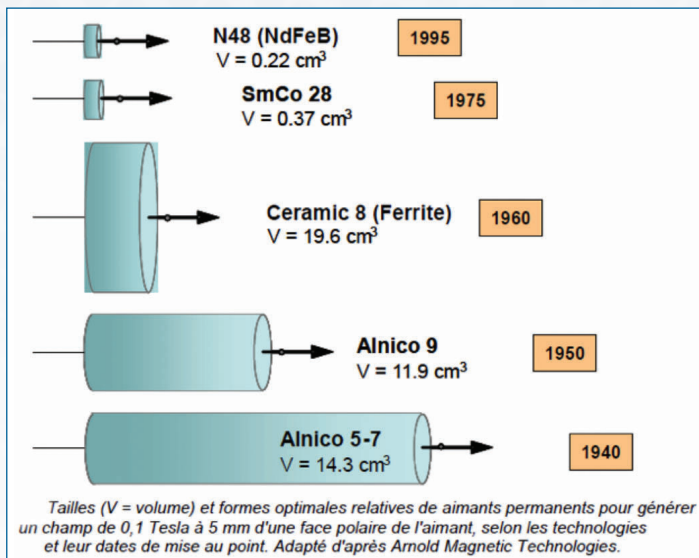
K. Bru, P. Christmann, J.F. Labbé, G. Lefebvre (2015)

Noter le profil en dents de scie : les terres rares à numéro atomique pair ont été les plus stables lors de la nucléosynthèse. Afin de lisser ces profils d'abondance de terres rares, très utilisés par les géologues pour l'étude des processus de différenciation magmatique, les abondances sont normalisées par rapport à celles qui sont mesurées dans les chondrites, météorites d'un type particulier représentatives de la composition de la terre primitive.

### Comportement chimique singulier

Les propriétés chimiques particulières des terres rares, mais ici plus précisément des lanthanides leur viennent de leur configuration électronique  $4f^0$  à  $4f^{14}$ .

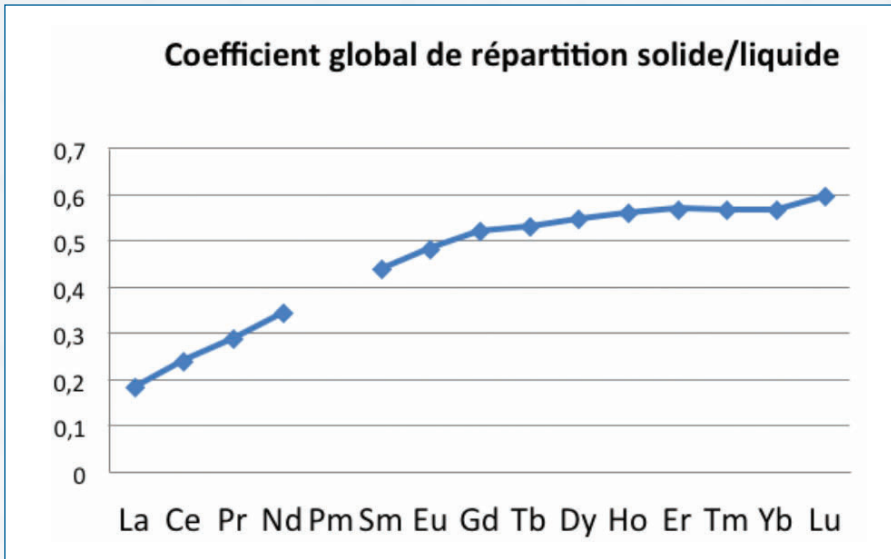
Les rayons ioniques décroissent régulièrement du La ( $1,032 \text{ \AA}$ ) au Lu ( $0,861 \text{ \AA}$ ) en coordination VI, cette décroissance est appelée contraction lanthanidique, liée à la couche électronique  $4f$ , proche du noyau, écrantant imparfaitement la charge électrique positive de celui-ci. La plupart du temps, les ions de terres rares sont stables sous forme ionique à la valence III, sauf Ce (III et IV) et Eu (II et III). Ce phénomène est à l'origine de gradients progressifs de propriétés et réactivité chimique, qui rendent la famille des lanthanides très intéressante pour étudier des processus notamment de partage entre fluides et solides. Par ailleurs, on peut observer nombre d'autres propriétés spécifiques. Ainsi, la fluorescence est souvent remarquable. Elle correspond à des transitions  $4f-4f$  ou  $4f-5d$ . Les niveaux  $5p$  et  $5s$ , saturés, font écran au niveau  $4f$ , donc quasi-insensible aux effets du champ cristallin. Les transitions électroniques,  $f \rightarrow f$ , se produisent entre niveaux discrets, les absorptions ou émissions de lumière sont ainsi quasi monochromatiques. En ce qui concerne le magnétisme, un dopage en terres rares comme le Nd permet de conférer à certains alliages des propriétés tous à fait extraordinaires, tandis que le dopage en Dy permet d'augmenter la température de Curie, autorisant un fonctionnement à plus haute température des générateurs utilisant des aimants permanents.



K. Bru, P. Christmann, J.F. Labbé, G. Lefebvre (2015), d'après S. Constantinides, Arnold Magnetics

## Géologie et Minéralogie

Les terres rares, et les lanthanides en particulier sont des éléments dit «hygromagmaphiles» ou incompatibles, à faible coefficient de partage solide/liquide. Ils se concentrent dans les phases liquides ou fondues lors des phénomènes de différenciation magmatique (fusion partielle, cristallisation fractionnée). Ainsi, leur coefficient de partage  $D_c$  varie de 0,185 pour le La à 0,598 pour le Lu.

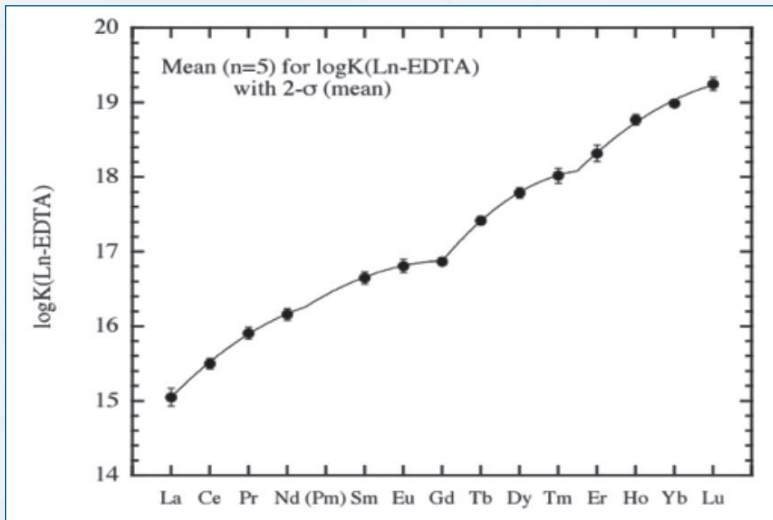


*M. Treuil et J.L. Joron, (1998)*

Les lanthanides dont le rayon ionique est le plus grand (lanthanides légers, comme La et Ce) sont mieux stabilisés dans des liquides, tandis que ceux dont le rayon ionique est petit, comme les terres rares lourdes, sont plus à même de se combiner dans des phases minérales solides.

On note également que les terres rares lourdes forment généralement des complexes plus stables que les terres rares légères. Là encore, la contraction lanthanidique permet d'expliquer ces tendances.

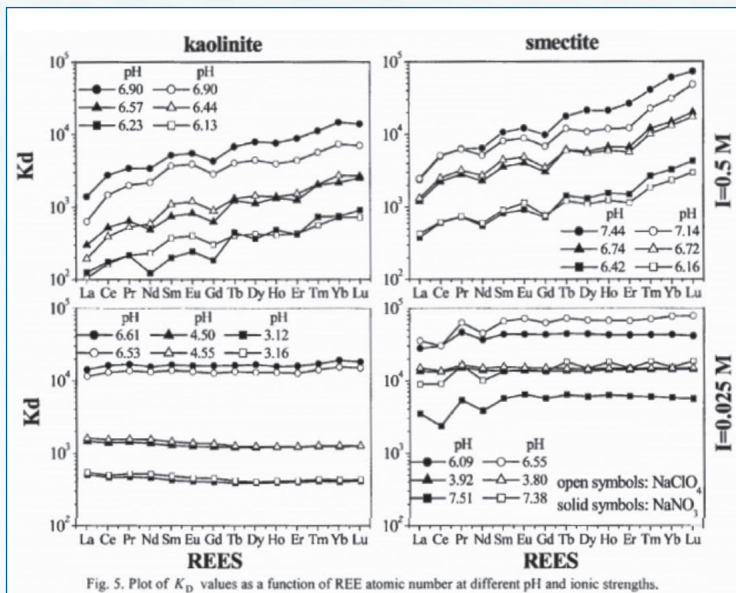




I. Kawabe, (2014)

Ce type d'évolution est observé pour de nombreux ligands naturels : carbonates, phosphates. Cette augmentation de la constante est modulée par l'effet «tétrade», qui permet d'individualiser des «sous tendances» par groupe de 4 lanthanides.

Lors de processus supergènes, les terres rares vont pouvoir également se partager entre les solutions interstitielles, et les surfaces des solides exposées dans la porosité. On constate encore ici que les terres rares lourdes sont mieux retenues sur les solides par adsorption (ou échange d'ion).



F. Coppin, G. Berger, A. Bauer, S. Castet, M. Loubet (2002)

On constate sur ces figures que les terres rares lourdes se fixent bien mieux que les légères sur les minéraux argileux (kaolinite ou smectite). Par contre, quand la force ionique est faible, la différence entre terres rares légères et terres rares lourdes s'estompe. Notons également l'effet du pH. Plus le pH est élevé, meilleure est la fixation sur le solide.

### **Minéralogie, et géologie**

Les éléments des terres rares se retrouvent rarement exprimés seuls dans les minéraux. D'une part, les terres rares interviennent très souvent en substitution d'ions de taille analogue, souvent à la place du calcium. D'autre part, on va trouver plusieurs terres rares simultanément, avec une prédominance de terres rares légères quand le site permet l'accueil d'éléments à rayon ionique élevé, et une prédominance de terres rares lourdes dans le cas contraire.

Les terres rares apparaissent ainsi sous forme d'oxydes, de carbonates, de silicates, et le plus souvent de phosphates (apatite, xénotime et monazite). Bien que près de 200 espèces minérales de terres rares soient aujourd'hui connues (ce qui reste faible), seules quelques-unes d'entre elles présentent un intérêt commercial. En effet, l'industrie minérale d'hier et d'aujourd'hui n'a cherché à valoriser qu'un très faible nombre de minerais de terres rares : à savoir la bastnäsite (fluorocarbonate), la monazite (phosphate), le xénotime (phosphate) et la loparite (oxyde).

Depuis les années 1970, les argiles dites ioniques ou argiles latéritiques d'ion-adsorption, constituent une importante source de terres rares lourdes. Cette production, aujourd'hui uniquement localisée dans le sud de la Chine (provinces de Jiangxy, Guangdong, et Guangxi) est favorisée par un coût de main d'œuvre bas, et des procédés d'extraction relativement simple par lixiviation in-situ avec des solutions neutres ou acides. Cependant, avec des teneurs de minerai extrêmement faible, de tels procédés questionnent sur l'équilibre entre faisabilité économique et protection de l'environnement. Néanmoins, la forte proportion de terres rares lourdes couplée à la très faible concentration en éléments radioactifs (U, Th) associés à ce type de gisement, en font un défi attrayant dans l'exploration minérale.

Mineral name	Chemical formula	Weight percent		
		RE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ThO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>
Euxenite	([REE],U,Th)(Nb,Ta,Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	16-30	<4.3	3-9
Fergusonite	[REE]NbO <sub>4</sub>	43-52	<8	<13.6
Loparite	(Na,[LREE],Ca,Sr,Th)(Ti,Nb,Ta)O <sub>3</sub>	28-37	1.6	0.03
Pyrochlore	(Ca,Na,U,[REE]) <sub>2</sub> (Nb,Ta) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH,F)	<22	<4	<27
Uraninite	UO <sub>2</sub>	<1.5	<12.2	50-98
Ancylite	Sr[LREE](CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (OH).H <sub>2</sub> O	46-53	<0.4	<0.1
Bastnäsité	[LREE]CO <sub>3</sub> (F,OH)	58-75	<2.8	<0.1
Parisite	Ca[LREE] <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	50-59	<4	<0.3
Synchysite	Ca[LREE](CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (F,OH)	48-53	<5	-
Allanite	([REE],Ca) <sub>2</sub> (Al,Fe) <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (OH)	2.5-17	<3	
Clay minerals	e.g. adsorbed REE on kaolinite / halloysite Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	<<4	<0.01	<0.001
Eudialyte	(Na,[REE]) <sub>15</sub> (Ca,[REE]) <sub>6</sub> (Fe,Mn) <sub>3</sub> (Si,Nb) <sub>2</sub> (Zr,Ti) <sub>3</sub> Si <sub>24</sub> O <sub>72</sub> (OH,F,Cl,H <sub>2</sub> O) <sub>6</sub>	1-10		<0.1
Gadolinite	[REE] <sub>2</sub> FeBe <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	45-54	<0.4	
Steenstrupine	Na <sub>14</sub> [LREE] <sub>6</sub> Mn <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> (Zr,Th)(PO <sub>4</sub> ) <sub>7</sub> Si <sub>12</sub> O <sub>36</sub> .3(H <sub>2</sub> O)	<31	<6	<1
Thorite	(Th,U,[REE])SiO <sub>4</sub>	<3	65-81	10-16
Zircon	(Zr,[HREE],Th,U)SiO <sub>4</sub>	<19	0.01-0.8	0.01-4
Apatite	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F,Cl,OH)	<<2*		<0.05
Monazite	([LREE],Th,Ca)(P,Si)O <sub>4</sub>	35-71	<20	<16
Xenotime	([HREE],Zr,U)(P,Si)O <sub>4</sub>	54-74	<8.4	<5.8

JJ. Tuduri, N. Charles, D. Guyonnet, J. Melleton, O. Pourret, A. Rollat (2015)

Compte tenu de leur caractère hygromagmaphile, qui tend à une concentration progressive notamment des terres rares légères dans les phases liquides ou fondues, les terres rares se concentrent dans les stades les plus différenciés de séries magmatiques alcalines. Notons en particulier la grande richesse en terres rares des carbonatites. Les terres rares se retrouvent ainsi dans différents types de gîtes :

*Gisements primaires liés à des magmatismes alcalins différenciés:*

- Carbonatites
- Complexes magmatiques alcalins et peralcalins
- Volcanites acides

*Gisements hydrothermaux:*

- En lien avec un magmatisme alcalin (ex Steenskampkraal), gisement filonien très riche mais de tonnage modéré

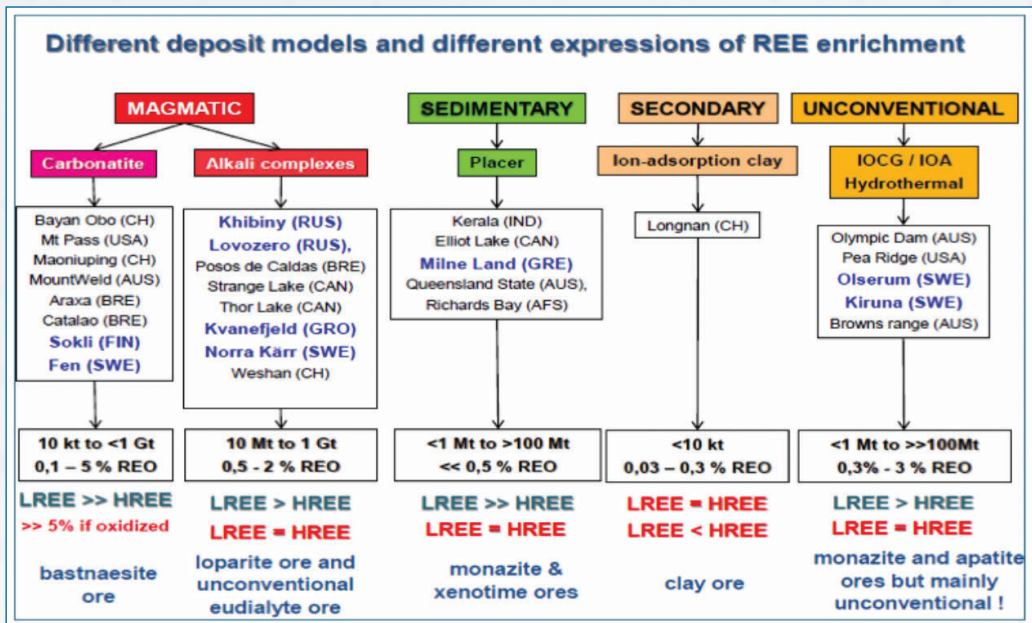
*Gisements secondaires:*

- Altération supergène de dépôts de type carbonatites ou alcalins, avec piégeage des TR dans des argiles (Chine, Madagascar)

*Gisements sédimentaires:*

- Shales noirs pyriteux

- Phosphates sédimentaires
- Dépôt sous-marins (nodules polymétalliques)
- Placers de minéraux lourds



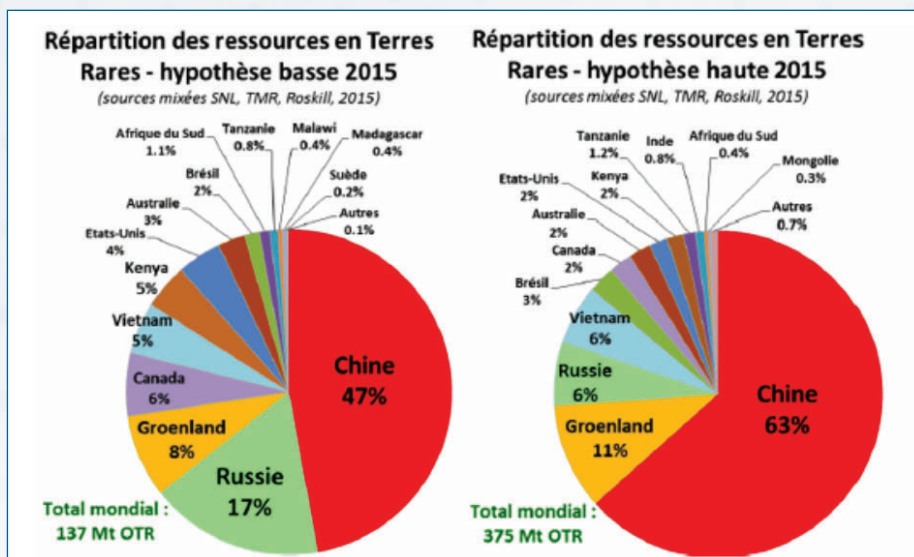
*J. Tuduri, N. Charles, D. Guyonnet, J. Melleton, O. Pourret, A. Rollat (2015)*

### Les terres rares sur le continent africain et au Maroc

Le continent africain recèle de nombreux gisements de terres rares de tous types. Evidemment, les gisements de type primaire, associés au magmatisme alcalin et aux carbonatites sont bien exprimés. Toutefois, ce sont les phosphates marocains qui contiendraient les tonnages de terres rares les plus importants (> 10 millions de tonnes). Les steneurs restent néanmoins très faibles. Les gisements développés lors de l'altération supergène de carbonatites, comme Kangankunde ou Songwe au Malawi, Ngualla en Tanzanie, ou encore Mrima Hill au Kenya sont associés au volcanisme du Rift de l'Est Africain, tandis que Steenskampkraal en Afrique du Sud est d'origine hydrothermale. Ces gisements sont caractérisés par des teneurs localement très élevées, mais des tonnages plus modestes (1000 à 100 000 tonnes). En ce qui concerne le Maroc, des concentrations en terres rares notables ont été décrites dans les massifs alcalins de Oujda, Rekkame, Azrou, Tourguejïd, El Ksar, Sahro, Siroua, ou des carbonatites dans les régions de Taourirt, Oulmes. Le complexe alcalin de Tamazert d'âge miocène composé de syenitesnéphéliniques, pegmatites et carbonatites localisé dans le Haut-Atlas offrirait un certain potentiel en Zr, Nb et terres rares. Plus récemment dans les provinces du Sud (régions de GlibatLahfouda, ou Twihinata), associés à des carbonatites fortement altérées, ont été découverts par l'ONHYM des indices intéressants, où en sus des terres rares on note la présence de Nb, Ta et U.

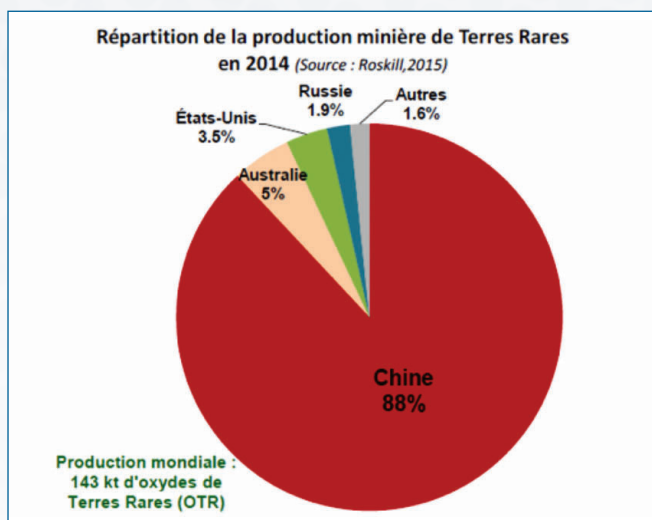
## Volets économiques : évolution récentes

Les diagrammes ci-après reflètent l'état des connaissances sur les ressources en terres rares compilées par le Brgm fin 2015. Les hypothèses basses font apparaître une estimation à la hauteur de 137 millions de tonnes d'oxydes de terres rares, et les hypothèses hautes 375 millions de tonnes. La Chine reste le pays dominant en termes de ressources, suivie par la Russie et le Groenland.



K. Bru, P. Christmann, J.F. Labbé, G. Lefebvre (2015)

La production minière est très largement dominée par la Chine, qui produit annuellement 88% des 143 kT de terres rares de par le monde.



K. Bru, P. Christmann, J.F. Labbé, G. Lefebvre (2015)

La production minière de l’Australie, des Etats Unis et de la Russie s’était réveillée à partir de 2011, mais a connu des difficultés compte tenu de la baisse des cours enregistrée après l’explosion de la bulle de 2011 (faillite et fermeture de l’exploitant Molycorp aux Etats-Unis en 2015, et difficultés financières de l’exploitant australien Lynas).

### Des besoins à long terme, tirés par la technologie

Le tableau ci-après décrit les principaux usages des terres rares. Les aimants permanents ont de nombreuses applications. Nous les avons évoquées pour les générateurs d’éolienne, mais les véhicules électriques, ainsi que de nombreux objets technologiques de la vie quotidienne en font une grande consommation.

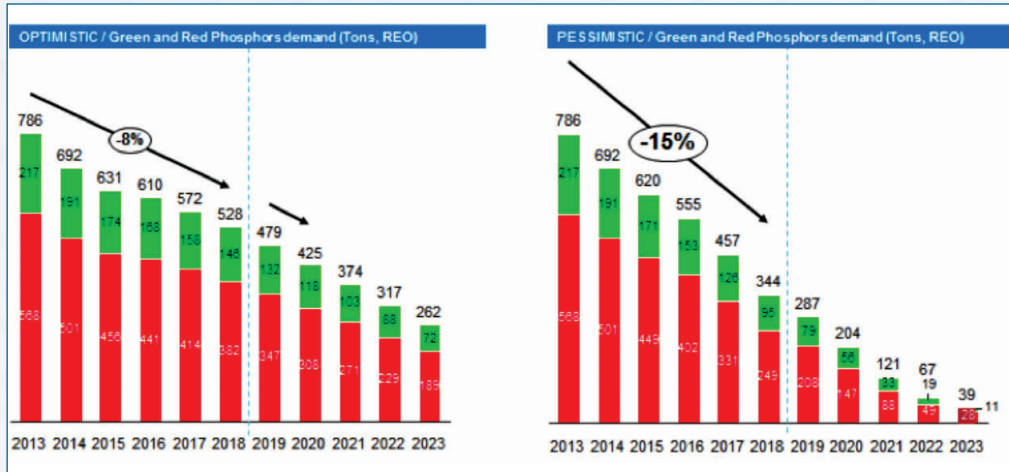
Secteur d’usage	Consommation mondiale en 2012	Consommation mondiale en 2014
Aimants permanents	23 000 t	26 712 t
Catalyses	22 750 t	27 150 t
Alliages métallurgiques	22 000 t	18 800 t
Verres et céramiques	13 250 t	15 135 t
Polissage	17 000 t	14 900 t
Limnophores	8 00 t	6 180 t
Autres	7 250 t	9 900 t
<b>TOTAL</b>	<b>113 250 t</b>	<b>118 777 t</b>

*K. Bru, P. Christmann, J.F. Labbé, G. Lefebvre (2015)*

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

*K. Bru, P. Christmann, J.F. Labbé, G. Lefebvre (2015)*

Pour autant, la demande en terres rares n'est pas à l'abri de certaines fluctuations. Ainsi, la demande en terre rares nécessaires pour fabriquer des poudres luminescentes rouges et vertes utilisées dans les lampes basse consommation a commencé à décroître depuis 2013, et devrait continuer à décroître avec des baisses de -8% annuelles à -15% annuelles. Ceci est dû au remplacement de ces poudres par des LED, à très haut rendement, qui sont en train de remplacer les lampes dites «basse consommation» par les lampes à LED, qui consomment beaucoup moins de terres rares.

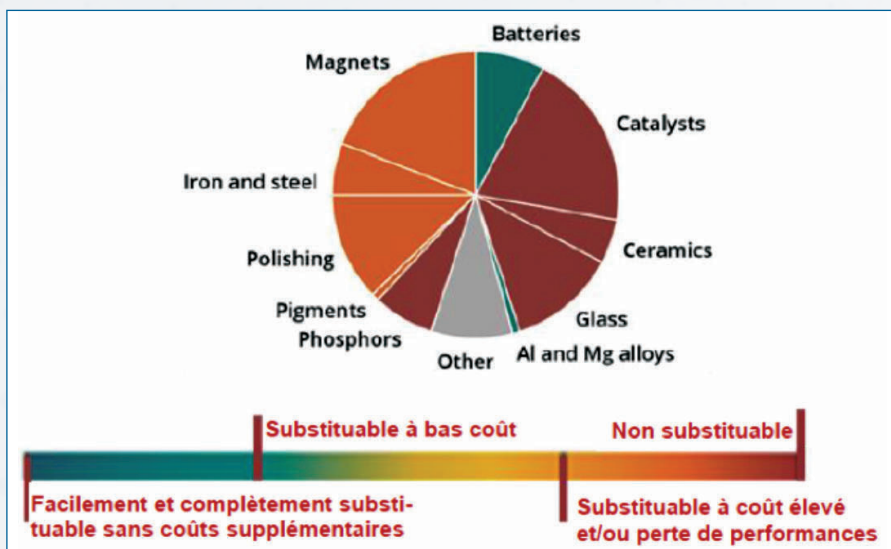


A. Rollat, (2015)

Les industriels utilisent aussi des stratégies de contournement pour diminuer la consommation des terres rares ou de métaux critiques dans leurs produits. Ainsi, l'emploi de Dy dans les aimants permet d'augmenter la température de Curie des aimants permanents, et donc le fonctionnement à plus haute température pour des systèmes de plus en plus puissants. 2 voies sont ainsi étudiées : un dopage mieux contrôlé en Dy, ou bien le refroidissement externe des aimants par une source froide. Tout ceci concourt à une assez large volatilité des cours, avec des effets encore plus complexes, car les terres rares les plus recherchées ne sont pas forcément les plus abondantes, mais elles sont aussi associées à des terres rares plus abondantes.

### Substitution, recyclage, récupération

Afin de mieux envisager la nécessité de recycler les terres rares, si les ressources facilement accessibles venaient à manquer, il est également utile de voir dans quelle mesure il est possible de substituer les terres rares dans diverses grandes familles de procédés courants. La figure ci-après montre que les TR peuvent être remplacées par d'autres composés dans quelques produits spécifiques, mais que leur substitution est souvent encore difficile voire impossible. Si la recherche est très active, au niveau mondial, pour trouver de nouveaux matériaux magnétiques à très hautes performances sans terres rares, les travaux n'ont pas permis à ce jour de démontrer la faisabilité de la production industrielle de matériaux de substitution, même si à l'échelle du laboratoire ou de petites applications des matériaux tels que le nitrure de fer ou les verres métalliques offrent des propriétés intéressantes.



K. Bru, P. Christmann, J.F. Labbé, G. Lefebvre (2015), ERECON (2014)

Pour réduire la dépendance aux importations des terres rares, mais aussi plus globalement pour épargner nos ressources, et protéger l’environnement, le recyclage pourrait apporter une contribution importante. Or, le tableau ci-après montre qu’en 2011, le recyclage des terres était encore très embryonnaire : 1% environ :

Sources of REEs	Process	Technology readiness level	Existing at industrial level
Lamp phosphors (Eu, Tb, Y)	Pre-processing + chemical attack of phosphors and recovery of REEs by precipitation or SX	Mature (still developing)	Yes (Solvay)
Cathode Ray Tube phosphors (Eu)	Chemical attack and solvent extraction	Limited research (declining interest ?)	No
Permanent Magnets (Nd, Pr Sm, Dy)	- Hydrometallurgy	Mature generally but still in lab scale	Investment project (Solvay)
	- Gas-phase extraction	Lab scale	No
	-Reprocessing of alloys to magnets after H <sub>2</sub> decrepitation	Lab scale	No
	-Biometallurgy	Lab-scale	Planned pilot in 2014
NiMH batteries (La, Ce, Pr, Nd)	Ultra High T°C smelting and hydro-pyro-metallurgy	Mature	Yes (UMICORE & SOLVAY)
Optical Glass (La)	Hydrometallurgy	Lab scale	No
Glass polishing powder (Ce)	Chemical process	Lab scale	No

Binnemans & al. (2013)

De nombreux projets, portés par des partenariats associant souvent des industriels et le secteur académique se sont donc attaqués au recyclage des terres rares. Ainsi le Brgm est engagé dans divers projets de recyclage des terres rares, à partir de déchets miniers (projet



Enviree), de déchets industriels (projet Valoplus, poudres luminescentes, projet Extrade, aimants permanents). Pour autant, de nombreux freins au recyclage des terres rares se font encore sentir :

- un système de collecte encore insuffisant pour récupérer les produits en fin de vie;
- un manque d'information des teneurs en terres rares des produits, ceci est notamment le cas en Europe où les produits sont majoritairement importés;
- une quantité souvent faible de terres rares contenues dans certains produits, d'où des difficultés pour la mise en œuvre de procédés de séparation efficaces et rentables;
- la présence d'éléments indésirables dans le concentré de terres rares, car les produits contiennent souvent une grande diversité d'éléments;
- l'évolution rapide des produits à base de terres rares et la volatilité de leurs prix qui rendent difficile toute prospective et augmente le risque financier des projets relatifs à la mise en place d'installation de recyclage;
- Les coûts du recyclage, souvent encore loin d'être couverts par les prix de vente actuels des terres rares;
- dans le cas particulier de l'Europe, une diminution des flux captés en raison de l'exportation de déchets à l'extérieur de l'UE.

Les phosphates d'origine sédimentaire, particulièrement au Maroc sont exploités industriellement et constituent l'une des principales ressources du pays. Après un traitement approprié les phosphates sont principalement utilisés comme engrais. Pour autant, malgré des teneurs relativement faibles, ne dépassant guère 0,1% en oxydes de terres rares, les phosphates sédimentaires marocains pourraient contribuer à une ressource de premier plan au niveau mondial. Malgré les faibles teneurs, la valeur des terres rares contenues dans les phosphates pourrait être équivalente à celle des phosphates eux-mêmes (entre 100 et 200 \$/tonne) (Christmann, 2014, Emsbo et al. 2015). En outre, ces phosphates renferment d'autres métaux comme V, U, F, Ag, Cd, Cr, Mo, As, Se, Sr, Te, Zn. Une meilleure connaissance des teneurs en terres rares, et de leur variabilité selon les faciès rencontrés et les conditions de dépôt d'une part, mais aussi la mise au point de procédés de récupération à bas coût, et compatibles avec les procédés de traitement actuels des phosphates permettrait très certainement d'avancer significativement en vue de leur valorisation.

## Impacts et développement durable

Si l'on souhaite exploiter les terres rares en conciliant les 3 impératifs du développement durable (développer l'économie, développer l'emploi et le niveau de vie, tout en préservant l'environnement...) il importe de prendre des mesures spécifiques à toutes les étapes du cycle. Ainsi l'exploitation minière des terres rares peut être dévastatrice pour l'environnement, notamment en cas d'exploitation par le biais de mines à ciel ouvert, ayant très souvent des impacts très forts. De nombreux gisements contiennent du thorium, élément radioactif (émetteur  $\alpha$  de faible intensité dont les poussières ne doivent pas être inhalées) associé aux terres rares. Le thorium n'ayant guère d'applications industrielles à ce jour, ses résidus doivent être traités pour éviter leur dispersion éolienne, dans l'eau ou les sols. L'exploitation des argiles ioniques du sud de la Chine nécessite la déforestation des zones exploitées et la mise à nu des argiles latéritiques. Les terres rares sont extraites des argiles soit par lixiviation en tas soit par lixiviation in situ, par injection d'une solution de sulfate d'ammonium ou de chlorure de sodium, qui extrait les terres rares. La solution chargée en terres rares est ensuite récupérée

à l'aide de drains horizontaux, plus bas dans la pente. Cette méthode d'exploitation conduit à d'importants problèmes de pollution d'eaux souterraines, à l'érosion et à la mort des sols, ainsi qu'à la désertification durable des zones affectées. Il faut aussi considérer la problématique des rejets toxiques dans l'environnement liés aux traitements des minerais, bien trop souvent encore déversés sans précaution, faute d'encadrement réglementaire approprié, ou de volonté politique pour appliquer les prescriptions réglementaires. De plus, les lanthanides partageant de nombreuses similitudes atomistiques avec les éléments du groupe des actinides, les minéraux de terres rares seront très fréquemment associés au thorium et/ou à l'uranium. La présence de ces éléments radioactifs constitue ainsi un frein au développement des projets miniers. En effet, la radioactivité va suivre toutes les étapes du processus d'enrichissement des minerais jusqu'aux procédés métallurgiques. Ces minéraux et éléments radioactifs constituent ainsi un déchet qui devra être rigoureusement géré. En outre, la toxicité et l'éco-toxicité des terres sont encore très mal connues. Il n'existe pas de valeur toxicologique de référence. Ceci est dû au fait que leur exploitation est relativement récente, et à jusqu'à présent concerné des tonnages et teneurs somme toute assez modestes.

En conséquence, si les activités minières, mais aussi le recyclage se développent, les impacts sanitaires et environnementaux doivent être mieux évalués, même si les expositions aux terres rares resteront faibles, compte tenu de leur faible mobilité environnementale

### **Conclusions et Perspectives**

Les TR restent des métaux stratégiques, nécessaires à de nombreux secteurs technologiques. La demande, même parfois fluctuante, liée à des percées technologiques, ou à des approches de substitutions restera soutenue. L'offre est actuellement globalement supérieure à la demande et les prix sont encore à la baisse après l'éclatement de la bulle de 2011. Le monopole de la Chine et les incertitudes géopolitiques font peser des menaces sur la sécurité d'approvisionnement à moyen et long terme : la recherche de nouvelles réserves en dehors de Chine reste une priorité stratégique, tout en sachant que la Chine convoite également ces réserves. La mise en production de nouvelles mines et unités de traitement nécessite des investissements et des délais importants auxquels peu d'investisseurs s'intéressent, ce qui augmente les risques de pénurie brutale. Le recyclage est encore souvent immature et non-économique et ne concerne que des flux marginaux. Les conditions économiques actuelles ne sont favorables à des investissements massifs du secteur privé dans le développement de nouvelles ressources. Dans tous les pays les exigences des parties prenantes pour limiter les impacts et risques se développent et pourront modifier les marchés. Pour parer les risques et incertitudes sur le moyen/long terme, les Etats doivent déployer des efforts pour :

- identifier des ressources et réserves, primaires en relançant l'exploration minière, grâce à des infrastructures géologiques fortes;
- Continuer à rechercher et développer les procédés de recyclage ou d'exploitation de ressources non conventionnelles (phosphates sédimentaires), en essayant d'en améliorer la rentabilité et la faisabilité économique;
- Investir sur des technologies minimisant les impacts environnementaux et les risques sanitaires;
- Entretenir une veille active sur les évolutions technologiques pouvant entraîner des évolutions de la demande, et les évolutions politiques et économiques pouvant influencer l'offre, c'est ce que l'on dénomme «l'Intelligence Minérale».

## Remerciements

Ce travail a grandement bénéficié des relectures critiques et des conseils des collègues suivants du Brgm: Johann Tuduri, Patrice Christmann, et Jean-François Labbé.

## Références

K. Binnemans, P.T. Jones, B. Blanpain, T. Van Gerven, Y. Yang, A. Walton, & M. Buchert, (2013) - Recycling of rare earths: a critical review, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 51, pp. 1-22.

K. Bru, P. Christmann, J.F. Labbé, G. Lefebvre (2015) Panorama 2014 du marché des Terres Rares, Rapport public BRGM/RP-65330-FR Novembre 2015, 193p.

P. Christmann (2014) .“SYMPHOS 2013”, 2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry A forward look into rare earth supply and demand: a role for sedimentary phosphate deposits? *Procedia Engineering* 83 ( 2014 ) 19 – 26.

F. Coppin, G. Berger, A. Bauer, S. Castet, M. Loubet (2002) Sorption of lanthanides on smectite and kaolinite. *Chemical Geology*, 182, 57-68.

EIP / EUROPEAN INNOVATION PARTNERSHIP ON RAW MATERIALS (2016) Strategic Evaluation Report 2015, First draft presented to the EIP Sherpas on 13/06/2016.

P. Emsbo, P. I. McLaughlin, G. N. Breit, E. A. du Bray, A.E. Koenig (2015) Rare earth elements in sedimentary phosphate deposits: Solution to the global REE crisis? *Gondwana Research* 27 (2015) 776–785.

ERECON (2014) - Strengthening the European Rare Earths Supply-Chain, Milan Conference Draft, oct 2014, 82 p. Disponible en ligne : [http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon/index_en.htm).

I. Kawabe, (2014) Stability constants of lanthanide(III)-EDTA complex formation and Gd-break with tetrad effect in their series variation. <http://ir.nul.nagoyau.ac.jp/jspui/handle/2237/20251>.

ONHYM, (2008) Brochure Glibat Lahfouda Carbonatites, (South Provinces, Morocco) 4 p.

A. Rollat, (2015) The Rare Earths Market Equilibrium between demand and supply. Aster Project final conference, Orleans, 24/4/2015.

Roskill Information Services (2015) - Rare Earths: Market Outlook to 2020, 15<sup>th</sup> Edition 2015, 337 p., 2 app.

M. Treuil et J.L. Joron, (1998). Abondances et lois de distribution des éléments chimiques et de leurs isotopes, In «Introduction à la Géochimie et ses Applications, tome I», CEA Université Pierre et Marie Curie, Collection Enseignement.,

J. Tuduri, N. Charles, O. Pourret, D. Guyonnet, A. Rollat, J. Melleton, K. Goodenough, (2015) Where to find rare earth primary resources in continental Europe & Greenland. Aster Project final conférence, Orléans, 24/4/2015.

## IV- Table ronde : Débat et recommandations

La table ronde, qui a été organisée à l'occasion du séminaire, a porté sur les «Métaux rares : Quelle stratégie pour le Maroc? Elle a été animée par un chercheur universitaire, et des représentants de Managem, de l'ONHYM, de l'OCP, du Ministère de l'Industrie, et de R&D-Maroc et du BRGM (France).

La discussion, fructueuse sur le sujet, a permis d'aborder :

- La formation.
- L'état de l'art de la recherche scientifique.
- Les gisements existants ou potentiels qui demandent à être valorisés.
- La présence des éléments stratégiques dans les phosphates qui sont de grandes valeurs ajoutées.

Les principales recommandations retenues au terme de la table ronde sont les suivantes:

### 1- Formation

- ❖ Renforcer la formation sur les Métaux stratégiques en Licence et Master;
- ❖ Privilégier le partenariat public-public et public-privé;
- ❖ Créer des Masters spécifiques dédiés aux métaux stratégiques communs entre la Géologie, la Chimie des matériaux,...
- ❖ Allouer des moyens à l'organisation de TP en laboratoire et sur le terrain;
- ❖ Faciliter le déplacement des étudiants pour des stages dans le milieu industriel.

### 2- Recherche scientifique

- Orienter les recherches scientifiques vers les thèmes porteurs et travailler en synergie avec le tissu industriel marocain et les grandes entreprises nationales dans le domaine (OCP, ONHYM, Managem,...).
- Les thèmes de recherche proposés sont :
  - ❖ Extraction des métaux stratégiques (TR,...) des phosphates;
  - ❖ Recherches géologiques et minéralogiques :
    - Exploration d'autres régions du Maroc;
    - Connaissance géologique à 3D et en profondeur des gisements.

- Echantillonnage, forages, ...
- Valorisation des gisements polymétalliques découverts;
- Suivi de l'évolution des technologies de l'exploration en assurant une veille technologique.
- ❖ Applications des propriétés optiques, catalytiques, magnétiques, électroniques, dans les aimants, alliages métalliques;
- ❖ Relation avec l'environnement :
  - Etude de la toxicité des TR et autres métaux et leur écotoxicité;
  - Substitution des TR en créant d'autres matériaux similaires plus performants;
  - Extraction et recyclage des déchets électroniques, ...
- ❖ Utilisation des métaux stratégiques dans l'industrie de l'automobile et de l'aéronautique, ... ;
- ❖ Proposer au MESRSFC, MEME, à l'AH2ST, de lancer un appel à projets de recherche ouvert dans le domaine des métaux stratégiques et terres rares auprès des chercheurs et des industriels pour :
  - ✓ Identifier les compétences et les besoins;
  - ✓ Retenir les projets pertinents à soutenir;
  - ✓ Créer un réseau national et en confier l'animation à un couple, industrie/ académie.
- ❖ Lancer un appel à candidature pour des chaires de recherche dans le domaine des métaux stratégiques et Terres rares;
- ❖ Lancer un appel aux entreprises du secteur pour des propositions de sujets de thèses à financer conjointement par les entreprises et les pouvoirs publics.

### **3- Valorisation de la recherche / Développement industriel :**

- ❖ Développer un «Savoir faire» par la création et le développement d'une unité pilote d'extraction et de séparation des terres rares :
  - A moyen et long termes, création d'une unité de production;
  - Le Maroc peut, à long terme, construire des installations industrielles pour l'extraction des TR pour la sous-traitance.

- ❖ Créer un fonds d'accompagnement pour la recherche et la valorisation des métaux stratégiques à l'instar de ce qui se fait en informatique, dans le solaire», ...

#### **4- Création de banques de données sur :**

- ❖ Les thèmes de recherche développés au Maroc;
- ❖ les équipes et chercheurs dans ce domaine;
- ❖ Les techniques et les moyens matériels existants.

#### **5- Coopération :**

- ❖ Nationale :
  - Création d'un réseau national «Métaux stratégiques»;
  - Créer des unités mixtes de recherche entre universités et grands groupes nationaux du domaine;
  - Création d'une chaire «Terres rares».
- ❖ Internationale :
  - Coopération Nord/Sud; Sud/Sud.

#### **6- Suivi du séminaire «Métaux stratégiques» :**

- ❖ Organiser régulièrement des manifestations nationales et internationales sur la thématique en collaboration avec les chercheurs universitaires et les grands organismes nationaux du domaine.

