

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

UNIVERSITE Dr. TAHAR MOULAY SAIDA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Licence

Spécialité : **PHYSIQUE**

Présente par : saidi Yacine

Guendouz Mimoun

Sur le thème

LES TERRES RARES

M^{ed} **Benmeddah Nabila** Maîtrise de Conférences B (Université de Saïda) Encadreur

Année Universitaire 2014 - 2015



dédicace

Nous dédions ce travail à :

A nos très chers parents

A nos sœurs et mes très chers frères

A tous nos familles

A tous nos amis

A tous nos collègues de la promotion physiques

guendouz mimoun

saidi yacine

Remerciement

Voici venu le moment où nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous ceux qui nous ont aidés et soutenu tout au long de ce travail.

Nous remercions en premier lieu le D^r Benmeddah Nabila, promoteur de ce mémoire. Ces idées, ces conseils et ces critiques m'ont été d'une aide précieuse pour mener ce travail à bien. Au-delà de l'aspect scientifique de nos discussions, nous avons été particulièrement sensibles à leur qualité humaine, à l'excellent climat relationnel qu'il a su établir entre nous et au fait de savoir que je pouvais toujours compter sur lui.

Notre profond remerciement à:

- u L'ensemble des enseignants qui ont participé à ma formation.*
- u Toute la promotion Physiques (2014|2015)*
- u Tous les responsables du département de physique à Saida.*
- u Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.*

saidi yacine

guendouz mimoun

Table des matières

Dédicace

Remerciement

Sommaire

Liste des figures et des tableaux

Introduction générale 4

Chapitre 1 :

Les terres rares

I .1 Qu'est que les « les terres rares » ? 8

I .2 Intérêt des terres rares 10

I .3 Etat naturel 13

Chapitre 2 :

Les propriétés des terres rares

I I .1 Caractéristiques générales 15

I I .1.a Le rayon ionique 17

II.2 Propriétés communes des terres rares	18
II.3 Propriétés fondamentales	19
II.4 Propriétés physiques des terres rares	20
II.5 Propriétés magnétiques des terres rares	20
II.6 Propriétés optiques des terres rares	20
II.7 Propriétés spectroscopiques des terres rares	22
II.8 Conclusion	22

Chapitre 3

Les applications des terres rares

<i>III.1 Application de chaque ETR</i>	<i>25</i>
<i>III.2 Terres rares non séparées</i>	<i>26</i>
<i>III.2.1. Applications</i>	
<i>III.2.1.A. Aimants permanents</i>	<i>27</i>
<i>III.2.1.B. verre</i>	<i>27</i>
<i>III.2.1.C. catalyseurs</i>	<i>28</i>

<i>III.2.1.D. métallurgie</i>	28
<i>III.2.1.E. batterie</i>	28
<i>III.2.1.F. Matériaux céramiques</i>	28
Conclusion générale	29
<i>Bibliographe</i>	30

Liste des figures :

Fig. I.1-Abondance relative des métaux dans l'écorce terrestre

Fig. II.1-Contradiction des lanthanides

Fig.II.2-Localisation des terres rares dans le tableau périodique

Fig. II. 3 –Apparition des composés supraconducteurs.

Fig. III .1 - probabilité de présence des électrons en fonction de leur distance au noyau pour les orbitales 4f, 5s ,5p et 6s des ions trivalents de terre rares (TR ³⁺)

Fig. III .2-Diagramme partiel d'énergies pour les ions LN (III)

Liste des tableaux :

Tab. II.1 –terres rares –des lanthanides, yttrium et scandium

Tab. II.2-nombre atomique vs dimensions

Tab. II .3-Principaux groupes des minerais de terres rares

Tab .II .4-Les configurations électroniques des lanthanides

Tab .II .5.-Rayons ioniques des lanthanides pour différents nombres des coordinations

Tab. III.6- les applications de chaque ETR



introduction

Introduction :

La dénomination « terres rares » est évidemment des plus intrigantes. Les terres rares ne sont pas terres et ne sont pas des métaux rares .ce sont les deux premiers paradoxes. C'est plutôt leur connaissance ou leur extraction métallurgique récente datant du XIX^{ème} et XX^{ème} siècle et leurs disséminations dans des minerais hôtes, eux-mêmes en quantité nom économiquement exploitables et que l'on retrouve qu'en certains endroits du globe, qui a fait que ces métaux soient qualifiés de métaux de terres rares depuis cette époque.

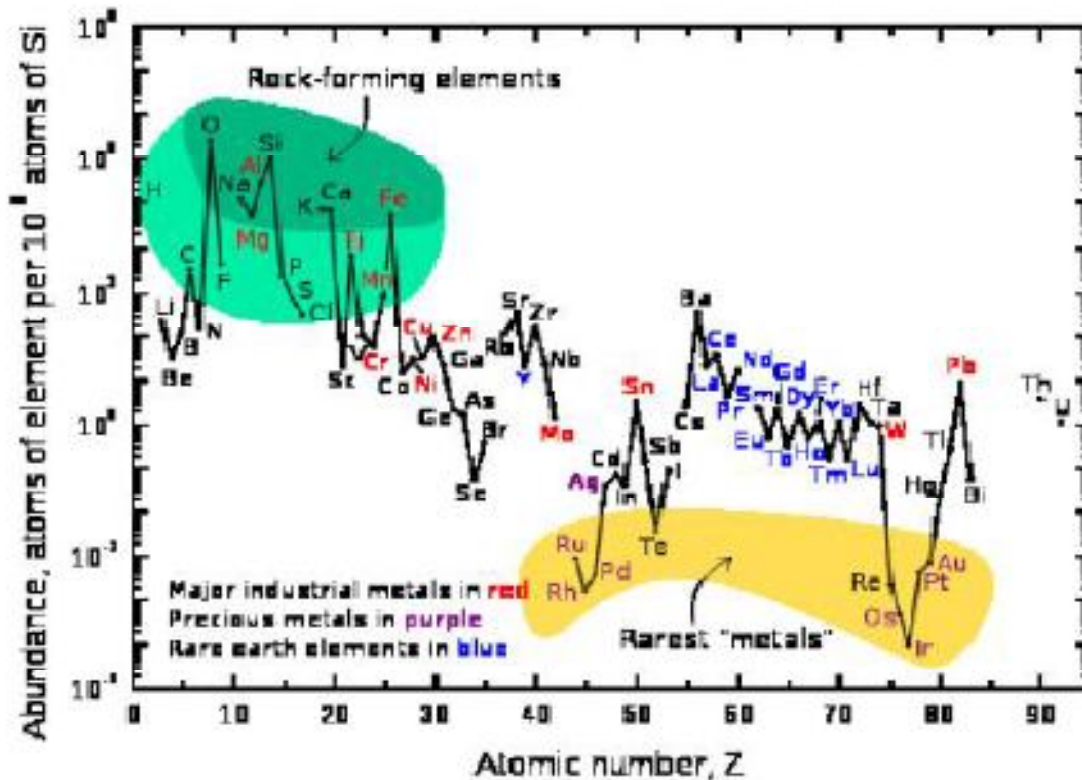
Il s'agit d'un groupe de 17 métaux appelés aussi lanthanides que l'on trouve rarement seuls en concentration économiquement exploitable .il existe plusieurs gisements repartis dans le monde mais beaucoup de ces éléments se rencontrent dans les minerais tels que la bastnaésite et la monazite. Le premier cité contient essentiellement des éléments de terres rares légers ainsi qu'une petite quantité d'éléments lourds tandis que le second contient des légers et une plus grande concentration de lourds.

Les plus grands gisements de bastnaésite se trouvent en chine et aux USA mais d'autres gisements importants se rencontrent au Canada, en Russie, au Malawi et en Norvège. Les gisements de monazite se retrouvent essentiellement en Australie, au Brésil, en Inde, en Afrique du Sud (RSA), en Asie du Sud Est et au Sri Lanka.

A ce jour, 97%de la production est concentrée en Chine qui possède 53 à 57% des réserves mondiales connus.

La présence des terres rares dans l'écorce terrestre est relativement importante paradoxalement. Ils sot en équivalente proportion que les métaux tels que le cuivre, le nickel, le cobalt, le zinc, le chrome et le molybdène. Ils sont plus abondants que l'argent, l'or et le platine.

Fig. I.1-Abondance relative des métaux dans l'écorce terrestre



Tous les métaux de terres rares possèdent des propriétés atomiques, chimiques, électroniques, magnétiques et même parfois optiques particulières au point qu'ils sont souvent difficilement substituables par d'autres composés.

Compte-tenu de leur utilité, la gestion et la production des terres rares suite à leur monopolisation par la Chine fait couler beaucoup d'encre dans le domaine de la sphère stratégique, industrielle et économique. Imaginez que le Japon a lui seul consomme de 17 à 25 % des échanges mondiaux en terres rares. Des industriels occidentaux ont commis l'erreur, pour des raisons diverses allant de la toxicité au coût de production en passant par un yuan chinois faible, de faire stopper l'extraction et d'abandonner depuis plusieurs décennies cette métallurgie que les chinois ont pris soin d'acquiescer, de maintenir, de développer avec le monopole de fait qui est devenu le leur.

Les terres rares entrent dans la fabrication des gammes actuelles de Smartphones et des tablettes tactiles, des télévisions à écran plat, des mémoires d'ordinateurs, la production d'aimants dits de métaux rares, le refroidissement magnétique, la production de batteries à haute densité d'énergie et des aimants pour moteurs particulièrement pour les véhicules hybrides et électriques, les ampoules à basses consommations, les composants d'éoliennes, la fabrication de missiles, de radars et la production des lasers notamment. De nos jours, qui dit écologie sous-entend sans nécessairement le savoir « terres rares » mais la est le troisième paradoxe des terres rares : « dirty ores » for « clean tech », des minerais polluants pour une technologie écologique.

La lutte entre l'énergie nucléaire et l'énergie éolienne n'est d'une certaine façon qu'une lutte des métaux.

La demande mondiale en terres rares est passée de 85000 tonnes par an pour une valeur globale de 500 millions de dollars américaines au début des années 2000 pour une demande de 124000 tonnes ou 1.25 milliards de dollars en 2008.

Chaque apparition d'un nouvel équipement de communication, tout nouveau développement dans la panoplie des Smartphones ou des tablettes numériques suppose un soubresaut dans le sens l'accroissement de l'extraction des terres rares.

Sans le coup de frein de la Chine, la demande pour 2015 était estimée à 200 000 tonnes ou 2.3 milliards de dollars américains. Les fabricants de Smartphones comme Apple et de composants informatiques comme Intel ont déclaré renoncer aux terres rares originaires de zones de conflits tels que de la République Démocratique du Congo, ce qui suppose leur présence et leur exploitation sur ce territoire et d'autres encore.

Comme pour tous métaux stratégiques, les puissances industrielles et économiques comme les Etats-Unis s'inquiètent de ne plus avoir la main mise sur ces métaux et sur leur métallurgie les rendant ainsi dépendants pour leur propre développement, leur sécurité industrielle, militaire et économique et pour illustrer cela les Etats-Unis d'Amérique, le Japon et l'Union Européenne ont porté plainte en commun en mars

2012 contre la Chine auprès de l'organisation mondiale du commerce contre le comportement déloyal de la Chine qui favorise son industrie en faisant des restriction pour l'exportation des terres rares .

Le travail de ce mémoire est partagé en trois chapitres. Dans le premier chapitre, on introduit les terres rares et l'intérêt des lanthanides, Nous rappellerons dans un deuxième chapitre les propriétés et caractéristiques de quelques éléments de terres rares. Dans le dernier chapitre, on montre quelques applications des éléments terres rares.

The image features a decorative border with pink flowers and silver scrollwork. The text is centered in a blue, cursive font. The background is a light pink color with a subtle pattern of small, dark, circular dots.

Généralités sur
les terres
rares

Les terres rares:

I.1 .Qu'est que les « les terres rares » ?

Selon différentes opinions, nous avons affaire à différentes catégorisations

Certains se limiteront aux lanthanides (du lanthane- La au lutétium-Lu) pour définir les terres rares, d'autres comme dit précédemment, concéderont le nombre de terres rares comme étant 17 en associant aux lanthanides (15 éléments des numéros atomiques 57 à 71) les éléments aux propriétés qui leur sont voisines qui sont le scandium Sc. et l'yttrium Y.

Certains ne considèrent pas le prométhium parce qu'il est un produit de la fission nucléaire, un isotope instable de la fission de l'uranium.

Par le fait que les terres rares sont confondues avec les lanthanides, elles sont parfois représentées avec le pseudo-symbole chimique Ln.

Nous avons ainsi les éléments suivants ;

Tab. II.1 –terres rares –des lanthanides, yttrium et scandium

La	Lanthane		Tb	Terbium
Ce	Cérium		Dy	Dysprosium
Pr	Praséodyme		Ho	Holmium
Nd	Néodyme		Er	Erbium
Pm	Prométhium		Tm	Thulium
Sm	Samarium		Yb	Ytterbium
Eu	Europium		Lu	Lutétium
Gd	Gadolinium		Sc	Scandium
			Y	Yttrium

Les terres rares sont constituées de deux sous – groupes, les cériques ou terres rares légers (scandium, lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, prométhium et samarium) et les yttriques ou terres rares lourdes (yttrium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, lutétium)

Tab. II.2-nombre atomique vs dimensions

Symbole	Nombre atomique	Rayon atomique (Å ^o)	Rayon ionique (Å ^o)		
			Ln ²⁺	Ln ³⁺	Ln ⁴⁺
Sc	21	1.641		0.68	
Y	39	1.801		0.88	
La	57	1.877		1.061	
Ce	58	1.82		1.034	0.92
Pr	59	1.828		1.013	0.9
Nd	60	1.821		0.995	
Pm	61	-		(0.979)	
Sm	62	1.802	1.11	0.964	
Eu	63	2.042	1.09	0.95	
Gd	64	1.802		0.938	
Tb	65	1.782		0.923	0.84
Dy	66	1.773		0.908	
Ho	67	1.766		0.894	
Er	68	1.757		0.881	
Tm	69	1.746	0.94	0.869	
Yb	70	1.94	0.93	0.858	
Lu	71	1.734		0.848	

Cette classification en terres rares lourdes et légers est plus complexe que cela ne le paraît car elle est basée sur la dimension du rayon ionique. Il y a une relation inversement proportionnelle entre la dimension du rayon ionique et le nombre atomique (concentration des lanthanides), le rayon ionique diminue avec l'accroissement du nombre atomique.

Le tableau précédent montre qu'en passant du scandium-Sc. au lanthane-La, il y a un accroissement du nombre atomique ainsi que du rayon ionique. Cela est dû au fait que l'addition d'électrons à un plus grand niveau d'énergie surpasse l'effet de contraction résultant de l'augmentation de l'attraction produite suite par une plus grande charge nucléaire. Toutefois, on voit aussi que plus on évolue dans la série des lanthanides, on constate une limitation observée pour les ions aux charges non triplement positives. La contraction observée d'un élément vers un autre est si faible que la variation de dimension entre les lanthanides Ce et Lu n'est que de 0.2Å^o. Cette contraction, toutefois limitée, des rayons atomiques et ioniques est appelée contraction ou contradiction des lanthanides.

L'effet de blindage des électrons diminue selon l'ordre $S > P > D > F$. Dans les lanthanides, l'électron additionnel s'ancre sur la sous-couche 4f et non sur la couche de valence ou la 6^{ème} couche.

La contraction des lanthanides s'effectue parce que chaque accroissement de la charge nucléaire est équilibré par un accroissement de charge électronique. Les caractéristiques directionnelles de l'orbitale 4f poussent les électrons de cette sous-couche à se protéger et ceux des charges nucléaires le font imparfaitement. Ainsi chaque accroissement en charge nucléaire produit une attraction du nuage d'électrons en position extranucléaire et chaque ion rétrécit légèrement comparativement à son prédécesseur.

Fig. II.1-Contraction des lanthanides

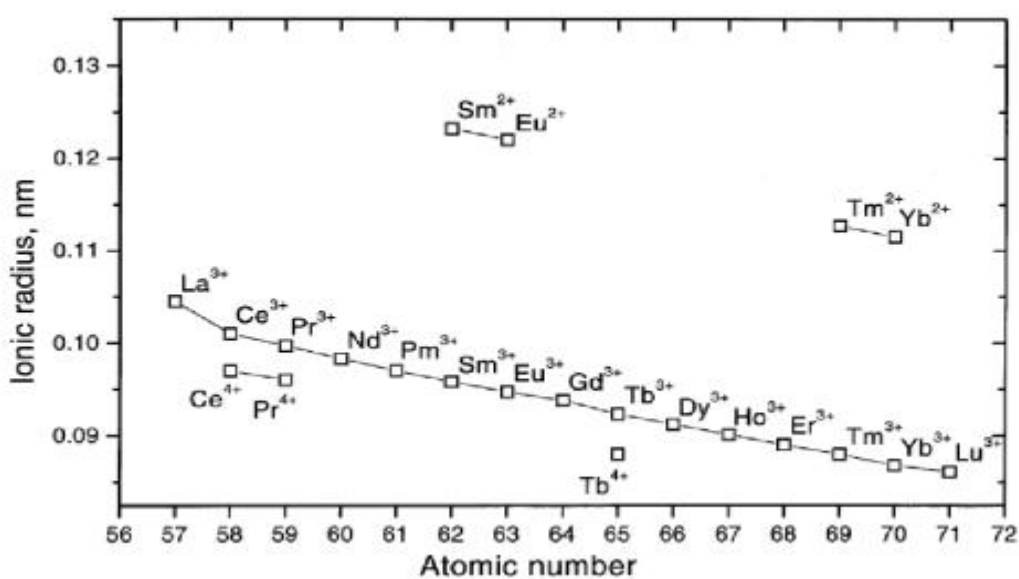
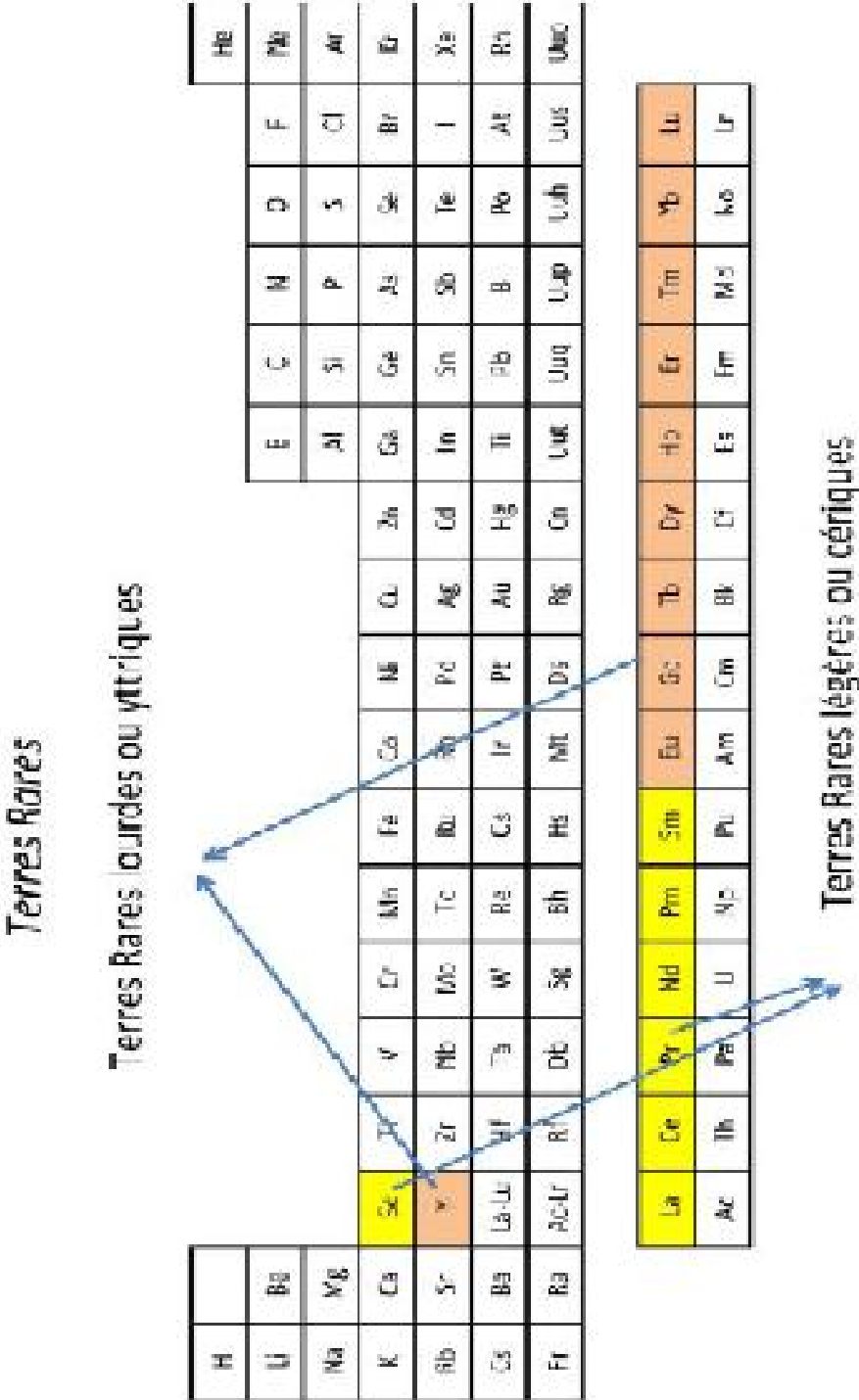


Fig.II.2-Localisation des terres rares dans le tableau périodique



I.2. Intérêt des terres rares :

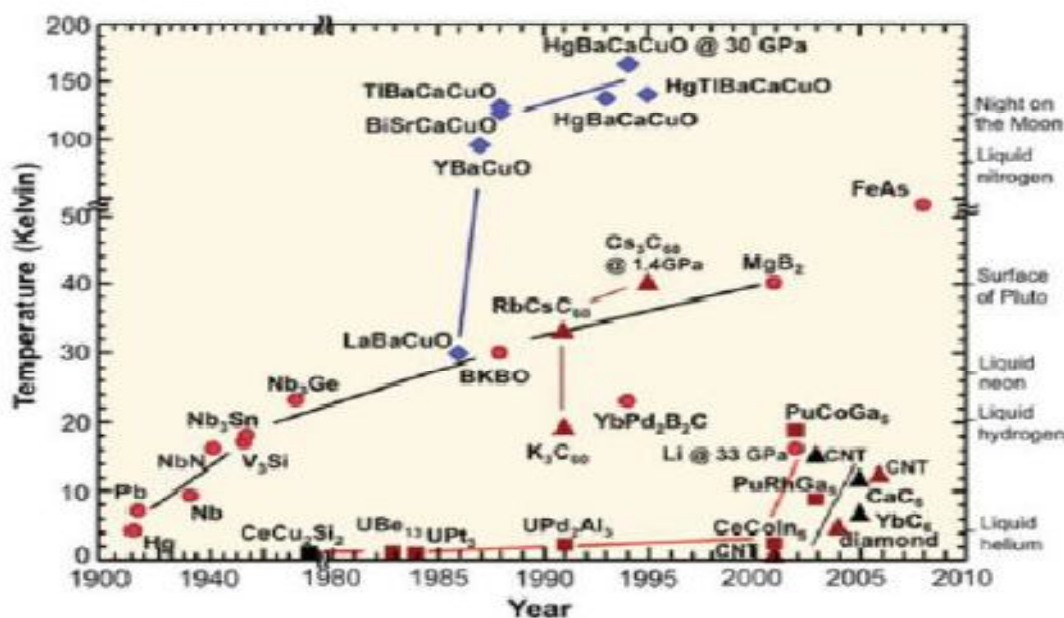
Ce qui rend les terres rares importantes sont leurs propriétés particulières faisant une différence avec les matériaux communs aux points de vue l'amélioration des performances de nombreux alliages ou composés aux points de vue mécanique, électrique, optique ou magnétique notamment.

Une èlionne dotée d'une transmission sans engrenage contient de 400Kg à une tonne de métaux de terres rares , la voiture hybride Toyota Prius nécessite près de 5 Kg de lanthane et 1 Kg de néodyme pour sa fabrication tandis que les appareils numériques continent quelques grammes de ces métaux .le boom des Smartphones et des tablettes numériques a booste la demande et prix des matières premières a connu un bond spectaculaire au débutes années 2010 sans les terres rares , le poids des appareils de téléphones serait de l'ordre de 1 a 2 Kg comme ceux début des 1990.

L'effet magnétocalorique est une propriété qui contribue à qualifier l'utilisation des produits terres rares de comportement écologique. En effet, la non utilisation des gaz tels que les chloro-fluoro-carbures (CFC) proscrits depuis quelques décennies et leurs substituts tels que les hydro-fluoro-carbures , tout aussi toxiques mais moins que le précédent, évite la pollution de la couche d'ozone et réchauffement climatique provoqués par les modes de refroidissement par Emil Warburg en 1881 avec le fer pur , se manifeste par la variation réversible de la température d'un matériaux magnétique sous l'action d'un champ magnétique externe. Dans les années 1926-1927, cette idée d'utiliser la désaimantation que pour atteindre de basses températures a été proposée, indépendamment par Debye et Giaque. Aujourd'hui, la réfrigération magnétique mobilise des composes magnétiques et des fluides permettant l'échange thermique qui ne sont pas néfastes vis- à -vis de l'effet de serre et est, à ce titre, considérée comme une technologie écologique.

Certains éléments de terres rares telles que l'yttrium, le cérium et lanthane, sous forme d'alliages, ont des propriétés supraconductrices et particulièrement a hautes températures, c'est -à- dire au dessus du zéro absolu.

Fig. II. 3 –Apparition des composés supraconducteurs.



On peut citer entre – autres comme matériaux supraconducteurs :

- $LaBaCuO$,
- $CeCu_2Si_2$,
- YbC_6 ,
- $YBa_2Cu_3O_{7-x}$,
- $YbPd_2B_2C$,
- $CeCoIn_5$.

L'ancien dirigeant politique chinois Deng Xiaoping (1904-1997) avait déclaré que moyen – orient disposait du pétrole et que la chine disposait de terres rares montrant la valeur de ces produit et les avantages stratégiques que leur possession pouvait conférer dans des domaines clés. Nous citerons pour l'exemple la technologie des énergies dites propres, la téléphone actuelle et a venir, les batteries, les véhicules hybrides et électriques les aimants permanents, les écrans de télévisions et les moniteurs d'ordinateurs, les lasers et la technologie militaire. Le marche américain importe plus de 1 milliard de dollars de terres rares pour ses industries à tel point que sa possession ou sa carence sont considères comme des enjeux stratégiques alors que la Chine produit 97% des terres rares produits dans le monde

I.3. Etat naturel :

Les terres rares sont présentes dans la nature sous formes d'oxydes, carbonates ou silicates. Elles sont généralement matées entre elles, ce qui, avec leurs propriétés physico-chimiques et électroniques proches, rend particulièrement difficile leur distinction et leur séparation chimique.

Il existe plus de 200 minéraux de terres rares mais les plus abondants sont la monazite et la bastnaésite

La terre rare la plus abondante dans l'écorce terrestre est le cérium (environ 48 ppm) suivie du néodyme (environ 18 ppm) plus abondantes que le cobalt et le nickel.

La monazite, qui est ortho phosphate de terres rares, est souvent un sous-produit du traitement de l'ilménite (minerai de titane- FeTiO_3) exploitée en Australie, en Inde, au Brésil et en Malaisie.

La bastnasite, un fluoro-carbonate (REFCO_3) avec RE = Ce, La, Y riche en terres rares ceriques et parfois en europium est issue de roches carbonatites. Il est répertorié dans le monde un grand nombre de sources carbonatites mais très peu sont actuellement exploitables économiquement. Les gisements exploitables connus et renseignés à ce jour sont Mountain Pass en Californie (USA) exploitée initialement par Molycorp et Baiyun Ebo dans la Mongolie intérieure en Chine. Ce dernier est déclaré comme étant le plus grand du monde.

Les variantes dans ces minerais sont nombreuses en fonction des compositions et des proportions en terres rares contenues.

Bien que la forme reconnue de monazite est $(\text{La, Ce, Y})\text{PO}_4$, on peut distinguer plusieurs formes de monazite ;

- *Monazite-Ce* $(\text{Ce, La, Pr, Nd, Th, Y})\text{PO}_4$
- *Monazite-La* $(\text{La, Ce, Nd, Pr})\text{PO}_4$
- *Monazite-Nd* $(\text{Nd, La, Ce, Pr})\text{PO}_4$
- *Monazite-Pr* $(\text{Pr, Nd, Ce, La})\text{PO}_4$

La loparite, qui est un minerai de columbium et tantale, est rencontrée dans la péninsule de Kola en Russie et la xénotime, qui est un phosphate de terres rares (Y, Ce), est un sous-produit de la cassitérite (minerai d'étain $-\text{SnO}_2$) et se trouve en quantités significatives en Malaisie.

D'autres minerais tels que la cécite, la gadolinite existent en teneurs exploitables.

On trouve en Chine des terres rares dans certaines argiles sous forme d'ions absorbés. Ce sont les sources minérales les plus exploitées.

Tab. II .3-Principaux groupes des minerais de terres rares

Carbonates	
Ancylite-Ce	$\text{SrCe}(\text{CO}_3)_2(\text{OH}) \cdot \text{H}_2\text{O}$
Bastnasite	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Pr})\text{F}(\text{CO}_3)$
Eudialyte-Y	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Pr})\text{F}(\text{CO}_3)$
Lanthanite-Nd	$(\text{Nd}, \text{La})_2(\text{CO}_3)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Limoriite-Y	$\text{Y}_2(\text{SiO}_4)(\text{CO}_3)$
Mckelveyite-(Nd)	$(\text{Ba}, \text{Sr})(\text{Nd}, \text{Ce}, \text{La})(\text{CO}_3)_2 \cdot 4-10\text{H}_2\text{O}$
Parisite-Ce	$\text{Ca}(\text{Ce}, \text{La})_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$
Parisite-Nd	$\text{Ca}(\text{Nd}, \text{Ce}, \text{La})_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$
Synchysite-(Nd)	$\text{Ca}(\text{Nd}, \text{Y}, \text{Gd})\text{CO}_3)_2\text{F}$
Synchysite-Y	$\text{Ca}(\text{Y}, \text{Ce})\text{CO}_3)_2\text{F}$
Tengerite	$\text{Y}_2(\text{CO}_3)_3 \cdot n(\text{H}_2\text{O})$

Oxydes	
Aeschenite-(Nd)	$(\text{Nd}, \text{Ce}, \text{Ca})(\text{Ti}, \text{Nb})_2(\text{O}, \text{OH})_6$
Brannérite	$(\text{U}^{4+}, \text{REE}, \text{Th}, \text{Ca})(\text{Ti}, \text{Fe}^{3+}, \text{Nb})_2(\text{O}, \text{OH})_6$
Euxenite-Y	$(\text{Y}, \text{Ca}, \text{Ce}, \text{U}, \text{Th})(\text{Nb}, \text{Ti}, \text{Ta})_2\text{O}_6$
Fergusonite-Nd	$(\text{Nd}, \text{Ce})(\text{Nb}, \text{Ti})\text{O}_4$
Sc-Ixiolite	$(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti}, \text{Sc}, \text{Fe}, \text{Mn})_4\text{O}_8$
Loparite-Ce	$(\text{Ce}, \text{Na}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Ta}, \text{Fe}^{3+})\text{O}_3$
Samarskite-Y	$(\text{Y}, \text{Fe}^{3+}, \text{U}, \text{Th}, \text{Ca})_2(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_8$

Phosphates	
Britholite-Ce	$\text{Ca}_2(\text{Ca,Ce})_3(\text{SiO}_4, \text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F})$
Britholite-Y	$\text{Ca}_2(\text{Y,Ca})_3(\text{SiO}_4, \text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F})$
Florencite-Nd	$(\text{Nd,La,Ce})\text{Al}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$
Kolbeckite	$\text{ScPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Monazite	$(\text{Ce,La,Nd,Th})(\text{PO}_4)$
Rhabdophane-(Nd)	$(\text{Nd,Ce,La})(\text{PO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$
Xenotime	$\text{Y}(\text{PO}_4)$

Silicates	
Allanite-Ce	$(\text{Ca,Ce})(\text{Al}_2, \text{Fe}^{2+})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$
Askagenite-Nd	$(\text{Mn}^{2+}, \text{Nd})(\text{Al}_2, \text{Fe}^{3+})(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}_2$
Bazzite	$\text{Be}_3\text{Sc}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$
Britholite-Y	$\text{Ca}_2(\text{Y,Ca})_3(\text{SiO}_4, \text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F})$
Cérite-Ce	$(\text{Ca,Ce})_9(\text{Fe, Mg})(\text{SiO}_4)_3(\text{HSiO}_4)(\text{OH})_3$
Gadolinite-Y	$\text{Y}_2\text{Fe}^{2+}\text{Be}_2(\text{Si}_2\text{O}_{10})$
Kainosite	$\text{Ca}_2(\text{Ce,Y})_2(\text{SiO}_4)_3\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Limoriite-Y	$\text{Y}_2(\text{SiO}_4)(\text{CO}_3)$
Magbasite	$\text{Kba}(\text{Al,Sc})\text{Fe}^{2+}\text{Mg}_5\text{F}_2\text{Si}_6\text{O}_{20}$
Mosandrite	$\text{Na}_2\text{Ca}_4(\text{REE})(\text{Si}_2\text{O}_7)_2\text{OF}_3$
Sc-Perrierite	$(\text{Ce, Ca, Th})_4(\text{Fe}^{2+}, \text{Sc})\text{Fe}^{3+}_2(\text{Ti, Fe}^{3+})_2(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}_8$
Thortveitite	$(\text{Sc,Y})_2\text{Si}_2\text{O}_7$

A decorative border surrounds the text, featuring pink flowers and silver scrollwork. The border is composed of a dark, possibly black or dark brown, line that forms a frame around the text. On the left side, there is a vertical strip of silver, ornate scrollwork. Pink flowers are scattered throughout the border, particularly on the left and right sides. The background is a light, warm color, possibly cream or light beige, with a subtle pattern of small, dark, circular dots.

*Propriétés des
Terres rares*

II. Propriétés des terres rares :

II.1 .Caractéristiques générales :

Les éléments 4f du tableau périodique compris entre le lanthane ($Z = 57$) et le lutécium ($Z = 71$) définissent la série des lanthanides, et, lorsque celle-ci est complétée par le scandium ($Z = 21$) et l'yttrium ($Z = 39$), on appelle cette série les terres rares, dont les configurations électroniques sont rassemblées dans le tableau 1. L'évolution scientifique et technique dans le domaine de la connaissance des propriétés des terres rares et dans les méthodes permettant de les séparer a été telle qu'elles sont devenues aujourd'hui des éléments essentiels de notre vie quotidienne. Le développement des systèmes de haute technologie où la spécificité des propriétés est un élément nécessaire et permet de prévoir que le rôle joué par les terres rares ne cessera de prendre de l'importance. Les progrès effectués ces dernières années tant dans les techniques industrielles de séparation qu'au niveau de la qualité des produits (pureté, morphologie, réactivité) et de la connaissance des utilisations possibles, permettent de répondre aux besoins nouveaux et pointus du marché et doivent contribuer à donner à ces éléments un rôle essentiel dans de multiples applications industrielles présentes ou à venir.

Tableau 1 : les configurations électroniques des lanthanides :			
lanthanide	Configuration atomique	Configuration Ln+3	Degrés d'oxydation
Lanthane, La	[Xe] 5d ¹ 6s ²	[Xe]	3
Cérium, Ce	[Xe] 4f ¹ 5d ¹ 6s ²	[Xe] 4f ¹	3-4
Praséodyme, Pr	[Xe] 4f ³ 5d ⁰ 6s ²	[Xe] 4f ²	3-4
Néodyme, Nd	[Xe] 4f ⁴ 5d ⁰ 6s ²	[Xe] 4f ³	2-3-4
Prométhium, Pm	[Xe] 4f ⁵ 5d ⁰ 6s ²	[Xe] 4f ⁴	2-3
Samarium, Sm	[Xe] 4f ⁶ 5d ⁰ 6s ²	[Xe] 4f ⁵	2-3
Europium, Eu	[Xe] 4f ⁷ 5d ⁰ 6s ²	[Xe] 4f ⁶	2-3
Gadolinium, Gd	[Xe] 4f ⁷ 5d ¹ 6s ²	[Xe] 4f ⁷	3
Terbium, Tb	[Xe] 4f ⁹ 5d ⁰ 6s ²	[Xe] 4f ⁸	3-4
Dysprosium, Dy	[Xe] 4f ¹⁰ 5d ⁰ 6s ²	[Xe] 4f ⁹	2-3-4
Holmium, Ho	[Xe] 4f ¹¹ 5d ⁰ 6s ²	[Xe] 4f ¹⁰	2-3
Erbium, Er	[Xe] 4f ¹² 5d ⁰ 6s ²	[Xe] 4f ¹¹	3
Thulium, Tm	[Xe] 4f ¹³ 5d ⁰ 6s ²	[Xe] 4f ¹²	2-3
Ytterbium, Yb	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ⁰ 6s ²	[Xe] 4f ¹³	2-3
Lutétiun, Lu	[Xe] 4f ¹⁴ 5d ¹ 6s ²	[Xe] 4f ¹⁴	3

II.1.a Le rayon ionique :

Les lanthanides présentent une diminution du rayon ionique lorsque le numéro atomique (Z) des éléments augmente. Cette contraction monotone [2,3] du rayon ionique s'explique par l'augmentation de la charge nucléaire effective lorsqu'un électron est ajouté dans les orbitales f profondes. L'effet d'écran d'un électron $4f$ sur un autre électron de valence est faible entraînant une contraction progressive des orbitales $5s$, $5p$ et $6s$, $6p$ vers le cœur.

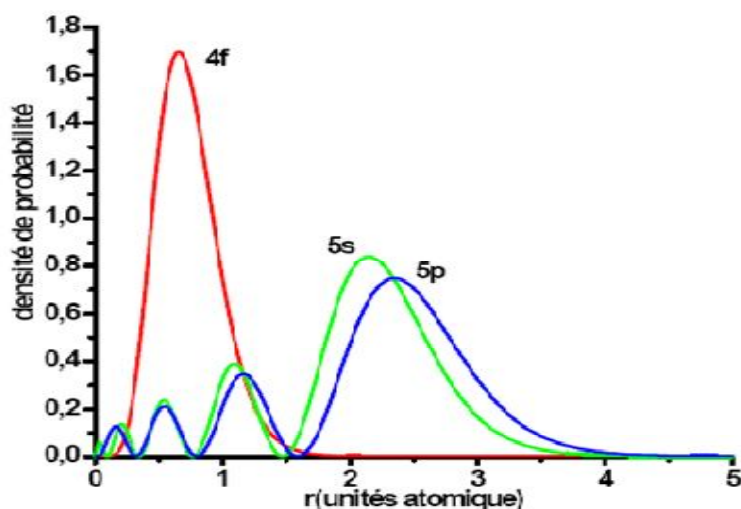


Figure .I.1 : probabilité de présence des électrons en fonction de leur distance au noyau pour les orbitales $4f$, $5s$, $5p$ et $6s$ des ions trivalents de terre rares (TR^{3+})

La couche $4f$ présente également une particularité intéressante : son extension spatiale est moins importante que les deux couches $5s$ et $5p$ qui lui sont pourtant inférieures en énergie (Figure 1). Ce confinement de l'orbitale $4f$ est d'autant plus important que l'on avance dans la série des lanthanides. On parle de contraction lanthanidique. Les électrons de la couche $4f$ sont donc protégés des influences électrostatiques extérieures. Ce blindage électrostatique explique aussi la réactivité chimique peu différenciée des lanthanides et les difficultés de séparation et de purification qui en ont longtemps résulté.

Tableau 1 : Rayons ioniques (en Å) des ions lanthanides (III) pour différents nombres de coordination						
lanthanide	CN=6	CN=7	CN=8	CN=9	CN=10	CN=12
La	1.036	1.100	1.160	1.216	1.270	1.360
Ce	1.010	1.070	1.143	1.196	1.250	1.340
Pr	0.990		1.126	1.179		
Nd	0.983		1.109	1.163		1.270
Pm	0.970		1.093	1.144		
Sm	0.958	1.020	1.079	1.132		1.240
Eu	0.947	1.010	1.066	1.120		
Gd	0.938	1.000	1.053	1.107		
Tb	0.923	0.980	1.040	1.095		
Dy	0.912	0.970	1.027	1.083		
Ho	0.901		1.015	1.072	1.120	
Y	0.900	0.960	1.019	1.075		
Er	0.890	0.945	1.004	1.062		
Tm	0.880		0.994	1.053		
Yb	0.868	0.925	0.985	1.042		
Lu	0.861		0.977	1.032		
Sc	0.745	0.870				

II.2. Propriétés communes des terres rares:

Les propriétés des terres rares étant si proches, elles ont tendance à avoir un même comportement et le challenge réside dans le développement de leur séparation mutuelle qui est particulièrement complexe la petite différence de propriétés est due à leur configuration électronique externe.

Quelques propriétés communes aux terres rares

- Les métaux de terres rares ont un éclat argenté ou gris.
- Leur éclat est vif mais il ternit rapidement dans l'air.
- Ils sont moins en moins mous au fur et à mesure que leur numéro atomique augmente.
- Les métaux ont une grande conductivité électrique.
- Leurs températures d'ébullition et de fusion sont élevées.
- Ils réagissent violemment avec des non métaux et brûlent dans l'air.
- Leurs nombreuses propriétés communes les rendent difficilement séparables et peu aisés à distinguer.
- Leurs produits de solubilités sont proches.
- Ils forment entre eux de nombreux complexes.

Les terres rares existent combinées dans les minerais.

II.3 Propriétés fondamentales :

Leur propriété fondamentale est qu'ils ont des électrons « f » qui se trouvent être, à cause des paramètres associés à leur fonction radiale ($n=4$) profondément enfouis au cœur de l'atome.

Les électrons 4f sont plus proches du noyau de l'atome et sont relativement insensibles à la nature de la liaison chimique y compris dans l'état condensé (liquide ou solide). La conséquence est qu'ils conservent à l'état condensé les propriétés des atomes libres. En pratique, un atome libre dans un plasma, excité dans un arc électrique, va émettre toutes sortes de raies lumineuses. Dans le cas qui nous intéresse, cela se traduit par le fait qu'on observe pour les lanthanides, en milieu solide, ou même liquide, en émission et en absorption, des raies fines qui peuvent être mesurées avec une très grande précision. Il faut ajouter que ce sont les seuls éléments de la classification périodique de Mendeleïev qui ont ces propriétés.

Voilà ce qui fait l'importance des « Terres Rares » car on ne trouvera jamais le moyen de faire des transitions monochromatiques avec des raies aussi fines.

Autre point important : à chaque « Terre Rare » correspond un niveau de base qui commande les propriétés magnétiques de l'atome. A partir de là on peut fabriquer notamment des alliages qui auront des propriétés magnétiques uniques. On pourra en particulier mettre au point des aimants permanents de très grande valeur.

II.4. Propriétés physiques des terres rares :

Ce sont des métaux électropositifs trivalents brillants avec un éclat argenté qui ternissent rapidement lorsqu'ils sont exposés à l'air libre. Ils sont de moins en moins mous au fur et à mesure que leur numéro atomique augmente. Leur température de fusion et leur température d'ébullition sont élevées. Ils réagissent violemment avec la plupart des non-métaux et brûlent dans l'air.

Ces éléments ne sont pas rares dans le milieu naturel, le cérium étant le 26^{ème} élément le plus abondant de la croûte terrestre. Le néodyme Nd est plus abondant que l'or, et le thulium Tm est plus abondant que l'iode. Les lanthanides forment une série chimique très homogène caractérisée par le remplissage progressif de la sous-couche électronique 4f, à l'exception du lutécium Lu qui appartient au bloque d. Ces éléments sont tous des terres rares. Ils sont chimiquement très similaires au lanthane, d'où leur nom.

On les trouve naturellement sous forme de cations trivalents, à l'exception du cérium (qui présente les états +3 et +4) et de l'euprium Eu (qui présente les états +2 et +3). En raison de leur similitude poussée, on les représente souvent indistinctement avec le pseudo-symbole chimique Ln, désignant n'importe quel lanthanide.

Les lanthanides plus lourds que Ce atteignent difficilement le degré d'oxydation +4. Ceci s'explique par le fait que les orbitales f sont relativement internes: il est difficile d'enlever des électrons f, ces électrons sont également peu disponibles pour former des liaisons covalentes, ce qui explique que les ions des éléments de ces séries, forment des complexes sans préférence quant à leur géométrie de coordination. D'une manière générale, les lanthanides sont très électropositifs.

Le rayon ionique des cations décroît tous au long de la période en vertu du phénomène appelé contraction des lanthanides: l'efficacité d'écrantage du noyau par les électrons d'une orbitale f est en effet assez faible (l'ordre d'efficacité décroissante par orbitale

atomique étant $s > p > d > f$) et ne compense pas la charge croissante du noyau atomique quand le numéro atomique augmente.

II.5. Propriétés magnétiques des terres rares :

Tous les ions lanthanides, à l'exception du La(III) et du Lu(III) sont paramagnétiques. Parmi eux, l'ion Gd(III) est particulièrement intéressant :

- ses sept électrons non appariés ($S = 7/2$) lui confèrent un moment magnétique élevé ;

- son temps de relaxation électronique est long ($T_{1e} > 10^{-9}$ s) en comparaison des autres ions

Ln(III) paramagnétiques ($\sim 10^{-13}$ s pour Eu^{3+} , Yb^{3+} et Dy^{3+}) du fait de son état orbital S symétrique.

Ces deux propriétés sont à l'origine d'un couplage dipolaire efficace entre le moment magnétique du Gd(III) et le moment magnétique des protons à proximité qui induit une augmentation de la vitesse de relaxation des protons. De ce fait, les complexes de Gd(III) sont largement utilisés comme agents de contraste pour l'Imagerie par Résonance Magnétique.

II.6. Propriétés optiques des terres rares :

Les propriétés sont liées à leur structure électronique, les niveaux $5p$ et $5s$ saturés protégeant les niveaux $4f$ qui sont alors pratiquement insensibles aux effets électrostatiques du champ cristallin. Les transitions $4f-4f$ se produisent alors, sans effets perturbateurs, comme dans l'ion libre et les absorptions et émissions sont presque monochromatiques.

Les terres rares sont alors utilisées comme luminophores : sous l'effet d'une excitation, ils émettent de la lumière. Ces propriétés de luminescence, d'abord étudiées par Georges Urbain et William Crookes ont conduit à des applications industrielles fantastiques ces 40 dernières années.

II.7. Propriétés spectroscopiques des terres rares :

Tous les ions lanthanides, exceptés La(III) et Lu(III) de configurations électroniques $4f$ et $4f$ respectivement sont luminescents. Les transitions $f-f$ sont théoriquement interdites par les règles de sélection (règle de Laporte et règle de spin).

En pratique, le couplage des états électroniques avec les états vibrationnels et les mélanges de fonctions d'ondes de différents nombres quantiques J ou de différentes parités atténuent cette interdiction. De ce fait, les ions lanthanides ont des coefficients d'extinction molaire faibles (entre 1 et $10 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$) et certains ions présentent une durée de vie de luminescence longue (de l'ordre de la milliseconde pour les ions Eu(III) et Tb(III)).

L'influence du blindage des électrons $4f$ et le champ cristallin sur les orbitales $4f$ est faible, ainsi, la longueur d'onde d'émission du métal est indépendante du ligand organique utilisé et n'est pratiquement pas déplacée. Par ailleurs, l'absorption et l'émission sont quasi monochromatiques.

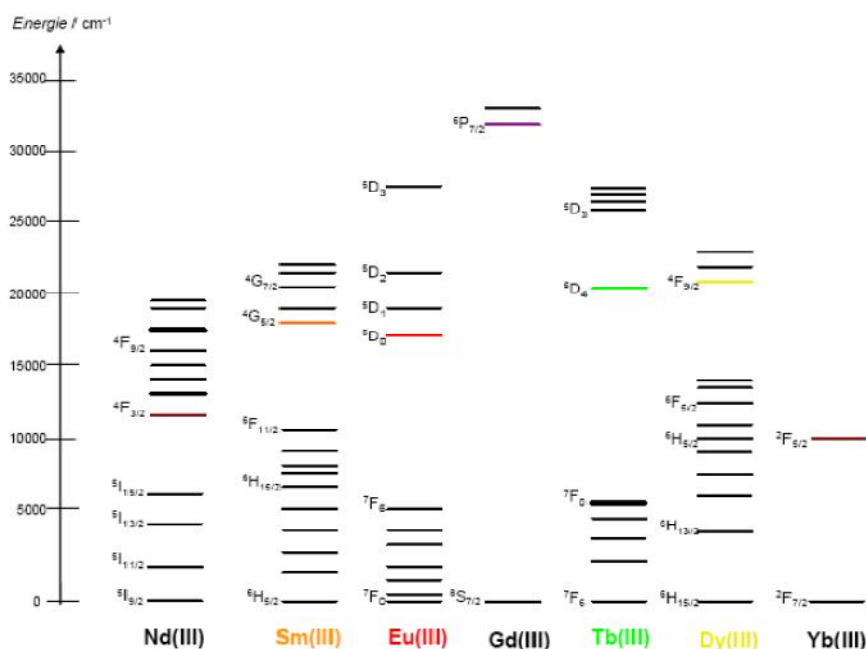


Figure I-6 : Diagramme partiel d'énergies pour les ions Ln(III) aqueux : principaux niveaux luminescents (en couleur) et leurs niveaux fondamentaux. [19]

L'efficacité de la luminescence des ions Ln(III) est liée à la différence d'énergie entre les niveaux excités et le niveau fondamental : plus la différence d'énergie est faible, plus les processus de retour à l'état fondamental non radiatifs sont probables. Le diagramme partiel d'énergies de certains ions Ln(III) aqueux est représenté sur la Figure I-6.

Les ions Tb(III) et Eu(III) émettent dans le visible (vert $\lambda_{em} = 550$ nm et rouge $\lambda_{em} = 620$ nm, respectivement). De ce fait, ce sont les ions les plus utilisés comme sondes luminescentes pour l'analyse et le diagnostic biomédical. Dans une moindre mesure, Sm(III) (orange $\lambda_{em} = 590$ nm) et Dy(III) (jaune-orange $\lambda_{em} = 570$ nm) sont également employés. L'utilisation des ions émettant dans l'infrarouge (Nd(III) : $\lambda_{em} = 1065$ nm, Er(III) : $\lambda_{em} = 1550$ nm et Yb(III) : $\lambda_{em} = 978$ nm), délaissée il y a quelque temps, est aujourd'hui en plein essor.

Initialement utilisés dans le développement de fibres optiques, de lasers et d'amplificateurs pour les télécommunications ils suscitent aujourd'hui un intérêt remarquable pour le développement de sondes luminescentes pour l'analyse biomédicale. En effet, une émission dans l'infrarouge permet de s'affranchir de l'absorption de l'eau et du milieu biologique qui deviennent transparents aux longueurs d'ondes supérieures à 900 nm. Cela permet ainsi d'explorer des tissus beaucoup plus profonds (20 cm au lieu de quelques millimètres).

L'ion Gd(III), en revanche, est peu utilisé car son émission dans l'ultraviolet interfère avec les processus d'absorption ou d'émission des composés organiques et biologiques.

II.8. Conclusion :

Toutes ces propriétés particulières (physique, électronique, magnétique et optique...etc.) des métaux des terres rares associées à leur versatilités, nous devons constater sans surprise que les terres rares ont eu une utilisation multiple en les sortant de l'obscurité pour leur donner une importance technologique, environnementale et économique considérable.



A decorative border surrounds the central text. It features a silver-colored metal scrollwork frame with several bright pink flowers attached to it. The background is a light, textured surface with a subtle pattern of small dark dots.



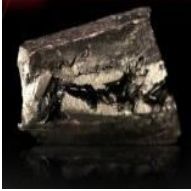


*Les applications
des terres rares*





III. Les applications des terres rares:

Souvent appelés les « germes de la technologie » par les Japonais, les ETR sont une composante importante de nombreux matériaux de pointe, surtout dans les secteurs de la haute technologie et de l'énergie verte, où une performance robuste, une durabilité et de faibles émissions de CO2 sont si importantes.

III.1. Application de chaque ETR:

<p>Lanthane</p> 	<p>Il sert à fabriquer des piles rechargeables à hydrure métallique de nickel-lanthane (le type utilisé dans les véhicules électriques et hybrides, les ordinateurs portatifs et les caméras), la fibre optique pour augmenter la vitesse de transmission, des lentilles d'appareil photo haut de gamme, des télescopes, des jumelles (puisque le lanthane améliore la clarté), du verre absorbant le rayonnement infrarouge pour les lunettes de vision nocturne; il sert aussi à réduire le niveau de phosphates des personnes souffrant d'une maladie du rein.</p>
<p>Cérium</p> 	<p>Il sert à polir le verre, le métal et les pierres précieuses, les puces d'ordinateur, les transistors et autres pièces électroniques; il sert à fabriquer des convertisseurs catalytiques pour réduire la pollution, il est ajouté dans le processus de fabrication de verre pour le décolorer et il procure la partie verte du spectre optique des ampoules fluorescentes compactes.</p>

<p>Néodyme</p> 	<p>L'utilisation principale du néodyme, ce jumeau du praséodyme, est la fabrication des aimants les plus puissants du monde. Ceux-ci sont si puissants qu'un aimant de la taille d'une pièce de monnaie sur un réfrigérateur ne peut pas être retiré à la main. Parmi les autres applications, on retrouve les télémètres laser et les systèmes de guidage.</p>
<p>Praséodyme</p> 	<p>Combiné au néodyme, il sert principalement à fabriquer des aimants de forte puissance. Il sert à fabriquer des lunettes de soudeur et de souffleurs de verre, puisque l'oxyde de praséodyme protège des éblouissements et de la lumière UV; il sert aussi à fabriquer du plastique et de la céramique jaune vif.</p>
<p>Samarium</p> 	<p>Il sert principalement dans la production d'aimants permanents, mais aussi dans la production de lasers à rayons X et d'armes à guidage de précision et dans la génération du bruit blanc dans la technologie furtive</p>
<p>Europium</p> 	<p>Il sert principalement dans les phosphores utilisés dans les écrans de visualisation pilote, les télévisions (rouge-orange) et les tubes fluorescents éco-énergétiques (rouge-orange et bleus).</p>
<p>Gadolinium</p> 	<p>Il sert à améliorer la clarté des examens IRM en injectant des substances de contraste de gadolinium dans le patient. Il sert dans les barres de commande des réacteurs nucléaires pour contrôler le processus de fission.</p>

<p>Terbium</p> 	<p>Il sert principalement dans les phosphores, particulièrement dans les ampoules et tubes fluorescents (jaune-vert), les émetteurs verts à haute intensité et les écrans intensificateurs de rayons X (jaune-vert, violets et bleus).</p>
<p>Dysprosium</p> 	<p>Il sert surtout dans la fabrication d'aimants permanents de néodyme-fer-bore à haute puissance. Le dysprosium-165 est injecté dans les articulations pour soigner la polyarthrite rhumatoïde. Le dysprosium est utilisé dans les dosifilms pour détecter et surveiller l'exposition à la radiation.</p>
<p>Erbium</p> 	<p>Il sert à colorer le verre et comme amplificateur en fibres optiques et il est utilisé dans les lasers pour utilisation médicale et dentaire.</p>
<p>Yttrium</p> 	<p>Les phosphores d'yttrium servent dans les ampoules et les lampes fluorescentes. L'oxyde de zirconium stabilisé avec de l'yttria est utilisé dans des applications à haute température, comme les isolants thermiques servant à protéger les surfaces à haute température en aérospatiale. Il peut augmenter la résistance des alliages métalliques.</p>

Cette liste ne comprend pas l'holmium, le thulium, l'ytterbium, le lutécium et le scandium, puisque ces derniers ne représentent qu'une infime portion de l'offre totale.

III.2. Terres rares non séparées :

La difficulté de la séparation des terres rares est due à la similarité des propriétés. Il arrive aussi que cette similarité rende inutile une séparation pour certaines utilisations.

De l'ordre de 75 à 85 % du tonnage des terres rares est consommé sans séparation des métaux contenues. Ces composés pouvant être des oxydes, des hydroxydes, des carbonates, des fluorures ou des nitrates. Ces différents sels polymétalliques sont obtenus par attaque acide ou basique (soude) pour être transformés en concentrés marchands par calcination.

Le mélange de métaux de terres rares obtenu par électro-extraction en bains de sels fondus à partir de terres rares cériques est appelé mishmétal.

Les pierres à briquets en ferrocérium sont une application du mishmétal.

En aciérie, la propriété hautement réductrice des terres rares favorise leur utilisation dans la désoxydation et la désulfuration des aciers.

L'ajout de mishmétal ou d'alliages de terres rares tel que l'alliage RE-Si favorise la sphéroïdisation du graphite dans la fonte nodulaire.

L'alliage RE-Si est considéré comme le moyen le plus économique pour ajouter des terres rares aux aciers. L'addition de terres rares aux aciers prévient les effets néfastes du soufre notamment, améliore la morphologie des inclusions et augmente la résistance mécanique. Environ 1-3 kg d'alliage est utilisé pour la production d'une tonne d'acier spécial pour la production de tuyaux ou pour l'industrie automobile.

Les terres rares sont utilisées comme catalyseurs pour le cracking thermique dans l'industrie pétrolière.

III.2.1.Applications :

III.2.1.a. Aimants permanents:

L'industrie profite des propriétés paramagnétiques et ferromagnétiques des terres rares .la production d'aimants est l'application prépondérante dans laquelle les terres rares sont utilisées. La demande en aimants permanents des terres rares augmente de 21% entre néodyme, le samarium, le terbium et le praséodyme largement utilisés pour production d'aimants du type NdFeB , Sm-Co et SmFeN. Cette demande s'est accrue particulièrement pour le néodyme et le terbium.

Les aimants permanents NdFeB contiennent près de 30% de néodyme .ils représentent près de 25% d'aimants produits dans le monde. Ils ont été découverts lors de la recherche d'aimants de substitution moins chers que les aimants Sm-Co. Ils peuvent contenir du dysprosium, du terbium et du cobalt d'où la formule $Nd_{2-x} Dy_x Fe_{14}B$ avec comme exemple $(Nd,Dy)_2(Fe ,Co)_{14}B$.

Les aimants permanents sont utilisés dans les systèmes de guidage des bombes intelligentes et des missiles de croisière BGM-109 Tomahawk américains.

Le faible courant et pertes limitées par les courants de Foucault des grenats ferrimagnétiques tels que $3Ln_2O_3 \cdot 5Fe_2O_3$ favorisent une importante utilisation dans les fours à micro-ondes.

III.2.1.b. Verre :

Comme de nombreux métaux, les terres rares sont utilisées en verrerie comme colorants, stabilisateurs et absorbeurs de rayons ultra-violet (UV). Elles sont également utilisées comme modificateur augmentant l'indice de réfraction tout en diminuant la dispersion dans le verre de haute qualité.

Le verre au lanthane est abondamment utilisé dans l'optique des appareils photographiques et des caméras.

Le cérium est également utilisé dans les écrans de télévision comme absorbeur de UV et comme polisseur du verre afin d'obtenir du matériel d'optique de grande qualité comme les lentilles de caméras numériques et des télescopes.

Les fibres optiques dopées à l'eupratrium remplacent les stations relais traditionnelles.

Le verre dopé au néodyme est un matériau pour lasers.

Le gadolinium et l'yttrium servent de dopants pour le verre

III.2.1.c. Catalyseurs :

Les progrès en matière de législation pour les émissions toxiques ont permis l'amélioration des systèmes de pots d'échappement par la création de pots catalytiques ou ils améliorent l'oxydation des agents polluants.

Les terres rares entrent également dans la production pétrolière, dans des réactions d'hydrogénation ou de déshydrogénation et leur apport dans les différentes opérations de cracking catalytique ont permis des accroissements de production et de capacité.

Les terres rares sont utilisées dans les peintures comme agent siccatif et stabilisateur thermique du plastique notamment.

III.2.1.d. Métallurgie :

De par leur réactivité due à leurs propriétés chimiques, les terres rares sont abondamment utilisées dans des processus de purification, de sphéroïdisation, d'affinage du grain, d'amélioration de la résistance à la rupture dans la pyrométallurgie.

Les alliages de terres rares tels que Sc-Al, Sc-Mg, Y-Al, Y-Mg et Nd-Mn sont abondamment utilisés en métallurgie comme puissants désoxydants et comme éléments d'amélioration de la résistance à la corrosion.

Le mishmetal est utilisé comme pierre à feu des briquets.

Le sulfure de cérium CeS est utilisé pour la fabrication des creusets pouvant résister jusqu'à 1800°C.

III.2.1.e. Batteries:

Les terres rares sont abondamment utilisées dans la production de batteries ou piles rechargeables.

Toutes les voitures hybrides et autres voitures électriques disposent de batteries de grandes capacités faites de composés de terres rares.

Avec l'accroissement de la production de véhicules hybrides et électriques entraîné par la crise énergétique, le changement climatique, la lutte contre les producteurs, le besoin en terres rares ne fera qu'augmenter.

III.2.1.f. Matériaux céramiques:

Les oxydes de néodyme et praséodyme servent comme colorant du verre et dans la fabrication de filtres en optiques.



Conclusion

Conclusion générale:

Le développement des systèmes de haute technologie où la spécificité des propriétés des matériaux est un élément nécessaire permettant de prévoir que le rôle joué par les terres rares ne cessera de prendre de l'importance. Les progrès effectués ces dernières années tant dans les techniques industrielles de séparation qu'au niveau de la qualité des produits (pureté, morphologie, réactivité) et de la connaissance des possibles utilisations, permettent de répondre aux besoins nouveaux et pointus du marché et doivent contribuer à donner à ces éléments un rôle essentiel dans de multiples applications industrielles présentes ou à venir.

Dans ce travail, nous avons cité avec précision toutes propriétés des terres rares pouvant être utile et leurs applications dans des domaines diverses.



Bibliographie

Bibliographie :

1. <https://books.google.dz/books?id=uwCqBgAAQBAJ&pg=PA15&dq=terres+rare&hl=ar&sa=X&ei=yI11VYfpJYnxUur8gIAN&ved=0CDgQ6AEwBA#v=onepage&q=terres%20rares&f=false>
2. https://www.google.dz/?gws_rd=cr,ssl&ei=u411VZTiE8zZU4u7gvAM#q=notation+de+base+des+elements+terres+rare
3. Venu Mankad, Sanjeev K. Gupta, Prafulla K. Jha, Results in Physics, 5G, 7 (2012)
4. Eva MONROY, Epitaxie par jets moléculaires des nitrures III-V: physique de la croissance de couches minces et de nanostructures, habilitation soutenue en (2005).
5. Jean-Pierre CLAMADIEU, Emmanuel BUTSTRAEN, RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT N° 58, 92-98 (2010).
6. P. Larson and Walter R. L. Lambrecht, Phy. Rev B 75, 045114 (2007).