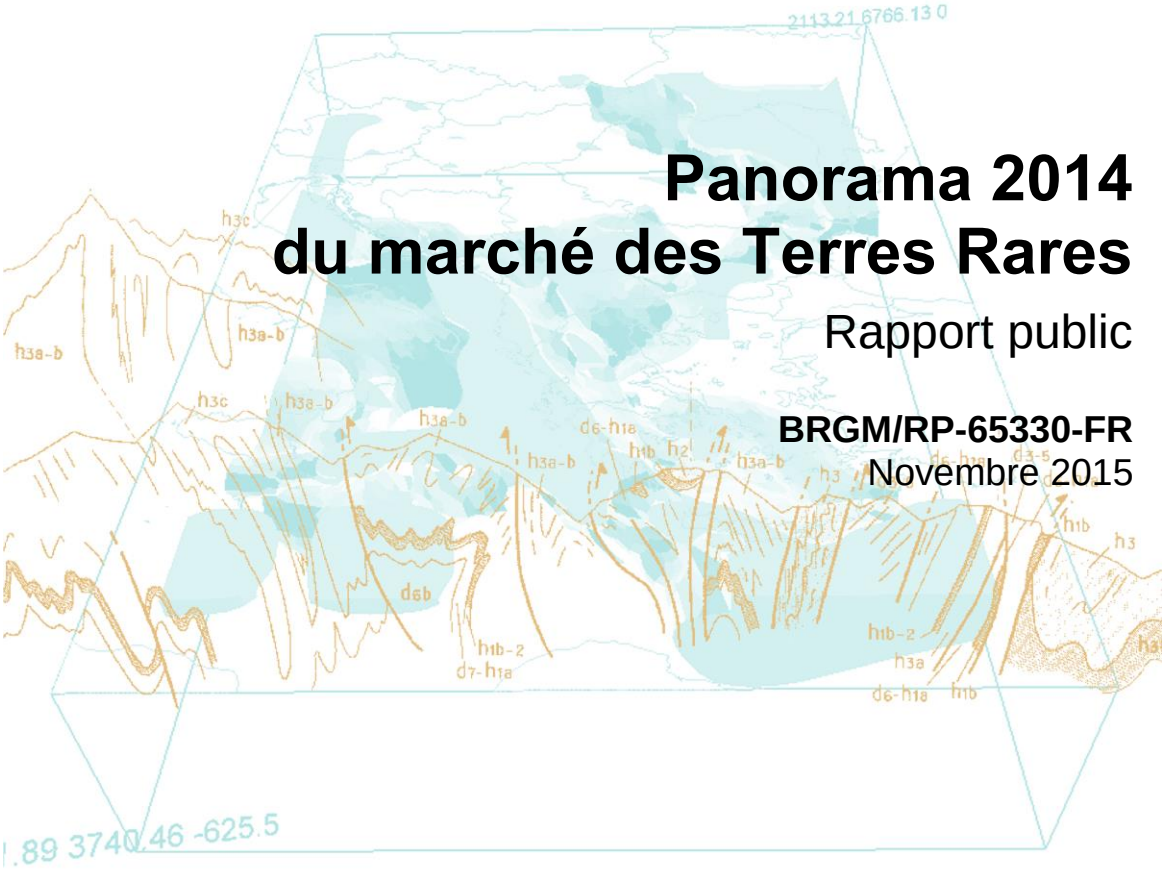
Document public



Panorama 2014 du marché des Terres Rares

Rapport public

BRGM/RP-65330-FR
Novembre 2015

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Panorama 2014 du marché des Terres Rares

Rapport final

BRGM/RP-65330-FR
Novembre 2015

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2014/2015

K. Bru, P. Christmann, J.F. Labbé, G. Lefebvre

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Jean-Jacques DUPUY	Nom : Jean-Claude GUILLANEAU
Date : 17/12/2015	Date : 17/12/2015
Signature :	Signature :

. En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Terres Rares, Lanthanides, Lanthane, Cérium, Praséodyme, Néodyme, Samarium, Europium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Yttrium, Stratégie économique, Stratégie des matières premières, Économie, Matières premières minérales, Industrie, Politiques publiques.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Bru K., Christmann P., Labbé J.F., Lefebvre G. (2015) - Panorama mondial 2014 du marché des Terres Rares. Rapport publicl. BRGM/RP-64330-FR. 193 p., 58 fig., 32 tab.

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Résumé

LES TERRES RARES

Les Terres Rares (TR) sont un ensemble de 15 à 17 éléments métalliques du tableau périodique de Mendeleïev, aux propriétés chimiques très voisines, qui se trouvent pratiquement toujours associés dans leurs gisements dans la nature, et qui comprend classiquement :

- l'ensemble des 15 lanthanides, c'est-à-dire les 15 éléments portant les numéros atomiques successifs 57 à 71 : lanthane (La), cérium Ce), praséodyme (Pr), néodyme (Nd), prométhium (Pm), samarium (Sm), europium(Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), dysprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), thulium (Tm), ytterbium (Yb) et lutétium (Lu) - dont seuls 14 existent dans la nature, le prométhium n'ayant pas d'isotopes stables -, et ;
- l'yttrium (Y), de numéro atomique 39, qui n'est pas un lanthanide, mais dont les propriétés atomiques et chimiques et le rayon ionique sont si proches de ceux des lanthanides qu'il s'y trouve toujours associé dans leurs différents gisements.

Certains auteurs, rattachent aussi au groupe des Terres Rares le scandium (Sc), de numéro atomique 21. Mais le scandium ne se concentre pas dans les mêmes gisements, sa problématique d'approvisionnement est distincte de celle des autres Terres Rares et il n'est pas traité dans le présent panorama.

Les lanthanides ont des masses atomiques qui croissent progressivement avec leurs numéros atomiques, passant d'une masse atomique de 139 pour le lanthane (numéro atomique 57) à 175 pour le lutétium (numéro atomique 71). Les Terres Rares sont donc de plus en plus lourdes au fur et à mesure que les numéros atomiques augmentent. Pour tous les auteurs, les lanthanides de faible numéro atomique (La, Ce, Pr, Nd) sont donc qualifiés de Terres Rares légères, et celles de numéro atomique élevé (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) de Terres Rares lourdes. Le classement des lanthanides intermédiaires (Sm, Eu, Gd) est très variable selon les auteurs, certains les classant comme "intermédiaires", d'autres totalement ou partiellement parmi les légères, d'autres totalement ou partiellement parmi les lourdes, sans qu'il y ait de consensus. L'yttrium, bien que plus léger que tous les lanthanides, est généralement classé parmi les Terres Rares lourdes du fait qu'il y est préférentiellement associé dans ses gisements.

La production minière de Terres Rares aurait été de l'ordre de 144 kt[1], comptées en oxydes de Terres Rares (OTR) en 2014, pour une consommation globale de l'ordre de 120 kt, et une valeur de marché brut mondial de l'ordre de 3,4 GUS$[2] en 2014.

Historique

Les Terres Rares ont été découvertes à partir de la fin du 18ème siècle, mais les différents éléments de ce groupe n'ont été découverts et séparés que progressivement au cours du 19ème siècle, le dernier élément à en être isolé étant le lutétium, en 1907. Leurs usages ont été très limités jusque dans les années 1960 (ferrocérium des pierres à briquet), puis divers usages technologiques ont commencé à apparaitre dans les années 1970 (europium pour les écrans cathodiques couleur, lasers, etc.) puis se sont diversifiés et étendus.

[1] kt = kilo-tonne = 1 000 tonnes

[2] GUS$ = Giga dollar des États-Unis = milliard de dollar des États-Unis.

Propriétés

À l'état pur, les lanthanides et l'yttrium, ainsi que le scandium, sont des métaux gris-acier, sauf l'europium et l'ytterbium dont la couleur a une tendance jaune pâle.

Les lanthanides sont moyennement denses (allant d'une densité de 5,24 pour l'europium à 9,84 pour le lutétium. L'yttrium est relativement léger (densité de 4,47).

La température de fusion des Terres Rares s'échelonne de 799 °C (cérium) à 1 663 °C (lutétium).

Les éléments des Terres Rares ont des propriétés spectrales remarquables, tant en absorption (coloration) qu'en émission (luminescence), utilisées dans les applications de luminophores (écrans, éclairage) et de lasers. Les plus utilisés sont les ions d'yttrium, d'europium (rouge et bleu), de terbium et de thulium (vert), ainsi que de cérium (jaune).

Plusieurs éléments des Terres Rares ont des propriétés magnétiques remarquables, à l'origine d'une de leurs applications majeures, les aimants permanents de haute performance (Samarium-Cobalt et Néodyme-Fer-Bore).

Sous forme métallique, les Terres Rares s'oxydent plus ou moins rapidement à l'air à température ambiante (l'europium exposé à l'air ambiant s'oxyde complètement en quelques jours, les Terres Rares les plus lourdes sont relativement stables à l'air sec). Elles ont tous une tendance à s'oxyder avec un degré d'oxydation de +III, quelques-unes ayant aussi des degrés d'oxydation +II (Eu, Sm) ou +IV (Ce, Pr, Tb).

Dans la nature, les Terres Rares sont sous forme de cation trivalent (trication). Pour les lanthanides, le rayon du trication décroit avec l'accroissement du numéro atomique, tandis que l'yttrium a un rayon de trication voisin de celui des lanthanides lourds.

Les propriétés chimiques des éléments des Terres Rares sont remarquablement homogènes, en particulier en solution, où le rayon ionique influe peu.

Les différentes Terres Rares se substituent plus ou moins l'une à l'autre dans leurs minéraux. Toutefois, les structures cristallines de certains minéraux, comme la monazite ou la bastnaesite, sont plus adaptées et plus favorables à des rayons ioniques de l'ordre de 113 - 122 pm[3] et seront plutôt à Ce, La, Nd et Pr dominants. D'autres, comme le xénotime ou la gadolinite, sont plus adaptés à des rayons ioniques de l'ordre de 103 - 110 pm, à yttrium dominant, partiellement substitué par les lanthanides les plus lourds de rayon ironique proche (Tb, Dy et au-delà).

Les éléments des Terres Rares n'ont pas de rôles biologiques connus et n'ont pas de toxicité aux doses d'exposition usuelles.

Usages et consommation

Les différents éléments des Terres Rares ont des secteurs d'utilisations variés, avec un large éventail de tonnages et de taille des marchés selon les éléments.

Les principaux secteurs d'utilisation sont :

[3] pm = picomètre = 10^{-12} m

Les aimants permanents sont l'application la plus consommatrice de Terres Rares à l'échelle mondiale, représentant 20 à 23 % en tonnage des usages, et près de 53 % de la valeur totale du marché des Terres Rares.

Les aimants permanents sont utilisés dans les moteurs et générateurs électriques ainsi que dans les dispositifs électroacoustiques. L'intérêt des aimants à Terres Rares est que le volume et le poids nécessaires pour une performance magnétique équivalente est bien inférieur à celui des aimants de technologies plus anciennes. Ils permettent ainsi des gains de poids ou une miniaturisation significative (génératrices d'éoliennes, micromoteurs électriques dans l'automobile, défense, microordinateurs, appareils nomades, etc.)

Les aimants Sm-Co, développés à partir des années 1970, possèdent la meilleure résistance connue à la démagnétisation. Ils sont privilégiés dans certains usages, en particulier à haute température. La production mondiale en est évaluée à 1 300 t pour l'année 2014.

Les aimants Nd-Fe-B, de composition $Nd_2Fe_{14}B$, développés à partir de 1982, dominent désormais le marché grâce à leur coût compétitif et des propriétés supérieures en termes de force d'aimantation et de rémanence. L'ajout de dysprosium ou éventuellement de terbium permet de renforcer la résistance à la démagnétisation de l'aimant aux hautes températures, et de passer de températures d'utilisations maximales de 80 °C à plus de 200 °C. La production mondiale en est évaluée à 79 500 t pour l'année 2014.

À ce jour, aucune recherche n'a permis d'identifier de matériaux susceptibles de concurrencer à court terme les performances magnétiques des aimants Nd-Fe-B pour une taille et une masse similaires. La masse de dysprosium ajoutée peut aller de 5 à 11 % de la masse totale de l'aimant. En raison du prix élevé et des risques sur les approvisionnements en dysprosium, de nombreux industriels cherchent à réduire, voire éviter, l'utilisation de dysprosium. Les résultats progressent mais n'ont pas encore permis de passer au stade de la production industrielle.

La demande correspondante en Terres Rares pour les aimants permanents est en croissance depuis la fin des années 1990 (aux exceptions des années 2009 et 2011-2012). Cette demande devrait continuer à croître dans les prochaines années, à un rythme de l'ordre de 7 % par an.

Les poudres de polissage consomment près de 15 % des Terres Rares, mais en représentent cependant moins de 5 % en valeur, du fait qu'elles utilisent surtout les éléments les moins chers. Le dioxyde de cérium (CeO_2) est l'une des meilleures poudres de polissage du verre connue, et cette application constitue la plus grande part des usages du cérium à l'échelle mondiale. L'oxyde de mischmétal, qui est un mélange de Terres Rares légères non séparées, a également été largement utilisé, en raison de son faible coût et de sa simplicité de production.

La plus grande part de marché des poudres de polissage concerne les écrans de tous types (écrans plats des téléviseurs et ordinateurs, smartphones, tablettes, etc.) dont la production s'est considérablement accélérée cette dernière décennie.

La catalyse du craquage des pétroles lourds en lit fluide (Fluid Cracking Catalyst, FCC) consomme de l'ordre de 13 % Terres Rares. C'est la principale utilisation du lanthane.

La catalyse automobile représente environ 13 % des usages mondiaux du cérium. Les pots catalytiques sont composés d'une chambre en acier inoxydable contenant un ou plusieurs monolithes constitués de céramique en "nid d'abeille" tapissée d'alumine et d'oxyde de cérium (CeO_2) revêtus de microparticules de métaux du groupe du platine (Pt, Pd, Rh). La généralisation des réglementations anti-pollution hors d'Europe, notamment en Asie, ainsi

qu'une tendance haussière du marché automobile mondial devraient continuer à soutenir la demande en cérium pour cet usage, renforcée par des prix bas et des excédents conséquents de cet élément.

Les batteries NiMH (Nickel Metal Hydride) ont une électrode négative en alliage lanthane-pentanickel ($LaNi_5$). Ces batteries rechargeables ont remplacé les batteries nickel-cadmium à la fin des années 1990, et ont aujourd'hui de nombreuses applications. On les retrouve dans une multitude d'appareils électroniques portatifs ainsi que dans les premiers véhicules hybrides. La demande en Terres Rares pour le secteur des batteries NiMH s'est élevée à 9 460 t d'OTR en 2012. Elle devrait diminuer, avec la migration progressive vers les batteries Li-ion, déjà en cours chez plusieurs constructeurs (comme Toyota avec les versions plus récentes de son hybride Prius).

Les alliages métallurgiques autres que ceux pour batteries NiMH comptent pour 11 % des quantités de Terres Rares consommées à l'échelle globale. L'alliage $LaNi_5$, qui peut absorber jusqu'à 400 fois son propre volume d'hydrogène, est utilisé pour des stockages d'hydrogène. Le mischmétal (alliage de Terres Rares légères non ou incomplètement séparées, Ce-La ou Ce-La-Nd-Pr) est utilisé en particulier en sidérurgie. Ajouté à des teneurs de 0,1 à 0,2 %, il permet la désoxydation et la désulfuration de l'acier. Certains alliages de magnésium et d'aluminium, ainsi que des superalliages et autres alliages de haute qualité à destination des industries aéronautique, nucléaire et militaire, intègrent aussi des Terres Rares.

La demande en Terres Rares pour les alliages métallurgiques devrait rester relativement stable.

Les industries du verre et des céramiques consomment environ 1 % des Terres Rares, essentiellement pour la coloration, mais aussi pour la décoloration, la résistance au brunissement, l'augmentation de l'indice de réfraction (optique), la résistance à l'altération par des rayons UV. La demande correspondante devrait croître de quelques pourcents par an.

Les luminophores sont des substances qui, lorsqu'elles subissent une excitation (par des électrons comme dans les tubes cathodiques, des photons ou d'autres particules) émettent de la lumière sur des longueurs d'onde spécifiques. Les propriétés de luminescence de la plupart des lanthanides sont largement utilisées pour la production de luminophores, utilisés dans un grand nombre d'applications : systèmes d'affichage des écrans de télévision, ordinateurs et autres appareils électroniques, éclairages domestiques, publics et commerciaux (ampoules fluocompactes, enseignes publicitaires, etc.). Ce marché représentait, en 2012, 7 % des quantités de Terres Rares consommées.

Historiquement, c'est cette filière qui a permis l'essor de l'industrie des Terres Rares dans les années 1970, tiré par la croissance de la demande en téléviseurs couleur à tube cathodique, qui utilisaient des luminophores à base d'europium et d'yttrium. Les tubes cathodiques ont progressivement disparu entre 2004 et 2008 au profit des écrans plats, moins consommateurs de Terres Rares.

Les propriétés luminescentes des Terres Rares et en particulier de l'europium et du terbium sont aussi utilisées dans des encres spéciales pour la protection des billets de banque (Euro) contre la contrefaçon.

Les Lasers, mis au point et développés dans les années 1960 sont désormais largement utilisés dans les domaines militaires (communication, guidage de missiles), en médecine de précision (dentisterie, dermatologie, ophtalmologie), dans la recherche sur la fusion nucléaire, dans les réseaux de communication longue distance (fibres optiques), dans la

découpe industrielle (joaillerie et coupe de haute précision de certains matériaux), dans l'équipement informatique et loisirs multimédias (stockage et lecture de données sur CD, DVD, Blu-ray etc.) et le spectacle.

Il existe des lasers à gaz, à liquides, à verres et à cristaux. Nombre de lasers à cristaux sont désormais à base de grenats artificiels, en particulier le YAG (Yttrium-Aluminium Garnet, $Y_3Al_5O_{12}$) dopés avec d'autres éléments, et en particulier des Terres Rares, ces éléments dopants pouvant déterminer la longueur d'onde et donc la couleur émise.

Les quantités de terres rares nécessitées pour le marché des Lasers sont toutefois marginales par rapport aux quantités demandées des autres applications.

Les pierres à briquet sont historiquement la première utilisation significative des Terres Rares. Ces « pierres » sont composées de ferrocérium, alliage contenant 30 % de fer et 70 % de mischmétal, lui-même composé de Terres Rares légères peu ou pas séparées, donc de cérium majoritaire, de lanthane, avec parfois des résidus de Pr et Nd et autres. La part de cet usage se réduit au profit de briquets piézoélectriques.

Dans le domaine médical, le gadolinium est utilisé en imagerie IRM. Certains isotopes radioactifs d'autres éléments des Terres Rares, obtenus artificiellement en laboratoire, sont utilisés pour le traitement de certains cancers, et notamment Sm, Er, Yb et Y.

Dans le domaine de l'énergie nucléaire, le samarium, l'europium, le gadolinium et le dysprosium sont des absorbeurs de neutrons et sont ainsi utilisés, en faible quantité, dans des barres de contrôle des réacteurs nucléaires.

Dans le domaine de la défense, les diverses applications des Terres Rares citées plus haut (aimants haute performance, optique, lasers, etc.) se déclinent entre autres dans les dispositifs suivants

- les systèmes de guidage lasers de munitions, et les missiles de croisière ;
- la détection des mines sous-marines ;
- les systèmes de communication ;
- les mécanismes de commande en aviation ;
- les systèmes de radars et sonars ;
- les lunettes de vision nocturne (infrarouge) ;
- les moteurs électriques des missiles ;
- etc.

Par élément, la répartition des usages est la suivante (pourcentages de 2012) :

- Lanthane (27,8 % des TR consommées) :
  - catalyse de craquage des pétroles lourds : 44 %,
  - batteries NiMH : 26 %,
  - alliages métallurgiques, optique, luminophores, mischmétal.
- Cérium (40,2 % des TR consommées) :
  - polissages du verre : 44 %,
  - alliages métallurgiques : 19 %,
  - catalyseurs automobiles : 13 %,
  - optique, luminophores, mischmétal.
- Praséodyme (4,4 % des TR consommées) :
  - aimants permanents : 73 %,

  - luminophores : 12 %,
  - céramiques : 7 %,
  - mischmétal, alliages métallurgiques, catalyseurs d'oxydation.
- Néodyme (17,6 % des TR consommées) :
  - aimants permanents : 89 %,
  - céramiques : 5 %,
  - alliages métallurgiques, mischmétal, luminophores, lasers.
- Samarium (0,5 % des TR consommées) :
  - aimants permanents : 97 %,
  - optique, médecine, nucléaire.
- Europium (0,3 % des TR consommées) :
  - luminophores : 96 %,
  - optique, nucléaire.
- Gadolinium (1,4 % des TR consommées) :
  - aimants permanents : 35 %,
  - alliages métallurgiques : 28 %,
  - luminophores : 23 %,
  - imagerie médicale IRM, lasers.
- Terbium (0,3 % des TR consommées) :
  - luminophores : 71 %,
  - aimants permanents : 24 %,
  - alliages métallurgiques, dopant de composants électroniques.
- Dysprosium (0,7 % des TR consommées) :
  - aimants permanents : 98 %,
  - alliages métallurgiques, optique, nucléaire.
- Holmium (<0,1 % des TR consommées) :
  - coloration du verre, lasers.
- Erbium (0,5 % des TR consommées) :
  - coloration du verre : 72 %,
  - luminophores : 25 %,
  - télécommunication optique, lasers médico-chirurgicaux.
- Thulium (<0,1 % des TR consommées) :
  - lasers, luminophores.
- Ytterbium (<0,1 % des TR consommées) :
  - lasers, métallurgie, mesures sismiques.
- Lutétium (<0,1 % des TR consommées) :
  - médecine (tomographie), lasers, catalyse.
- Yttrium (4,9 % des TR consommées) :
  - luminophores : 78 %,
  - céramiques : 21 %,
  - alliages métallurgiques, lasers, catalyse.

Évolution de la consommation globale

La demande globale en Terres Rares a augmenté significativement à partir du milieu de la décennie 1990, et surtout entre 2000 et 2008 (+ 5,8 % par an en moyenne), sous l'effet conjugué du développement des aimants permanents Nd-Fe-B et des ampoules fluo-compactes, et du développement rapide de la production chinoise puis de son industrie de transformation, dans le sillage de la très forte croissance économique de la Chine dans la décennie 2000. La demande chinoise en Terres Rares est ainsi passée de 21 % de la demande mondiale en 2000 à 50 % en 2005 et 66-68 % en 2011-2013

La consommation avait baissé en 2009, suite à la crise financière globale, puis après une brève reprise, s'est à nouveau affaiblie en 2011 après la montée fulgurante des prix. Après l'explosion de la bulle spéculative des prix des Terres Rares mi-2011 et le retour à des prix dictés par le marché physique, la demande est revenue à un niveau équivalent à celui de 2008, à environ 124 000 t d'oxydes de Terres Rares.

Les analystes des marchés des Terres Rares anticipent des croissances de la consommation de ces éléments comprises entre 3 et 10 % par an selon les familles d'usages et selon les éléments, donc à des taux de croissance soit à peu près équivalents à la croissance économique globale, soit un peu au-dessus pour des applications appelées à se développer, et en particulier les aimants permanents. Ils anticipent cependant une baisse de la demande dans le secteur des luminophores.

Substituabilité

Dans une technologie donnée où elles sont utilisées, les Terres Rares sont difficilement substituables, ou alors au détriment de la qualité et des performances. Il peut en revanche y avoir des basculements de technologies, comme la mutation des batteries NiMH, avec Terres Rares, à des batteries Li-ion, sans Terres Rares, ou des ampoules fluocompactes, avec Terres Rares à des ampoules à LED avec peu de Terres Rares.

Dans le secteur des aimants permanents, les technologies sans Terres Rares restent moins performantes. Des recherches visent à diminuer les quantités de dysprosium nécessaires sans réduire les performances, par le positionnement précis du dysprosium dans la microstructure de l'alliage. De tels aimants ne sont cependant pas encore au stade de la production industrielle.

Ressources

L'abondance des éléments des Terres Rares dans la croûte terrestre s'échelonne de 66,5 ppm[4] pour le cérium, le plus abondant de ces éléments, à 0,5 ppm pour le thulium, le moins abondant. Leur abondance cumulée est de 220 ppm (14 lanthanides + yttrium) sous forme élémentaire, soit 260 ppm (0,026 %) sous forme d'oxyde.

Les principaux gisements exploités de Terres Rares primaires ont des teneurs supérieures à 1 % d'oxydes de Terres Rares (OTR) (Bayan Obo, Mount Weld, Mountain Pass), à l'exception notable des argiles ioniques du sud-est de la Chine (0,05 à 0,33 % OTR). Quelques nouveaux projets ont été étudiés récemment avec de teneurs inférieures à 0,1 % OTR, mais leur viabilité est incertaine.

[4] ppm = partie par million, équivalent, pour les masses, à gramme par tonne (g/t).

Les gisements de Terres Rares sont le plus souvent associés à des massifs intrusifs alcalins et peralcalins et des carbonatites, et les volcanites et systèmes hydrothermaux éventuellement associés.

Il existe des gisements secondaires de Terres Rares, les argiles ioniques issues de l'altération superficielle de roches ignées acides pré-enrichies en Terres Rares dans le sud de la Chine, et les placers et concentrations de sables à minéraux lourds à monazite et éventuellement xénotime (sables de plage).

Les minéraux porteurs de Terres Rares exploités sont principalement la bastnaésite, la monazite et dans une moindre mesure la loparite, à Terres Rares légères dominantes, le xénotime, à yttrium et autres Terres Rares lourdes dominantes, et les argiles ioniques. La monazite contient souvent aussi 3 à 10 % de thorium, radioactif, ce qui pose des problèmes environnementaux de stockage de résidus de traitement et a conduit à l'abandon de nombre d'exploitations de monazite de sables de plage (Australie, États-Unis, etc.).

Les évaluations des ressources et réserves en Terres Rares sont approximatives : les principaux gisements sont en Chine, qui ne publie pas de ressources et réserves selon les normes occidentales vérifiables actuelles, et les ressources et réserves publiées ces 5 dernières années sur des gisements nouvellement étudiés dans le monde l'ont été sur la base de prix de Terres Rares très largement supérieurs à ce qu'ils sont devenus en 2015, et la majeure partie ne peut plus être qualifiée de réserves puisqu'elle n'est plus économique.

À titre indicatif, les réserves chinoises sont estimées à au moins 52 Mt OTR, soit, en tonnage global (sans distinction des éléments), l'équivalent de 413 ans de production au niveau de 2014 et les réserves mondiales à au moins 64,6 Mt OTR, l'équivalent de 447 ans de production au niveau de 2014. Quant aux ressources, leur évaluation la plus basse (136,9 Mt) est équivalente à plus de 900 ans d'exploitation au rythme actuel. Dans l'hypothèse d'une croissance de la demande et de la production de 6 % par an, ces réserves et ressources seraient encore suffisantes pour assurer 55 à 86 ans d'approvisionnement respectivement.

Les gisements de Terres Rares dans le monde

Les principaux gisements de Terres Rares exploités se trouvent en Chine. Le plus important est le gisement de Bayan Obo, en Mongolie Intérieure, qui détiendrait plus de 80 % des réserves chinoises et plus de 60 % des réserves mondiales, et qui produit près de la moitié des Terres Rares produites en Chine. Les principaux autres gisements sont Weishan (Shandong), Maoniuping et Dalucao (Sichuan) et les argiles ioniques du sud-est de la Chine (Jiangxi, Guangxi, Guangdong, Hunan), appauvries en cérium et souvent enrichies en Terres Rares lourdes.

Dans le reste du monde, les principaux gisements exploités sont Mount Weld (Australie-Occidentale), Mountain Pass (Californie, États-Unis), Lovozero (Péninsule de Kola, Russie), des sables de plage à monazite en Inde (Odisha, Andhra Pradesh) et au Brésil. De nouveaux projets sont en préproduction (Dong Pao, Vietnam, Ulba Tailings, Kazakhstan), et plusieurs dizaines d'autres gisements ont été découverts ou évalués au cours des années 2010-2014, en Afrique (Malawi, Kenya, Tanzanie, Namibie, Afrique du Sud, Madagascar), en Amériques (États-Unis, Canada, Brésil), et en Europe (Suède, Groenland) et en Australie. Nombre de ces projets, encore actifs récemment, ont été mis en sommeil avec la poursuite de la chute des prix des Terres Rares en 2014 et 2015, ayant des difficultés à trouver des financements. Seuls quelques-uns ont encore une probabilité significative d'être développés dans les prochaines années.

Les indices de Terres Rares en France

Il n'y a pas de gisements de Terres Rares significatifs en France. Les seuls gîtes répertoriés et évalués sont les schistes à nodules de monazite grise de Bretagne et leurs placers associés, comme au Grand-Fougeray (Ille-et-Vilaine). Leurs ressources sont cependant négligeables comparées aux gisements mondiaux.

En Guyane, il existe quelques enrichissements en sables de plages en minéraux lourds avec monazite, mais de taille très réduite.

Sur l'île de Tahaa, en Polynésie française, il existe des enrichissements en Terres Rares dans les laves d'un cône volcanique adventif, avec localement des teneurs jusqu'à 0,5 % OTR. La géométrie et les dimensions de la zone enrichie restent à déterminer.

Production

Les statistiques de production de Terres Rares sont imprécises et mal détaillées par éléments. En 2014, la production globale de Terres Rares aurait été de 110 kt (selon l'USGS, février 2015) à 143 kt (selon Roskill, mars 2015), dont 87 % par la Chine, 5 % par l'Australie (Société Lynas, mine de Mount Weld), 3,5 % par les États-Unis (Société Molycorp, mine de Mountain Pass), 1,9 % par la Russie (société Solikamsk, mines de Lovozero), et 1,6 % par le reste du Monde.

Les États-Unis avaient dominé la production mondiale entre 1965 et 1985, puis se sont fait progressivement dépasser par la Chine, laquelle a assuré plus de 90 % de la production entre 2002 et 2013. Avec le démarrage de la production australienne de Mount Weld et le redémarrage de la production étatsunienne de Mountain Pass, la part de la production chinoise est revenue à 87 % en 2014,

La France n’a pas de production minière de Terres Rares, mais est présente dans le traitement chimique et la séparation des éléments de Terres Rares, à travers l’usine Solvay-Rhodia de La Rochelle, qui traite des concentrés de Terres Rares partiellement séparés importés de Chine.

Avant 1965, la production mondiale de Terres Rares était inférieure à 10 kt/an d'OTR. Le développement technologique a ensuite conduit à un accroissement progressif de la production mondiale, qui a atteint 53 kt en 1990 puis 90 kt en 2000, avant d’atteindre un pic à 142 kt (USGS) à 159 kt (Roskill) en 2010.

La production par élément se répartit environ comme suit : La 26 % ; Ce 38 % ; Pr 4,8 % ; Nd 16,5 % ; Sm 2 % ; Eu 0,3%, Gd 1,7% ; Tb 0,3 % ; Dy 1 % ; Er 0,7 % ; Y 7,6 %, autres (Ho, Tm, Yb, Lu) 1,3 %.

Les procédés de séparation des Terres Rares sont difficiles et coûteux, réalisés par un nombre limité de sociétés spécialisées (Chine, Solvay/Rhodia en France, etc.).

Recyclage

Le recyclage des Terres Rares est encore limité. Graedel et al. estimait en 2011 que moins de 1 % des Terres Rares étaient recyclées. Le recyclage de produits en fin de vie est rendu difficile par des quantités souvent très faibles ou intimement mélangées à des impuretés dans les produits finaux. Néanmoins, des travaux de recherche et développement progressent. Solvay/Rhodia recycle depuis 2011 les Terres Rares des batteries NiMH en partenariat avec Umicore, et envisage une production par recyclage de 5 kt/an de Terres Rares à partir du recyclage des poudres luminophores des ampoules fluocompactes, des

batteries NiMH et des aimants permanents. Les sociétés japonaises Santoku, Hitachi, Shin-Etsu, Showa denko, Mitsubishi Materials développent le recyclage du néodyme et le dysprosium des aimants permanents.

Une projection estime qu'en 2020, le recyclage des aimants permanents pourrait contribuer à hauteur de 8 à 16 % dans l'approvisionnement en Terres Rares pour ce même secteur des aimants permanents, et celui des poudres luminophores pour 19 à 33 %.

Contraintes socio-politiques et technico-économiques sur l'offre

La Chine avait mis en place à partir de 2005 des quotas d'exportation de Terres Rares brutes, qui ont ensuite été réduits de moitié entre 2007 (~60 kt OTR) et 2010 (~30 t OTR), et instauré parallèlement des taxes à l'exportation, passés en 2011 à 15 à 25 % selon les éléments. Ces contraintes, à un moment où la demande mondiale en Terres Rares s'accroissait (élargissement des filières utilisatrices d'aimants permanents performants, généralisation des ampoules d'éclairage fluo-compactes, etc.) avaient conduit à de vives tensions sur le marché et à une envolée des prix.

En 2012, l'Union Européenne, les États-Unis et le Japon ont déposé plainte auprès de l'OMC sur ces pratiques et ont obtenu gain de cause en mars 2014. La Chine a supprimé ses quotas à partir de janvier 2015, et supprimé ses taxes à l'exportation à partir du 2 mai 2015, tout en continuant à réguler ses exportations par la délivrance de Licences d'Exportation à un nombre limité de compagnies.

En sus des mesures chinoises de préservation de ses ressources (quotas et taxes), l'incident des îles Senkaku entre la Chine et le Japon en septembre 2010 avait conduit la Chine à décider d'un embargo sur ses livraisons de Terres Rares au Japon. Cet embargo avait donné une impulsion supplémentaire à la montée des prix des Terres Rares et à la prise de conscience par les pays industriels de leur dépendance vis-à-vis de la Chine pour ces substances. Les craintes sur les approvisionnements avaient conduit les industriels et des négociants à faire des achats préventifs (stockages), ce qui avait encore accéléré la montée des prix, avec un effet de bulle spéculative.

Les prix étaient devenus tellement élevés en 2011 que les consommateurs ont cherché tous les moyens de réduire leur consommation, tout en se retrouvant avec des stocks de précaution. Parallèlement, ces prix forts avaient stimulé la mise ou la remise en production de producteurs de l'OCDE tels que Molycorp aux États-Unis ou Lynas en Australie. Ces baisses de demande conjuguées à l'expectative d'augmentation de l'offre ont conduit à un écroulement des prix et la mise en difficulté financière des nouveaux producteurs. La situation de quasi-monopole de la Chine (85 à 90 % de la production mondiale) continue à lui permettre un certain contrôle sur les prix et d'influer sur la faisabilité économique ou non des nouveaux projets. Parallèlement, la Chine a cherché à investir et prendre des parts directes ou indirectes dans certains des projets hors Chine les plus prometteurs (Groenland, etc.).

Prix des Terres Rares

Les prix des Terres Rares s'établissent généralement par négociations directes de contrats entre producteurs primaires et transformateurs ou utilisateurs, éventuellement par l'intermédiaire de négociants ("traders"). Les échanges sont donc relativement opaques en termes de volumes et de prix. Le site de Metal Pages (www.metal-pages.com) publie deux fois par semaine, une fourchette de prix spot d'échanges de 8 Terres Rares (La, Ce, Nd, Pr, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy et Y) sous forme d'oxyde et sous forme de métal, en USD/kg FOB Chine, ainsi qu'en CNY sur le marché intérieur chinois.

Les différents éléments des Terres Rares ont des prix qui s'échelonnent du simple au centuple ou davantage selon les éléments : ainsi le prix moyen du lanthane métal au 3ème trimestre 2015 était de 6,02 US$/kg, tandis que celui du terbium était de 703 US$/kg, plus de cent fois plus élevé.

Ces prix ont aussi fortement varié dans le temps. Leurs niveaux étaient assez médiocres en 2002-2003, puis ont progressivement augmenté, avec une forte flambée amorcée début 2010, amplifiée à partir de février 2011, et ayant atteint son paroxysme mi-juillet 2011. Le 14 juillet 2011, le prix du dysprosium-métal a atteint 3 410 US$/kg, soit une multiplication par un facteur 106 par rapport au prix moyen de ce métal au cours des années 2002-2003 (il était alors de 32,1 US$/kg), soit une augmentation de 10 500 %. Le prix du néodyme a atteint 467 US$/kg le 19 juillet 2011, soit une multiplication par un facteur 70 par rapport au prix moyen de ce métal au cours des années 2002-2003 (il était alors de 6,67 US$/kg),

La flambée des prix avait conduit à une baisse de la demande, par économie sur les quantités, substitution et retour à des technologies moins performantes, le tout dans un contexte de morosité économique persistant. Cette baisse de la consommation, assortie à un report de cette consommation sur les stocks préventifs constitués, a conduit à un « éclatement » de la bulle et à une chute quasi-continue des prix entre mi-2011 et fin novembre 2015.

La flambée des prix de 2010-2011 et les inquiétudes associées sur les approvisionnements avaient aussi conduit nombre d'investisseurs à rechercher des ressources minières en Terres Rares ailleurs qu'en Chine. Ainsi Molycorp a relancé l'ancienne mine californienne de Terres Rares de Mountain Pass, qui avait fermé en 2002, Lynas a démarré une production à Mount Weld en Australie, et une foison de nouveaux projets a vu le jour, essentiellement sur investissements de sociétés juniors. La chute des prix de 2011-2015 a ensuite conduit à l'abandon ou au report d'investissements et à la mise en sommeil d'une bonne partie des nouveaux projets miniers. Elle a aussi conduit les producteurs Molycorp et Lynas à d'importantes difficultés financières, jusqu'à la mise en faillite de Molycorp mi-2015.

À mi-novembre 2015, les prix des différentes Terres Rares publiés par Metal-Pages étaient les suivants, en US$ par kg au départ de Chine (prix FAB) :

Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Tb
38.5	6.0	6.2	90.0	53.0	16.0	385	52.0	323	685

La plupart des prix étaient, au 3ème trimestre 2015, encore 1,3 à 1,8 fois supérieurs à ce qu'ils étaient en 2002-2003 pour La, Ce, Sm et Y, 3 fois supérieur pour Tb, 8 à 14 fois supérieurs pour Pr, Nd, Dy, mais le prix de l'europium, qui était la plus chère de toutes les Terres Rares en 2001-2002, est descendu nettement en dessous de son prix moyen de 2002-2003.

La demande générale en Terres Rares étant attendue en augmentation (5 à 6 %/an), la production devra croître pour y répondre. La Chine seule pourrait y faire face, ses ressources sont suffisantes. Les travaux d'exploration menés dans le Monde entier en 2010-2012 ont montré que bien des gisements potentiels existent hors de Chine. Si la production chinoise venait à faiblir ou à subir de nouvelles restrictions, le délai nécessaire à la mise en production des autres gisements pourrait à nouveau conduire à une situation de déficit, et de remontée des prix.

La situation de dépendance des pays européens n’est donc pas résolue à court terme.

Les acteurs français

La France n'est pas impliquée dans l'exploitation minière des Terres Rares. Une seule société se distingue en France dans l'industrie de leur transformation et joue un rôle important à l'échelle internationale, il s'agit de la société **Solvay France**, qui est la branche française du groupe belge Solvay, depuis son acquisition de l'entreprise française Rhodia en septembre 2011. Solvay est un groupe chimique diversifié dont la transformation des Terres Rares est une des spécialités. Son unité "Rare Earths Systems" est n°1 mondial de la production de Terres Rares pour la catalyse automobile. Solvay est également très présent sur le secteur des précurseurs pour poudres luminophores. Sa principale usine se situe à La Rochelle, qui fut longtemps la première source de produits à base de Terres Rares au monde. La branche Terres Rares de Solvay a aussi des sites de productions en Chine et au Japon. Solvay est absent du secteur de la production des aimants permanents, mais recycle des chutes de fabrication d'aimants et purifie Pr, Nd, Dy et Tb. Solvay développe aussi le recyclage des poudres luminophores contenue dans les ampoules fluo-compactes, qu'elle traite à La Rochelle pour obtenir des oxydes de La, Ce, Eu, Gd, Y et Tb.

La liste des industries utilisatrices de produits à base de Terres Rares en France est longue et variée. Elle inclut en particulier :

- des fabricants, assembleurs et distributeurs d'aimants permanents (Euromag, First Magnetic France, Emile Maurin, ...) ;
- les constructeurs automobiles et leurs équipementiers (PSA, Renault, Faurecia, Valéo, …, ainsi que les constructeurs étrangers ayant des usines en France), pour les pots catalytiques et les aimants permanents dans les petits moteurs électriques, les haut-parleurs, les colonnes de direction, etc. ;
- les fabricants d'éoliennes, en particulier celles de projets off-shore (Alstom, …).
- les raffineurs pétroliers (Total, Exxon, …) ;
- les fabricants de dispositifs d'éclairage (Philips Lighting, Aric, Osram, …) ;
- des fabricants de batterie (Saft, …) ;
- les fabricants de fibre optique (Draka / Prysmian, …) ;
- les fabricants de Lasers (Quantel Lasers, Cilas, …), d'optique (Edmund Optics France, etc.) ;
- les fabricants de produits de contraste pour IRM (Guervet, …).

La plupart des industries françaises des secteurs de l'aéronautique, du spatial et de la défense (Groupe Safran, Groupe Thalès, Airbus, Dassault Aviation, MBDA, etc.) utilisent vraisemblablement des Terres Rares dans les dispositifs utilisant des aimants permanents de hautes performances, dans des alliages spéciaux, dans des dispositifs optiques et Lasers.

L'industrie nucléaire consomme un peu de Terres Rares dans les barres de contrôle des réacteurs.

Enfin, la quasi-totalité des secteurs de l'économie, des services et de l'administration ainsi que le grand public utilise, en France, des ordinateurs, des imprimantes, des téléphones cellulaires, etc. équipés de micro-moteurs et/ou d'équipements électroacoustiques à Terres Rares, même si ces équipements ne sont pas fabriqués en France.

Commerce extérieur de la France

À l'exception du cérium, tous les autres éléments des Terres Rares sont fusionnés dans des nomenclatures douanières communes et il n'est pas possible d'en évaluer spécifiquement les importations ou exportations. De plus, l'essentiel des échanges est sous forme de composés, dont la nature et la teneur, donc la quantité réelle de Terres Rares contenues, n'est pas renseignée. Quant au cérium, les exportations sont gardées confidentielles.

La balance commerciale est déficitaire en tonnage et en valeur pour les Terres Rares sous forme métallique ou alliée, le fournisseur dominant étant la Chine.

Pour les composés, le solde était excédentaire en tonnage mais déficitaire en valeur entre 2009 et 2013 (déficit de 8,4 M€ en 2013) puis excédentaire aussi en valeur en 2014 (+ 2,8 M€). Cette évolution est vraisemblablement liée à la baisse des prix des composés de Terres Rares en provenance de Chine.

Par ailleurs, les tonnages exportés comme importés ont été pratiquement divisés par deux entre 2013 et 2014, ce qui peut aussi traduire une baisse de l'activité industrielle.

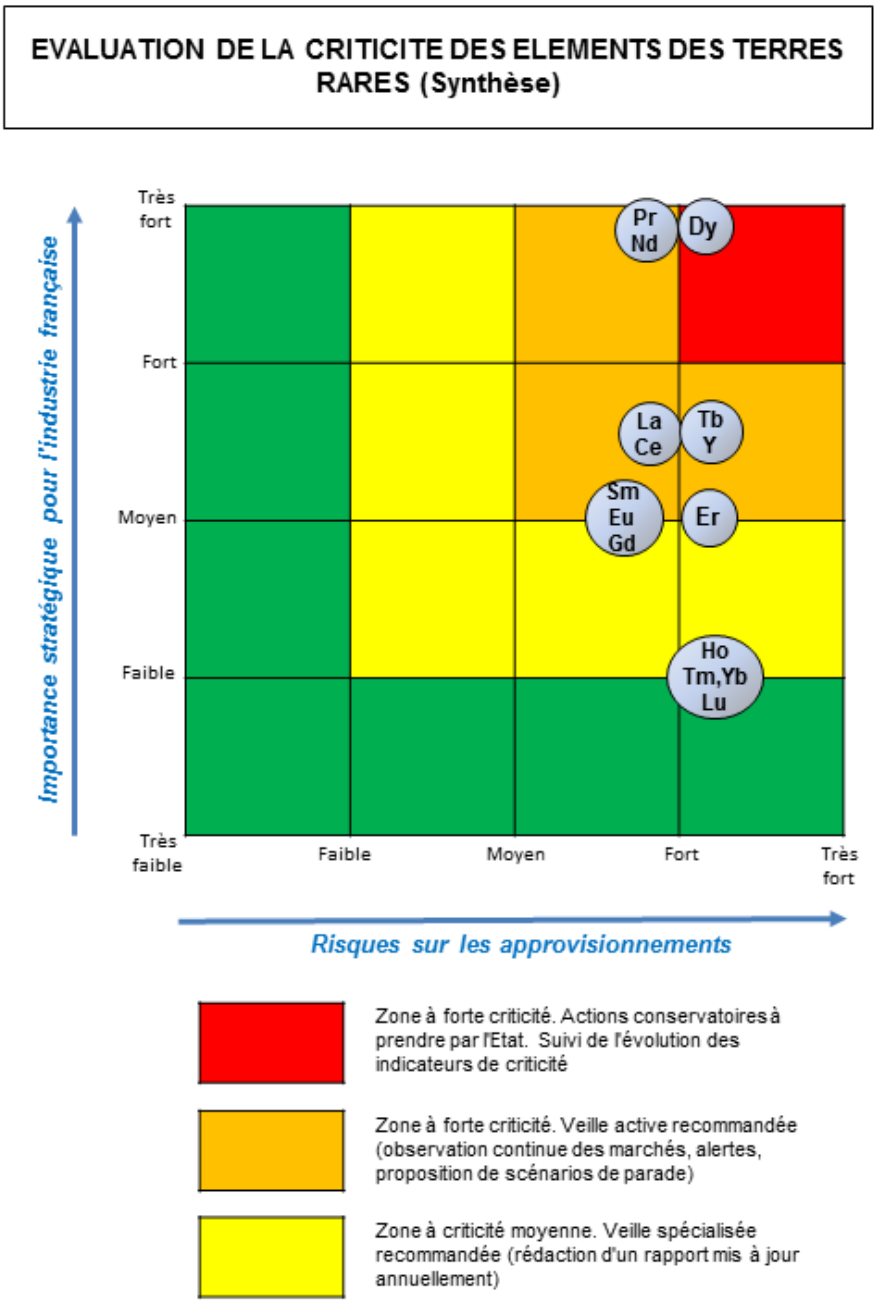
Les nomenclatures douanières distinguent aussi quatre produits susceptibles de contenir des Terres Rares de nature et des proportions variables : « aimants permanents en métal », « aimants permanents autres qu'en métal ou en ferrite agglomérée », « produits inorganiques luminophores » et « accumulateurs Ni-MH ». Les échanges extérieurs de la France sont systématiquement déficitaires en masse et en valeur pour ces quatre nomenclatures. Les déficits les plus forts en valeur sont les batteries Ni-MH (66,5 M€ de déficit commercial en 2014) et les aimants permanents métalliques (40,2 M€ de déficit en 2014).

Pour estimer la consommation française apparente de Terres Rares, il conviendrait, en sus des données d'import-export, de connaitre les données de production (production de l'usine Solvay/Rhodia de La Rochelle, en particulier), non publiées, mais aussi sa consommation : l'usine importe des composés non-séparés et en ressort des composés davantage séparés et transformés.

La consommation apparente, hors production française, c’est-à-dire les importations moins les exportations, aurait été de 323 tonnes de Terres Rares sous forme métal (séparé ou non) en 2014. La consommation apparente de composés (hors cérium) est impossible à déterminer, puisque le solde est excédentaire en tonnage (271 t en 2014) et que la consommation ne peut pas être négative, la France n'ayant pas de production primaire de Terres Rares.

Enfin, une quantité significative de Terres Rares est importée sous une forme déjà intégrée, dans les produits intermédiaires ou des produits finis.

Criticité


EVALUATION DE LA CRITICITE DES ELEMENTS DES TERRES RARES (Synthèse)
Importance stratégique pour l'industrie française
Très fort
Fort
Moyen
Faible
Très faible
Faible
Moyen
Fort
Très fort
Risques sur les approvisionnements
Pr Nd
Dy
La Ce
Tb Y
Sm Eu Gd
Er
Ho Tm,Yb Lu
Zone à forte criticité. Actions conservatoires à prendre par l'Etat. Suivi de l'évolution des indicateurs de criticité
Zone à forte criticité. Veille active recommandée (observation continue des marchés, alertes, proposition de scénarios de parade)
Zone à criticité moyenne. Veille spécialisée recommandée (rédaction d'un rapport mis à jour annuellement)

Sommaire

Résumé **3**

1. Introduction **25**

1.1. DEFINITIONS 25

1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE RÉALISATION DE CETTE ÉTUDE 26

1.3. SOURCES DES DONNÉES 26

2. Les Terres Rares, définitions et propriétés **29**

2.1. DEFINITION ET DONNÉES DE BASE 29

2.2. ISOTOPES 33

2.3. HISTORIQUE 34

2.4. PROPRIÉTES PHYSIQUES 39

2.5. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES 42

2.6. PROPRIETES BIOLOGIQUES ET TOXICITE 44

2.7. CLASSIFICATION DES TERRES RARES : TERRES RARES LEGERES ET TERRES RARES LOURDES. DIVERGENCES ET INCOHÉRENCES 45

3. La demande : usages et consommation **49**

3.1. LES GRANDES FAMILLES D'USAGES 52

3.1.1. Les aimants permanents 52

3.1.2. Les poudres de polissage 57

3.1.3. La catalyse de craquage des pétroles lourds 58

3.1.4. La catalyse automobile 59

3.1.5. Les batteries NiMH 61

3.1.6. Les autres applications des alliages métallurgiques 61

3.1.7. Industries du verre et des céramiques 62

3.1.8. Les luminophores 64

3.1.9. Les Lasers 68

3.1.10. Autres applications 69

3.1.11. Domaine de la défense 69

3.2. USAGES PAR ELEMENTS 70

3.2.1. Usages du lanthane 73

3.2.2. Usages du cérium 73

3.2.3. Usages du praséodyme 74

3.2.4. Usages du néodyme 75

3.2.5. Usages du samarium 75

3.2.6. Usages de l'europium 76

3.2.7. Usages du gadolinium 77
3.2.8. Usages du terbium 79
3.2.9. Usages du dysprosium 79
3.2.10. Usages de l'holmium 80
3.2.11. Usages de l'erbium 80
3.2.12. Usages du thulium 82
3.2.13. Usages de l'ytterbium 82
3.2.14. Usages du lutétium 83
3.2.15. Usages de l'yttrium 83

3.3. CONSOMMATION 85
3.3.1. Évolution récente de la consommation globale 85
3.3.2. Perspectives d'évolution de la demande 87

3.4. SUBSTITUTIONS 92

4. L'offre : ressources et production mondiale 95

4.1. LES SOURCES DE TERRES RARES 95
4.1.1. Abondance des Terres Rares dans l'écorce terrestre 95
4.1.2. Minéraux et minerais 97
4.1.3. Principaux types de gisements 105

4.2. RESSOURCES ET RESERVES 112
4.2.1. Évaluation globale des ressources et réserves en Terres Rares 112
4.2.2. Les gisements de Terres Rares dans le monde 117
4.2.3. Les indices de Terres Rares en France 122

4.3. PRODUCTION 126
4.3.1. Statistiques de production courante 126
4.3.2. Production française 128
4.3.3. Évolution historique de la production globale 129
4.3.4. Production par élément 131

4.4. PROCEDES DE PRODUCTION 133
4.4.1. Extraction minière 134
4.4.2. Minéralurgie et obtention de concentrés 134
4.4.3. Traitement chimique 137
4.4.4. Séparation 137
4.4.5. Réduction, raffinage, purification 139

4.5. RECYCLAGE 141

4.6. LIMITES SOCIO-POLITIQUES ET TECHNICO-ÉCONOMIQUES DE L'OFFRE 146
4.6.1. Les quotas chinois 146
4.6.2. La situation géopolitique et économique des principaux producteurs 147
4.6.3. Les paramètres sociaux et environnementaux 148

4.7. STOCKAGES STRATÉGIQUES ET DESTOCKAGES 148
4.7.1. Stockages nationaux 148

4.7.2. Stockages par les industriels 149
4.7.3. Stockage par les négociants et les ETF 149

4.8. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION 149

5. Prix des Terres Rares 151

5.1. ÉTABLISSEMENT DES PRIX 151

5.2. ÉVOLUTION RÉCENTE DES PRIX 152

5.3. ÉQUILIBRE OFFRE-DEMANDE ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION FUTURE DES PRIX 158

6. La filière industrielle 159

6.1. LES PRINCIPAUX PRODUCTEURS MINIERS DE TERRES RARES 160
6.1.1. Sociétés chinoises 160
6.1.2. Sociétés minières hors Chine 163
6.1.3. Les éventuels futurs producteurs miniers 169

6.2. LES PRINCIPAUX TRANSFORMATEURS, SÉPARATEURS ET FABRICANTS DE PRODUITS INTERMÉDIAIRES 170
6.2.1. Les principaux transformateurs et fabricants de produits intermédiaires chinois170
6.2.2. Les principaux transformateurs et fabricants de produits intermédiaires japonais 171
6.2.3. Les principaux transformateurs et fabricants de produits intermédiaires nord-américains 173
6.2.4. Les principaux transformateurs, fabricants de produits intermédiaires et recycleurs européens (hors France) 173
6.2.5. Les transformateurs, fabricants de produits intermédiaires, recycleurs et négociants en France 175

6.3. LES UTILISATEURS EUROPÉENS FINAUX 176

6.4. LES UTILISATEURS FRANÇAIS FINAUX 177
6.4.1. Fabricants d'aimants permanents 177
6.4.2. Constructeurs et équipementiers automobiles 178
6.4.3. Fabricants d'éoliennes 178
6.4.4. Industrie pétrolière 179
6.4.5. Éclairage 179
6.4.6. Industries diverses 179
6.4.7. Industries de défense, aéronautique, et spatiale 180
6.4.8. Industrie nucléaire 180

7. Commerce extérieur et consommation de la France 181

7.1. COMMERCE EXTERIEUR 181

7.2. CONSOMMATION FRANÇAISE DE TERRES RARES 187

8. Criticité 188

Bibliographie 189

Liste des figures

Figure 1 - Les Terres Rares dans le tableau de Mendeleïev en présentation classique compacte. 31

Figure 2 - Les Terres Rares dans le tableau de Mendeleïev en présentation développée. 32

Figure 3 - Filiation des découvertes successives des éléments des Terres Rares. 37

Figure 4 - Quelques métaux des Terres Rares relativement stables à l'air (photo J.F. Labbé).....42

Figure 5 - Répartition des usages des Terres Rares par filières dans le monde en 2012.....51

Figure 6 - Tailles (V = volume) et formes optimales relatives de aimants permanents pour générer un champ de 0,1 Tesla à 5 mm d'une face polaire de l'aimant, selon les technologies et leur dates de mise au point. Adapté d'après Arnold Magnetic Technologies.....52

Figure 7 - Mesure du paramètre BH_{max} de différents aimants © Arnold Magentic Technologies. 54

Figure 8 - Illustration de la taille et de la force d'aimantation d'un aimant permanent Nd-Fe-B (© J.Lucas).....55

Figure 9 - Aimants permanents dans un véhicule standard (© Renault, 2011). 56

Figure 10 - Éolienne à entrainement direct à aimants permanents de 4 MW de General Electric pour installation off-shore (sur mât de 90 m, diamètre du rotor de 110 m). 57

Figure 11 - Mécanisme d'action chimico-mécanique des poudres de polissage à base de dioxyde de cérium (© J. Lucas, 2014).....58

Figure 12 - Schéma du procédé de craquage catalytique. Source : Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 1996. 59

Figure 13 - Vue en coupe d'un canal de monolithe de pot catalytique. © Société Chimique de France, division catalyse (www.societechimiquedefrance.fr). 60

Figure 14 - Écorché et schéma d'un pot catalytique simple (© Johnson Matthey Plc). 60

Figure 15 - Batterie NiMH utilisée dans les véhicules hybrides (contient 10 à 15 kg de Terres Rares, lanthane principalement) (source : Lucas, 2014).....61

Figure 16 - Schéma d'un écran à tube cathodique. 65

Figure 17 - Evolution des livraisons de téléviseurs par technologie (source : Display Search, Quarterly advanced global TV shipment and forecast report, 3/01/12).....66

Figure 18 - Composition et fonctionnement d'une ampoule fluo-compacte. 67

Figure 19 - Dispositif de production de lumière blanche à partir d'une LED bleue. 68

Figure 20 - Répartition des usages de La, Ce, Pr, Nd et Eu en 2012.....71

Figure 21 - Répartition des usages de Gd, Tb, Dy, Er, Y et Ho-Tm-Yb-Lu en 2012. 72

Figure 22 - Fluorescence rouge des complexe à Eu^{3+} verte des complexes Tb3+ et bleue (fibres) des complexes Tm3+ dans un billet de banque en Euros.....77

Figure 23 - Formule développée du gadopentétate de diméglumine commercialisé par Bayer sous le nom de Magnevist™ 78

Figure 24 - Schéma simplifié d'un amplificateur optique à l'erbium 81

Figure 25 - Répartition de la consommation directe de Terres Rares par ensemble géographique. 85

Figure 26 - Évolution récente de la consommation mondiale de Terres Rares et prévisions d'évolution selon D. Kingsnorth, IMCOA, juin 2014.....86

Figure 27 - Prévisions d'évolution de la demande en Terres Rares selon le Rapport sur les Matières Premières critiques du Groupe de Travail ad-hoc de la Commission Européenne (mai 2014), citant Roskill, IMCOA et TMR. En haut, éléments dont la consommation excède 4,9 kt d'oxyde par an (La, Ce, Pr, Nd et Y) ; En bas : éléments dont la consommation est inférieure à 2,1 kt d'oxyde par an. 90

Figure 28 - Substituabilité des Terres Rares selon leurs applications (© ERECON, mars 2015). 94

Figure 29 - Abondance comparée des Terres Rares et des autres éléments dans la croûte terrestre.....96

Figure 30 - Quelques minéraux porteurs de Terres Rares. 102

Figure 31 - Spectre des lanthanides dans des granites de l'Erzgebirge et le Fichtelgebirge (Saxe et Bavière, Allemagne) et dans des monazites et xénotimes qu'ils contiennent. Traduit de Stosch, 2000.....103

Figure 32 - Spectre des Terres Rares dans divers minéraux à Terres Rares de gisements en exploitation ou en projet. © Tuduri et al, 2015.....104

Figure 33 - Gisement de Terres Rares de Kringlerne au Groenland (Tanbreez Mining) avec ses alternances de lits de kakortokite (plus clairs) et de lujavrite (plus sombres). Photo J. Tuduri, BRGM.....107

Figure 34 - Eudialyte (rose) dans la katokortite du gisement de Kringlerne au Groenland. Photo J. Tuduri, BRGM. 107

Figure 35 - Vue satellite d'exploitations d'argiles ioniques de la région de Ganzhou, province du Jiangxi (Chine). La vue couvre une zone d'environ 500 m. de large. © Google Maps. 110

Figure 36 - Répartition par pays des ressources identifiées en Terres Rares, à des degrés divers de fiabilité. Hypothèses basses et hautes selon les sources (cf. tab. 16). 116

Figure 37 - Localisation des principales mines et principaux gisements mondiaux de Terres Rares (BRGM, 2014).....119

Figure 38 - Les principaux placers à monazite grise de Bretagne (extrait de Donnot et al. 1973). 122

Figure 39 - Concentré de monazite grise nodulaire à europium du Grand Fougeray (Photo S. Colin, BRGM).....123

Figure 40 - Gîtes et indices de Terres Rares en France métropolitaine (source : BRGM, 2015).....124

Figure 41 - Répartition de la production minière de Terres Rares par pays en 2014. 126

Figure 42 - Production mondiale de Terres Rares 1965-2014, et prévisions 2015-2020. 130

Figure 43 - Évolution estimée de la production de Terres Rares par élément, en kt de métal contenu, selon (Du & Graedel, 2011). 132

Figure 44 - Les étapes de production et de séparation des terres rares. 133

Figure 45 - Premières étapes du traitement des Terres Rares à Bayan Obo (Chine).Traduit et adapté d'après Navarro & Zhao (2014). 135

Figure 46 - Premières étapes du procédé de traitement des Terres Rares à Mountain Pass (USA) traduit et adapté d'après Navarro & Zhao (2014). 136

Figure 47 - Cellules SX en Australie (Alkane Resources demonstration plant, Dubbo project) source : www.techmetalsresearch.com.....138

Figure 48 - Présentation de la technique d'extraction par solvant utilisé à Mountain Pass par Molycorp. 139

Figure 49 - Organigramme du raffinage sélectif complet des Terres Rares mis en oeuvre à Bayan Obo (Chine). 140

Figure 50 - Évolution des prix de l'yttrium, des Terres Rares légères (lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, samarium) et du gadolinium sous forme métal ≥99% FAB Chine depuis 2002 (source : www.metal-pages.com).....154

Figure 51 - Évolution des prix de l'europium, du terbium et du dysprosium sous forme métal ≥ 99 % FAB Chine depuis 2002 (source : www.metal-pages.com).....154

Figure 52 - Évolution des prix de l'yttrium, des Terres Rares légères et du gadolinium sous forme d'oxyde depuis 2008 pour l'export (FAB Chine en US$/kg) et pour le marché intérieur chinois (en CNY/kg) (source : www.metal-pages.com).....155

Figure 53 - Évolution des prix de l'europium, du terbium et du dysprosium sous forme d'oxyde depuis 2008 pour l'export (FAB Chine en US$/kg) et pour le marché intérieur chinois (en CNY/kg) (source : www.metal-pages.com).....155

Figure 54 - Évolution des prix des oxydes d'Eu, Tb et Dy depuis avril 2013 pour l'export (FAB Chine en US$/kg) et pour le marché intérieur chinois en CNY/kg selon www.metal-pages.com, et de la cotation des oxydes de Tb et Dy à la bourse de Fanya depuis nov. 2014, en CNY/kg.....156

Figure 55 - La chaine de valeur des Terres Rares de l'extraction à la fabrication d'aimants permanents, avec les principales sociétés impliquées en 2012 (Roskill/IMCOA, 2012).....159

Figure 56 - Évolution du cours de l'action de Molycorp au New York Stock Exchange depuis mi-2010.....164

Figure 57 - Évolution du cours de l'action de Lynas Corp. à l'Australian Stock Exchange depuis mi-2010.....166

Figure 58 - Synthèse de la criticité des terres rares.....188

Liste des tableaux

Tableau 1 - Les principaux isotopes des éléments des Terres Rares. 33

Tableau 2 - Historique de la découverte et étymologie des noms des éléments des Terres Rares.....36

Tableau 3 - Quelques caractéristiques physico-chimiques des Terres Rares.....41

Tableau 4 - Classification des Terres Rares en lourdes et légères selon les auteurs.....48

Tableau 5 - Les principaux usages des Terres Rares, par élément (tonnages estimés à +/- 15 %).....49

Tableau 6 - Consommation mondiale de Terres Rares par filières en 2012, en tonnes d'oxydes (Source : Roskill / IMCOA, 2013).....50

Tableau 7 - Évolution des usages par filière entre 2012 et 2014. Source : Roskill 2015. 51

Tableau 8 - Principaux domaines d'applications des aimants permanents à Terres Rares. 54

Tableau 9 - Proportions de La_2O_3 ajouté dans certains verres optiques. Source : Glass Technology, cité par Roskill (2011). 64

Tableau 10 - Principaux composés luminophores utilisés dans les ampoules fluo-compactes. 67

Tableau 11 - Prévisions de croissance de la demande en Terres Rares par secteur d'application, selon D. Kingsnorth (IMCOA / Curtin Universtity, juin 2014).....89

Tableau 12 - Abondance naturelle des Terres Rares dans la croûte terrestre (et dans l'eau de mer), selon CRC Handbook, 2005-2012. 95

Tableau 13 - Principaux minéraux à Terres Rares. 99

Tableau 14 - Proportions des différentes Terres Rares dans quelques exemples de minéraux et gisements exploités, d'après Roskill, 2015.....101

Tableau 15 - Projets Terres Rares avancés détenus ou développés par des sociétés occidentales répertoriés par TMR (Technology Metals Research) au 7/08/2015. 114

Tableau 16 - Récapitulatif des réserves et ressources mondiales en Terres Rares par pays, en kt de TR contenues, selon différentes sources. 115

Tableau 17 - Équivalence des réserves et ressources en Terres Rares en années de production (fourchettes correspondant aux hypothèses basses et hautes du tableau 15). 116

Tableau 18 - Les principaux projets miniers de Terres Rares en développement en 2015 (hors Chine). 121

Tableau 19 - Comparaison des productions minières de Terres Rares selon différentes sources. 127

Tableau 20 - Production minière par oxyde de Terres Rares estimée pour 2012, à +/-15% publiée par l'Ad-Hoc Working Group sur les métaux critiques de la Commission Européenne en mai 2014, citant (Roskill et IMCOA, 2013) et USGS pour l'Australie. 132

Tableau 21 - Flux et stocks de Terres Rares en 2007, selon Du & Graedel, 2011. 133

Tableau 22 - Estimation d'une fourchette de contribution possible du recyclage des Terres Rares pour la production des luminophores, des batteries NiMH et des aimants permanents en 2020, selon Binnemans et al. (2013). 144

Tableau 23 - Évaluation de la contribution du recyclage des Terres Rares dans la demande mondiale en Terres Rares en 2020, selon Binnemans et al. (2013). 145

Tableau 24 - Évolution des quotas chinois à l'exportation entre 2005 et 2015.....146

Tableau 25 - Comparaison des prix moyens des 5 oxydes de Terres Rares publiés par Industrial Minerals avec ceux publiés par Metal Pages 151

Tableau 26 - Prix des Terres Rares FOB Chine en US$/kg. 153

Tableau 27 - Récapitulatif simplifié des restructurations en cours (2014-2015) des entreprises du secteur des Terres Rares en Chine (d'après Écomine, mai 2015). 160

Tableau 28 - Production de concentrés (Australie) et de composés (Malaisie) de Terres Rares par Lynas, selon des rapports trimestriels publiés en ligne (www.lynas.com). 165

Tableau 29 - Statistiques françaises d'import-export de métaux, alliages et composés de Terres Rares, hors cérium et ferrocérium. Données CAF-FAB, hors matériel militaire. Source : http://lekiosque.finances.gouv.fr.....182

Tableau 30 - Statistiques françaises d'import-export de ferrocérium et des composés du cérium. Données CAF-FAB, hors matériel militaire. Source : http://lekiosque.finances.gouv.fr 183

Tableau 31 - Statistiques françaises d'import-export d'aimants permanents, hors ferrites agglomérées. Données CAF-FAB, hors matériel militaire. Source : http://lekiosque.finances.gouv.fr 186

Tableau 32 - Statistiques françaises d'import-export de luminophores et d'accumulateurs Ni-MH. Données CAF-FAB, hors matériel militaire. Source : http://lekiosque.finances.gouv.fr 187

1. Introduction

Cette étude a été réalisée dans le cadre de la Convention 2014 n° 2101306455 relative aux eaux souterraines, aux ressources minérales, au littoral et à l'organisation des connaissances sur la nature et les paysages, signée le 14 mai 2014 entre la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) et le BRGM.

1.1. DEFINITIONS

Le glossaire ci-dessous donne la définition de certains termes utilisés de manière récurrente dans ce rapport. Il importe, notamment pour permettre des comparaisons entre différentes sources nationales et internationales relatives aux matières premières minérales, que ces termes soient utilisés de manière standardisée et rigoureuse. C'est malheureusement loin d'être le cas, des termes aussi importants que ressources et réserves étant utilisés de manière disparate.

- **criticité :** cette étude vise notamment à déterminer les facteurs de criticité pouvant impacter la sécurité des approvisionnements nécessaires aux industries françaises utilisant la/les matière(s) première(s) minérale(s) étudiée(s). Les facteurs sont déterminés et notés selon la grille suivante :

Évaluation de la criticité	Note
Très forte	5
Forte	4
Moyenne	3
Faible	2
Très faible	1

- **gisement :** concentration naturelle de minéraux, économiquement exploitable ;
- **indice ou prospect :** il s'agit d'une minéralisation dont l'existence est connue grâce à des observations de terrain, éventuellement étayées par quelques sondages et petits travaux miniers (tranchées, galeries de reconnaissance…) et/ou par des observations indirectes (géochimie, géophysique) mais dont l'intérêt économique n'est pas encore démontré ;
- **minéral / minéraux :** désigne une substance inorganique, d'origine naturelle, caractérisée par sa formule chimique et par l'arrangement de ses atomes selon une structure géométrique particulière ;
- **minerai :** désigne une roche contenant une concentration d'un ou plusieurs minéraux en quantité suffisante pour être économiquement exploitable ;
- **minéralisation :** désigne une concentration naturelle élevée de minéraux dont l'exploitation pourrait présenter un intérêt économique. Il s'agit d'un concept plus large que le terme minerai qui, dans les gisements, désigne la partie exploitable de la minéralisation ;
- **primaire :** ce qualificatif, appliqué à un métal, ou à une production de métal, indique du métal produit à partir d'un minerai, en dehors de tout recyclage ;
- **potentiel géologique :** il s'agit d'une première estimation, basée sur des critères et des raisonnements géologiques, de l'existence de gisements dans une région ou un pays ;
- **réserves :** il s'agit de la partie de la ressource dont l'exploitabilité technologique et économique a été démontrée lors d'une étude de faisabilité.

- **ressource :** il s'agit d'une minéralisation dont l'enveloppe et le volume ont fait l'objet de premières estimations, à l'aide de sondages, de petits travaux miniers, de prospection en surface et/ou d'observations indirectes par géochimie, géophysique, etc. Les ressources sont qualifiées de « inférées », « indiquées » et « mesurées » par ordre de précision croissante obtenue en fonction de la quantité et du détail des travaux réalisés ;
- **secondaire :** ce qualificatif, appliqué à un métal, ou à une production de métal, indique du métal produit à partir du recyclage de déchets, qui peuvent être des produits manufacturés usagés en fin de vie, mais aussi des chutes de fabrication (copeaux, poussières, coulures, bavures, etc.).

1.2. CONDITIONS ET LIMITES DE REALISATION DE CETTE ETUDE

Cette étude a été réalisée par la Direction des Géoressources du BRGM. La complexité, l'opacité de la filière, la rareté de la documentation factuelle, ainsi que le temps disponible pour réaliser cette étude en conditionnent le contenu.

Malgré l'utilisation des meilleures sources ouvertes disponibles et le soin apporté à la rédaction de cette étude, le BRGM n'est pas en mesure de garantir l'exactitude des informations et des données citées. L'industrie des Terres Rares n'est pas toujours transparente et les données ouvertes peuvent être incomplètes et/ou sujettes à erreurs, intentionnelles ou non. Il existe notamment une importante production illégale de Terres Rares en Chine, alimentant un marché noir estimé pouvoir représenter 40 % de la production officielle chinoise et sur lequel les informations quantitatives sont rares.

À noter que les Terres Rares font partie des vingt matières premières minérales considérées comme particulièrement critiques dans l'étude sur les matières premières critiques pour l'Union Européenne (Ad-Hoc Working Group de la Commission Européenne, mai 2014).

1.3. SOURCES DES DONNEES

Le présent rapport a été produit à partir de l'importante documentation technique du BRGM, incluant notamment (voir liste bibliographique en fin de rapport) :

- les bases de données et rapports publics de l'United States Geological Survey (USGS) (Gambogi, 2014, 2013 ; Cordier, 2012, 2011, etc.) ;
- les publications du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE/UNEP), et de son International Panel on Sustainable Resource Management (www.unep.org/resourcepanel/) ;
- la base de données sur les mines et les gisements de SNL (Metals Economic Group) (www.snl.com) ;
- le rapport sur les matières premières stratégiques du réseau ERECON (European Rare Earth Competency Network) d'octobre 2014 ;
- les études spécialisée sur les Terres Rares produites par Roskill (14ème édition, 2011 et 15ème édition, 2015) ;
- le site de la bourse australienne (www.asx.com), celui des autorités de marché en valeurs mobilières du Canada (www.sedar.com) ;
- divers sites internet ou blogs fournissant des informations et des analyses relatives aux acteurs, aux marchés et aux technologies liés aux Terres Rares comme Investorintel (www.investorintel.com) ; et Technology Metals Research (TMR, www.techmetalsresearch.com), sites d'information gratuits réalisés par des consultants spécialisés.

ainsi que nombre d'informations ouvertes rassemblées ou consultées dans le cadre de cette étude, et en particulier les sites Internet et les rapports annuels des sociétés productrices ou consommatrices, ou celles détenant des permis d'exploration ou d'exploitation sur des projets d'exploitation de Terres Rares.

Les propriétés intrinsèques des Terres Rares sont présentées au chapitre 2. Les aspects concernant la demande (usages, consommation et leurs perspectives d'évolution, substitutions) sont abordés au chapitre 3, et ceux concernant l'offre au chapitre 4 (ressources, production, recyclage). Le chapitre 5 traite des évolutions récente et future des prix. Le chapitre 6 passe en revue certains des principaux acteurs industriels du marché des Terres Rares, au niveau mondial et plus particulièrement en France. Le chapitre 7 présente un état des lieux du commerce extérieur français des Terres Rares. Enfin, le chapitre 8 de conclusion présente une synthèse des criticités et propose des recommandations.

Remarque : Afin de distinguer les Terres Rares (les 16 à 17 éléments traités ici, cf. 2.1) d'une terre qui serait rare, il a été arbitrairement convenu d'écrire Terres Rares dans le premier sens avec des majuscules.

2. Les Terres Rares, définitions et propriétés

2.1. DEFINITION ET DONNÉES DE BASE

« Terres Rares » est un nom collectif donné, pour des raisons historiques et pratiques[5], à un ensemble de 15 à 17 éléments métalliques du tableau périodique de Mendeleïev, aux propriétés chimiques très voisines, qui se trouvent pratiquement toujours associés dans leurs gisements dans la nature, et qui comprend classiquement :

- l'ensemble des 15 **lanthanides,** ou **lanthanoïdes**[6] (fig.1 et 2), c'est-à-dire les 15 éléments portant les numéros atomiques successifs 57 à 71 : **lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, prométhium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium et lutétium.** Ces éléments ont tous une tendance à s'oxyder avec un degré d'oxydation de +III, quelques-uns ayant aussi des degrés d'oxydation +II ou +IV. Ils ont une configuration électronique caractérisée par le remplissage progressif de la sous-couche 4f, passant de 0 électron 4f pour le lanthane à 14 électrons 4f pour le lutétium[7]. Leurs configurations électroniques externes sont proches, et en particulier la configuration électronique externe de leur cation trivalent, ce qui leur confère des propriétés chimiques très voisines. Dans leurs minéraux et leurs gisements naturels, ils sont presque toujours associés, en proportions diverses, à l'exception du prométhium, dont il n'existe pas d'isotopes stables et qui n'existe qu'en quantité infime et de manière fugace dans la nature ;
- l'**yttrium**, numéro atomique 39, qui n'est pas un lanthanide, mais dont les propriétés atomiques et chimiques et le rayon ionique sont si proches de ceux des lanthanides, surtout des plus lourds d'entre eux, qu'il se trouve toujours associé à ces éléments dans leurs différents gisements.

Certains auteurs, et en particulier l'IUPAC[8], rattachent aussi le **scandium**, de numéro atomique 21, au groupe des Terres Rares, du fait qu'il se place dans la même colonne que l'yttrium et les lanthanides dans la présentation compacte du tableau de Mendeleïev (fig.1) ou que l'yttrium et le lutétium dans sa présentation développée (fig.2). Il a une configuration électronique externe similaire (cf. tab.3), mais un rayon ionique bien plus faible, et il ne se substitue donc pas de manière significative aux lanthanides ni à l'yttrium dans leurs minéraux naturels. Il n'est donc généralement pas spécialement concentré dans les concentrations

---

[5] Ces raisons pratiques concernent aussi bien les géologues et les miniers, pour qui ces éléments sont toujours associés, dans des proportions diverses, dans leurs gisements (à l'exception du prométhium, élément radioactif fugace à courte durée de vie), que pour les industriels de la filière métallurgique et de séparation des divers éléments des Terres Rares.

[6] Le terme "lanthanide" avait été introduit en 1925 par Victor Goldschmidt, considérant qu'il était utile de disposer d'un nom collectif pour désigner l'ensemble des 15 éléments n° 57 à 71, les minéralogistes et les chimistes ayant souvent besoin de parler collectivement de ces éléments presque toujours associés et aux propriétés chimiques très voisines. Ce groupe est bien pratique pour écrire des formules chimiques avec un symbole collectif "Ln", comme par exemple "Ln_2O_3". Plus tard, l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry / Union Internationale de la Chimie Pure et Appliquée, www.iupac.org) préfèrera et officialisera le terme de "lanthanoïde" pour désigner ce même groupe (Nomenclature of Inorganic Chemistry, IUPAC recommendations, 2005). Le terme de lanthanide reste néanmoins largement répandu et utilisé. L'IUPAC, anglophone, avait fait sa recommandation pour l'anglais pour éviter toute ambiguïté, parce que le suffixe "*-ide*" est utilisé en chimie, en anglais, pour désigner des anions simples. Par exemple l'ion chlorure (Cl^-) est traduit en anglais par "*chloride*", l'ion sulfure (S^{2-}) par "*sulphide*". En français, cette difficulté n'existe pas et le terme de lanthanide n'est pas ambigu.

[7] À noter que tous les éléments au-delà du lutétium dans le tableau de Mendeleïev ont aussi 14 électrons 4f.

[8] International Union of Pure and Applied Chemistry / Union Internationale de la Chimie Pure et Appliquée

naturelles des autres Terres Rares[9]. Pour cette raison, et au vu de l'importance relativement faible de ses applications, cet élément ne sera pas traité en détail dans la présente étude. Il sera cependant parfois cité, en particulier dans des tableaux, par souci de comparaison avec les autres Terres Rares.

La figure 1 indique la position des lanthanides et des Terres Rares dans le tableau périodique de Mendeleïev sous sa forme classique, compactée (l'ensemble des lanthanides est rassemblé en une case de la colonne 3, cet ensemble étant développé dans une ligne décalée sous le tableau). La figure 2 montre les lanthanides et les Terres Rares dans le tableau de Mendeleïev élargi développant le bloc F.

Dans le présent rapport, nous désignerons par « lanthanide » ou « lanthanoïde » l'ensemble des éléments 57 à 71, du lanthane au lutétium inclus, conformément à la signification historique et largement répandue de ce terme[10]. Nous désignerons par « éléments des Terres Rares », parfois abrégé en « Terres Rares », les lanthanides plus l'yttrium[11].

---

[9] Des traces de scandium sont présentes dans les minéralisations à Terres Rares, mais sans véritable facteur de concentration. La première découverte du scandium a d'ailleurs été réalisée à partir de minerais de Terres Rares. En effet, même s'il n'y est que très peu concentré, les attaques chimiques en phase aqueuse (hydrométallurgiques) le mettent en solution avec les autres Terres Rares puisque, en solution aqueuse, le rayon ionique n'est plus un facteur discriminant, alors qu'il l'est à l'intérieur du réseau cristallin d'un minéral solide.

[10] Certains auteurs (Mortimer & Müller, 2001; Zepf, 2013) ont récemment ajouté à la confusion sémantique en affirmant que le lanthane, du fait qu'il n'avait pas d'électron 4f, ne serait pas un lanthanoïde, et que ce terme ne devait rassembler que les éléments 58 à 71. Cette assertion est très contestable. En effet :

- D'une part elle est illogique. En effet, "-oïde" signifie "similaire à" : désigner les éléments 58 à 71 sous le vocable de lanthanoïdes du fait qu'ils ressemblent au lanthane (selon les critères que l'on considère pour constater cette ressemblance) puis en exclure le lanthane sous prétexte qu'ils ne ressemblerait pas aux autres lanthanoïdes (selon les mêmes critères) est une absurdité logique. En logique pure, si A est semblable à B, alors B est semblable à A ;
- D'autre part, elle est inutile. Le mot "lanthanide" a été créé historiquement non pas pour désigner les 14 éléments dont la couche 4f se remplirait de 1 à 14, mais pour pouvoir désigner, de manière collective, pratique et utile, les éléments 57 à 71, en raison de leur grande proximité chimique et minéralogique. Ce ne sont pas ces électrons 4f, qui est une sous-couche interne, qui déterminent les propriétés chimiques majeures de ces métaux : l'ajout d'un électron en 4f entre 0 et 14 électrons, du fait qu'ils sont ajoutés en profondeur, ne modifient que peu les propriétés chimiques. C'est pourquoi, depuis le lanthane avec 0 électrons 4f au lutétium avec 14 électrons 4f, il y a 15 lanthanides qui ont des propriétés chimiques très voisines. Un mot simple pour désigner collectivement ces éléments 57 à 71 est utile et pratique pour les géologues, les miniers, les métallurgistes et les chimistes industriels. Un mot qui ne désignerait collectivement que les éléments 58 à 71 (du cérium au lutétium, hors lanthane) n'a guère d'utilité pratique. Au-delà de la question logique (cf. alinéa précédent), considérer que le lanthane n'est pas un lanthanide obligerait à parler, à chaque fois que l'on a besoin de parler collectivement des éléments 57 à 71, des "lanthanides-lesquels-n'incluent-pas-le-lanthane-plus-le-lanthane". Le choix de la simplicité conduit donc bien à désigner par "lanthanides" ou lanthanoïdes" l'ensemble des éléments 57 à 71, y inclus le lanthane ;
- De plus, exclure le lanthane des lanthanoïdes n'est ni la définition historique ni l'opinion de la très grande majorité des autres auteurs (IUPAC, Société Chimique de France, Royal Society of Chemistry (britannique), USGS, BGS, Ad-Hoc Working Group de la Commission Européenne sur les Métaux Critiques, ensemble des sociétés minières, etc.), pour qui les lanthanides ou lanthanoïdes incluent bien les 15 éléments 57 à 71, du lanthane au lutétium inclus.

[11] Il serait en effet plus précis, lorsque l'on parle de l'yttrium et des lanthanides, de parler des "éléments des Terres Rares", comme les anglo-saxons parlent des "rare-earth elements" (REE), ou éventuellement des "métaux des Terres Rares" si l'on se réfère à ces éléments sous leur forme non combinée, métallique.

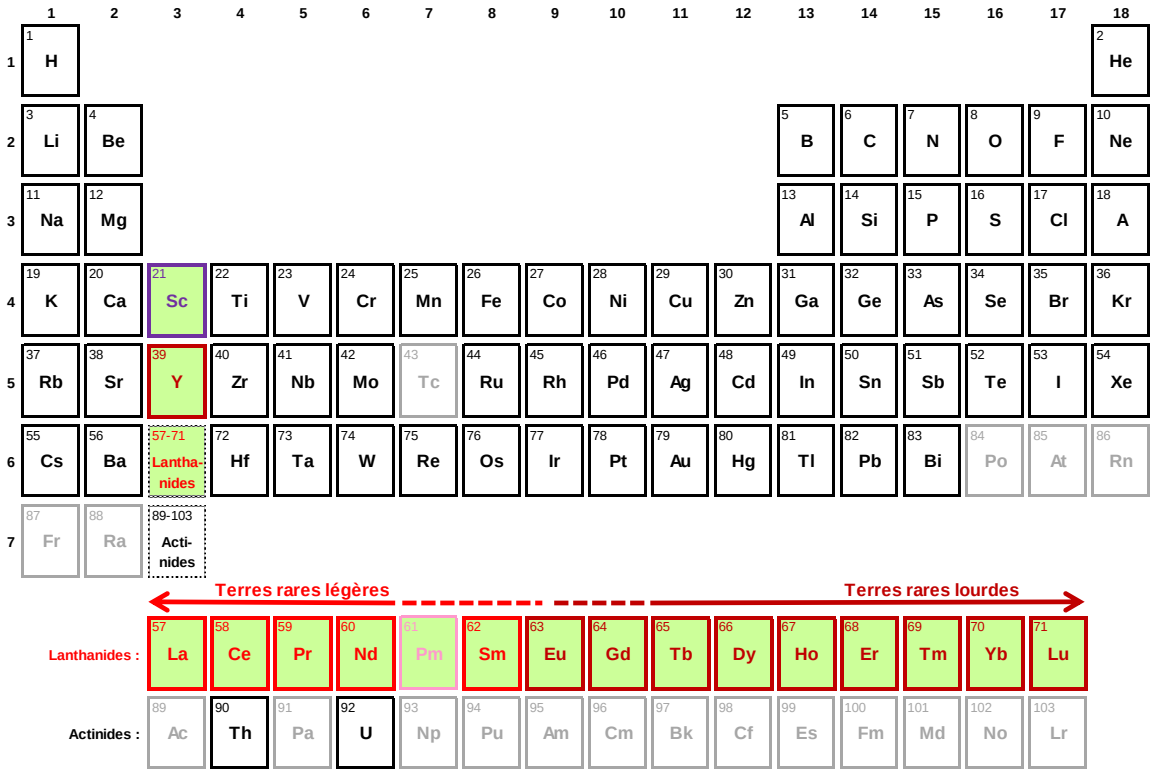


Figure 1 - Les Terres Rares dans le tableau de Mendeleïev en présentation classique compacte.

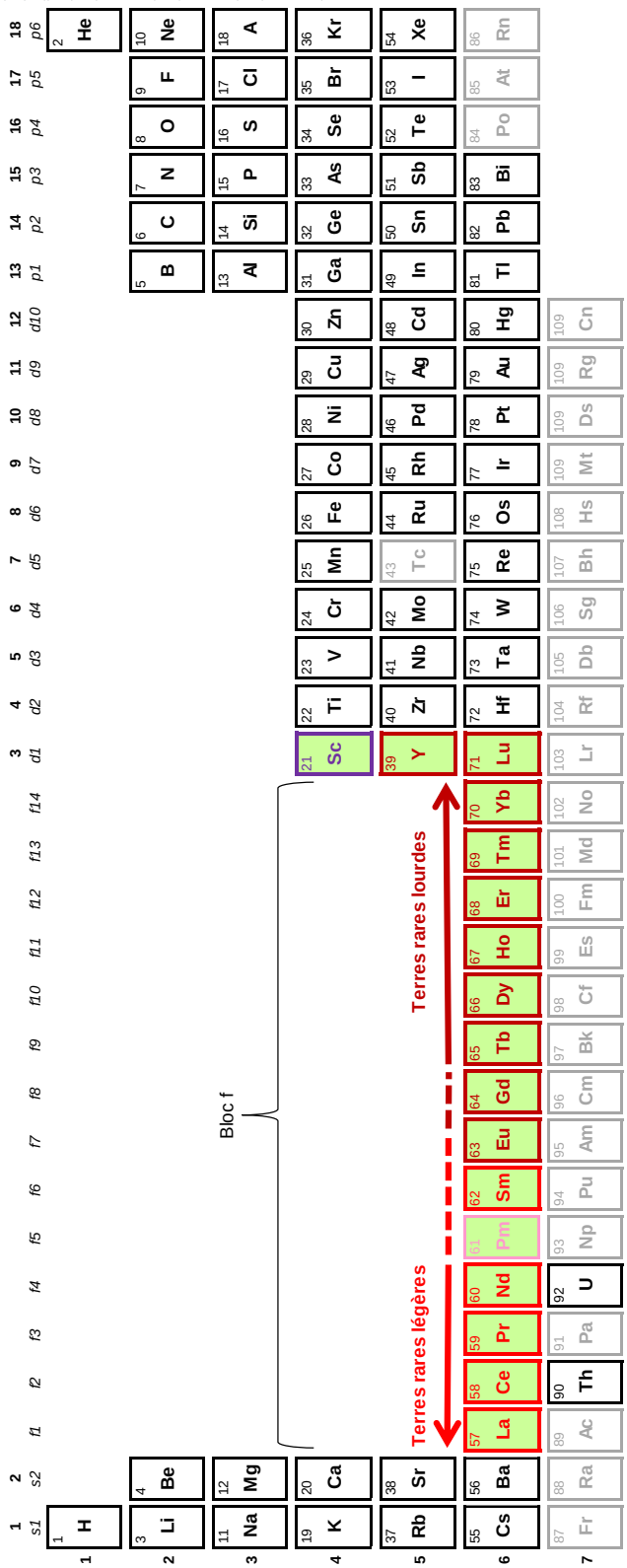


Figure 2 - Les Terres Rares dans le tableau de Mendeleïev en présentation développée.

2.2. ISOTOPES

Il existe dans la nature (sur Terre) plusieurs isotopes stables[12] des éléments des Terres Rares de numéro atomique pair, et généralement un seul ou parfois deux[13] isotopes stables des éléments des Terres Rares de numéro atomique impair. Ces isotopes sont récapitulés, avec leurs abondances naturelles relatives, dans le tableau 1, qui indique aussi les principaux isotopes instables et radioactifs artificiels.

Elément	Isotope	Abondance naturelle	Période radioactive
Yttrium (39)	^{87}Y	artificiel	3.3 j
	^{88}Y	artificiel	106.6 j
	^{89}Y	100%	stable
	^{90}Y	artificiel	2.67 j
	^{91}Y	artificiel	58.5 j
Lanthane (57)	^{137}La	artificiel	60 ka
	^{138}La	0.09%	1.05×10^{11} a
	^{139}La	99.91%	stable
Cérium (58)	**^{136}Ce**	0.185%	$> 0.7 \times 10^{14}$ a
	^{138}Ce	0.25%	$> 3.7 \times 10^{14}$ a
	^{139}Ce	artificiel	137 j
	^{140}Ce	88.45%	stable
	^{141}Ce	artificiel	32.5 j
	^{142}Ce	11.114%	$> 1.6 \times 10^{17}$ a
	^{144}Ce	artificiel	285 j
Praséodyme (59)	**^{141}Pr**	100%	stable
Néodyme (60)	**^{142}Nd**	27.13%	stable
	^{143}Nd	12.18%	stable
	^{144}Nd	23.80%	2.1×10^{15} a
	^{145}Nd	8.30%	stable
	^{146}Nd	17.19%	stable
	^{148}Nd	5.76%	stable
	^{150}Nd	5.64%	1.33×10^{20} a
Prométhium (61)	^{145}Pm	artificiel	17.7 a
	^{146}Pm	artificiel	5.53 a
	^{147}Pm	artificiel	2.6234 a
Samarium (62)	**^{144}Sm**	3.07%	stable
	^{145}Sm	artificiel	340 j
	^{146}Sm	artificiel	103 Ma
	^{147}Sm	14.99%	1.06×10^{11} a
	^{148}Sm	11.24%	7×10^{15} a
	^{149}Sm	13.82%	$> 2 \times 10^{15}$ a
	^{150}Sm	7.38%	stable
	^{151}Sm	artificiel	89 a
	^{152}Sm	26.75%	stable
	^{153}Sm	artificiel	46.28 h
	^{154}Sm	22.75%	stable
Europium (63)	^{150}Eu	artificiel	36.9 a
	^{150}Eu	47.8%	stable
	^{150}Eu	artificiel	15.537 a
	^{150}Eu	52.2%	stable
Gadolinium (64)	^{146}Gd	artificiel	48.3 j
	^{152}Gd	0.20%	1.08×10^{14} a
	^{154}Gd	2.18%	stable
Gadolinium (64) *(suite)*	**^{155}Gd**	14.80%	stable
	^{156}Gd	20.47%	stable
	^{157}Gd	15.65%	stable
	^{158}Gd	24.84%	stable
	^{160}Gd	21.86%	1.3×10^{21} a
Terbium (65)	^{157}Tb	artificiel	71 a
	^{157}Tb	artificiel	180 a
	^{157}Tb	100%	stable
Dysprosium (66)	^{154}Dy	artificiel	3 Ma
	^{156}Dy	0.06%	$> 10^{18}$ a
	^{158}Dy	0.10%	stable
	^{160}Dy	2.34%	stable
	^{161}Dy	18.91%	stable
	^{162}Dy	25.51%	stable
	^{163}Dy	24.90%	stable
	^{164}Dy	28.18%	stable
Holmium (67)	^{163}Ho	artificiel	4 570 a
	^{165}Ho	100%	stable
	^{166}Ho	artificiel	26.8 h
Erbium (68)	**^{162}Er**	0.14%	stable
	^{164}Er	1.61%	stable
	^{166}Er	33.60%	stable
	^{167}Er	22.95%	stable
	^{168}Er	26.80%	stable
	^{169}Er	artificiel	9.4 j
	^{170}Er	14.90%	stable
Thulium (69)	^{167}Tm	artificiel	9.25 j
	^{168}Tm	artificiel	93 j
	^{169}Tm	100.00%	stable
	^{170}Tm	artificiel	129 j
	^{171}Tm	artificiel	1.92 a
Ytterbium (70)	**^{168}Yb**	0.13%	stable
	^{169}Yb	artificiel	32 j
	^{170}Yb	3.05%	stable
	^{171}Yb	14.30%	stable
	^{172}Yb	21.90%	stable
	^{173}Yb	16.12%	stable
	^{174}Yb	31.80%	stable
	^{175}Yb	artificiel	4.2 j
	^{176}Yb	12.70%	stable
Lutétium (71)	^{173}Lu	artificiel	1.37 a
	^{174}Lu	artificiel	3.31 a
	^{175}Lu	97.41%	stable
	^{176}Lu	2.59%	3.78×10^{10} a

Tableau 1 - Les principaux isotopes des éléments des Terres Rares.

[12] ou presque stables, avec des demi-vies supérieures à 100 milliards d'années ($>10^{11}$ a)

[13] et même zéro isotope stable pour l'élément numéro 61, le prométhium

2.3. HISTORIQUE

La découverte progressive des Terres Rares débuta en 1787, quand un lieutenant et chimiste suédois, Carl Axel Arrhenius, découvrit un nouveau minéral noir et dense dans les pegmatites de la carrière d'Ytterby[14], une localité de Suède située à une vingtaine de kilomètres au nord-est de Stockholm. Il nomma d'abord ce minéral ytterbite et l'envoya au chimiste finlandais Johan Gadolin, qui découvrira en 1794 que ce minéral contenait une nouvelle « terre » (c'est-à-dire un nouvel oxyde non réductible alors, voir encadré p.40), qu'il appellera « ytterbia », dont le nom sera raccourci trois ans plus tard en "yttria". Le minéral ytterbite sera renommé plus tard gadolinite[15].

Un autre minéral rougeâtre et dense avait été découvert plus tôt, en 1751, par le minéralogiste Axel Fredrik Cronstedt dans la mine de cuivre de Bastnäs, près du village de Riddarhyttan, toujours en Suède (comté de Västmanland), 150 km à l'ouest de Stockholm. Mais ce n'est qu'en 1803 que les chimistes suédois Jöns Jakob Berzelius et Wilhelm Hisinger, en isolèrent une nouvelle « terre », proche de l'yttria déjà identifiée mais différente, qu'ils nommèrent « ceria », en référence à l'astéroïde Cérès découvert deux ans auparavant. Ce minéral est désormais connu sous le nom de bastnäsite[16].

En 1828, le chimiste allemand Friedrich Wohler parvint à préparer l'yttrium sous forme métallique par réduction du trichlorure d'yttrium avec du potassium. Mais il s'agissait encore d'yttrium impur, non séparé des lanthanides lourds qui l'accompagnent dans ses minéraux naturels.

En 1839, le chimiste suédois Carl Gustaf Mosander découvrit que l'oxyde de cérium connu alors était un mélange contenant aussi un oxyde d'un autre élément qu'il nomma lanthane (du grec « lanthano », être caché), puis en 1842 que ce lanthane contenait aussi un autre élément qu'il nomma didyme (d'un mot grec signifiant « jumeau », en raison de sa ressemblance avec le lanthane découvert juste avant). En 1843, il montra aussi que l'yttrium connu alors était aussi un mélange contenant deux autres éléments qu'il nomma terbium et erbium[17] (toujours dérivés du nom d'Ytterby).

C'est ensuite progressivement entre 1878 et 1907 que l'on découvrit que ces éléments identifiés jusqu'alors étaient encore des mélanges et que furent découverts tous les autres éléments des Terres Rares présents dans leurs minerais (donc hors le prométhium, qui en est absent). Les noms déjà attribués restèrent pour désigner l'élément le plus abondant du mélange, sauf pour le didyme, identifié en 1885 comme un mélange dont les principaux composants furent appelés praséodyme et néodyme.

Le lutétium fut le dernier élément stable des Terres Rares isolé, en 1907.

Le prométhium, quant à lui, fut découvert en 1945 dans les produits de fission de l'uranium par des scientifiques qui travaillaient sur le projet Manhattan.

---

[14] Cette carrière était exploitée pour le quartz et le feldspath pour la verrerie et les céramiques.

[15] La gadolinite est désormais identifiée comme un béryllo-silicate de Terres Rares et de fer ferreux, dont le pôle yttrifère d'Ytterby, la gadolinite-(Y), a pour formule idéale $Y_2Fe^{2+}Be_2Si_2O_{10}$. En pratique, Y est substitué partiellement, mais de manière minoritaire, par des lanthanides lourds, de rayons ioniques équivalents.

[16] La bastnäsite est un fluo-carbonate de Terres Rares, principalement de cérium et des lanthanides voisins (lanthane, praséodyme et néodyme), de formule générale $(Ce,La,Pr,Nd)CO_3F$. Les minéralogistes modernes distinguent la bastnäsite-(Ce) et la bastnäsite-(La) selon que le cérium ou le lanthane domine.

[17] En 1860, ces deux noms ont été interchangés.

Le tableau 2 récapitule la chronologie des découvertes des éléments des Terres Rares, et la figure 3 illustre l'arborescence historique de ces découvertes.

Ainsi l'on constate que les éléments des Terres Rares des numéros atomiques 57 à 63 (du lanthane à l'europium) ont été découvertes par séparation progressive à partir de la ceria, et seront donc appelés « terres cériques[18] » , et les éléments des Terres Rares des numéros atomiques 65 à 71 (du terbium au lutétium) ont été découvertes avec l'yttrium par séparations progressives à partir de l'yttria, et seront appelés « terres yttriques[18] ». L'élément numéro 64, le gadolinium, sera identifié à peu près simultanément dans les deux filières.

Toutefois, si le cérium, le lanthane et le didyme, séparé plus tard en praséodyme et néodyme, ont été identifiés dans la ceria de la bastnäsite de Bastnäs, le samarium, puis le gadolinium et l'europium qui en ont été séparés, ont été découverts en 1879 comme accompagnant le didyme en analysant les oxydes de Terres Rares issus d'un autre minéral découvert en 1839 par le minéralogiste allemand Heinrich Rose dans la chaîne d'Ilmensky, près de Miass, dans la région de Tchéliabinsk, dans le sud de l'Oural, en Russie. Ce minéral avait été nommé samarskite[19] en 1847 par Gustav Rose, le frère du découvreur Heinrich Rose, en l'honneur du colonel russe Vassily Evgrafovitch Samarsky-Bykhovets, qui dirigeait alors le corps des ingénieurs des mines de Russie. Le samarium sera ainsi nommé en 1879 d'après le nom du minéral, lui-même dérivé du nom de l'officier russe.

Ces affinités naturelles préférentielles, dans leurs minéraux, des lanthanides les plus légers (aux numéros atomiques les plus faibles, 57 à 63-64) entre eux avec le cérium (« terres cériques »), et des lanthanides les plus lourds (aux numéros atomiques les plus lourds, 64-65 à 71) entre eux et avec l'yttrium (« terres yttriques »), sont largement imputables à leurs rayons ioniques trivalents (cf.2.4 et 2.7).

[18] Les terres cériques correspondent peu ou prou à ce qui est souvent désigné désormais comme "Terres Rares Légères", et les terres yttriques peu ou prou à ce qui est souvent désigné désormais comme "Terres Rares Lourdes". Mais les listes précises des éléments couverts par ces vocables "légères" / "lourdes" varient d'un auteur à l'autre (cf. 2.6).

[19] La samarskite est désormais identifiée comme un niobo-tantalate complexe contenant des Terres Rares, de formule générale $(TR,Fe,U,Th,Ca)(Nb,Ta)O_4$.

Historique de la découverte et étymologie des noms des éléments des terres rares

Elément	Symbole	Année de découverte	Découvreur(s)	Etymologie	Remarque
Scandium	Sc	1876	L.F.Nilson	Scandinavie	
Yttrium	Y	1794	J.Gadolin	Ytterby (village de Suède)	
Lanthane	La	1839	C.G.Mosander	du grec lanthano (être caché)	
Cérium	Ce	1803	J.J.Berzelius & W.Hisinger	de l'astéroïde Cérès, découvert en 1801, lui-même nommé d'après la déesse latine de l'agriculture, Cérès.	
Praséodyme	Pr	1885	C.A.von Welsbach	du grec praseos (vert) didymos (jumeau), en raison de son oxyde vert	Pr et Nd d'abord identifiés comme un seul élément par Mosander en 1839 avec le lanthane et nommé "didyme".
Néodyme	Nd	1885	C.A.von Welsbach	du grec neos (nouveau) didymos (jumeau)	
Prométhium	Pm	1945	C.D.Coryell, J.A.Marinsky, L.E.Glendenin	de Prométhée, personnage de la mythologie grecque.	
Samarium	Sm	1879	F.Lecoq de Boisbaudran	du minéral samarskite, lui-même nommé en l'honneur du colonel et ingénieur des mines russe V.E.Samarsky-Bykhovets	
Europium	Eu	1901	E.A.Demarçay	Europe	
Gadolinium	Gd	1880	J.C.G. de Marignac	nommé en 1886 en l'honneur du chimiste finlandais J.Gadolin par F.Lecoq de Boisbaudran	Séparé par Marignac du didyme et par Lecoq du terbium
Terbium	Tb	1843	C.G.Mosander	Ytterby (village de Suède)	
Dysprosium	Dy	1886	F.Lecoq de Boisbaudran	du grec dysprositos (d'un abord difficile)	
Holmium	Ho	1879	P.T.Cleve	de Holmia, nom latin de Stockholm	
Erbium	Er	1843	C.G.Mosander	Ytterby (village de Suède)	
Thulium	Tm	1879	P.T.Cleve	Du grec Thule qui désignait les terres les plus nordiques connues alors (assimilées par la suite à la Scandinavie)	
Ytterbium	Yb	1878	J.C.G. de Marignac	Ytterby (village de Suède)	
Lutétium	Lu	1907	G.Urbain, C.A.von Welsbach, C.James	Lutèce	

Tableau 2 - Historique de la découverte et étymologie des noms des éléments des Terres Rares.

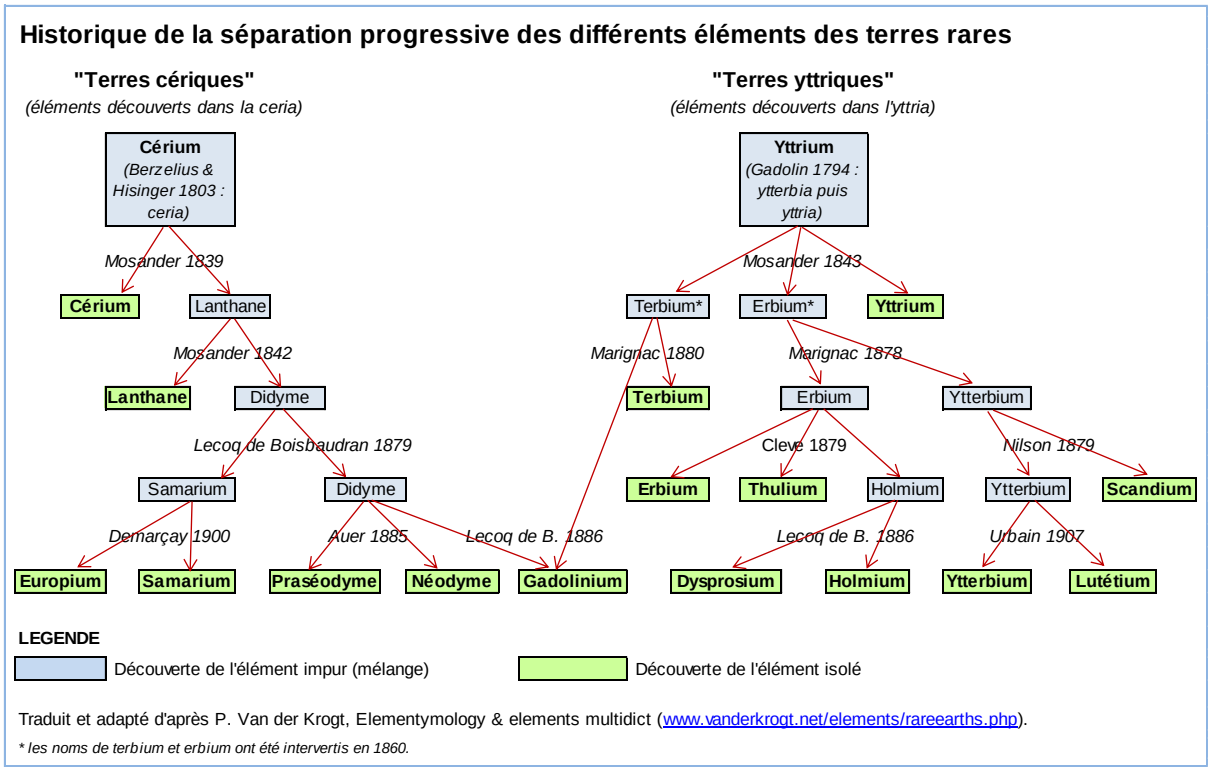


Figure 3 - Filiation des découvertes successives des éléments des Terres Rares.

Le prométhium est un cas distinct. En effet, il n'existe pas d'isotope stable de ce lanthanide, et la période de désintégration radioactive de son isotope le plus stable, l'isotope ^{145}Pm, est de 17,7 ans. Sur Terre, il n'en existe naturellement que d'infimes traces, issues essentiellement de la fission spontanée, extrêmement peu fréquente, de l'uranium 238. Il n'en existerait ainsi à tout instant que de l'ordre de 560 g sur Terre, de cette provenance. Le prométhium a été isolé pour la première fois en 1945 aux États Unis, dans les résidus du réacteur nucléaire d'Oak Ridge (Tennessee). De très faibles quantités continuent à être récupérées des produits de fission des réacteurs nucléaires, et il a quelques applications de micro-niche du fait de sa radioactivité. Mais il ne s'agit pas d'une ressource minière, et il ne sera donc généralement pas traité dans la suite de la présente étude.

Pourquoi "terres", pourquoi "rares" ?

À la fin du XVIIIème siècle, lorsqu'Antoine de Lavoisier publie son "Traité Élémentaire de Chimie" (1789), il avait identifié 35 éléments, ou constituants élémentaires de la matière, dont les 17 métaux connus et isolés à l'état métallique alors*, mais aussi 2 alcalis (la potasse et la soude) et 5 "terres", la chaux, la magnésie, la baryte, l'alumine et la silice, qu'il suppose pouvoir être aussi des oxydes métalliques, par similitude avec les substances terreuses obtenues par la combustion ou l'oxydation des métaux connus, mais qui n'avaient encore jamais pu être décomposées, du fait que ces "terres" ne sont pas réductibles par le charbon.

Ce n'est qu'après l'invention de la pile Volta puis de l'électrolyse en 1800, que le britannique Sir Humphry Davy commença à décomposer ces alcalis et ces terres et isola en 1807-1808 le sodium, le potassium, le magnésium, le calcium, et le baryum, mais aussi le strontium, d'une nouvelle "terre" obtenue en 1794 à partir de la strontianite découverte dans la mine de plomb de Strontian, en Ecosse. Les deux premiers métaux seront appelés métaux alcalins, et les 4 derniers métaux alcalino-terreux. Les "terres" élémentaires découvertes dans la gadolinite d'Ytterby puis dans la bastnäsite de Bastnäs, l'yttria (1794) et la ceria (1803), n'étaient pas, à l'époque de leur découverte, réductibles en métal, d'où leur nom de "terres".

L'yttrium fut finalement isolé sous forme métallique en 1828 par le chimiste allemand Friedrich Wöhler.

Le chimiste suédois Carl Gustaf Mosander découvrit en 1839 que l'oxyde de cérium (ceria) connu alors était en fait un mélange de plusieurs oxydes de métaux, le cérium étant le plus abondant d'entre eux, et en 1843 que l'oxyde d'yttrium (yttria) était aussi un mélange de plusieurs oxydes de métaux, séparés progressivement par la suite, l'yttrium étant de loin le plus abondant.

Nombre d'articles actuels sur la criticité des Terres Rares disent que ces éléments ne sont pas si rares que cela, laissant sous-entendre qu'ils usurperaient leur qualificatif. Pourtant, parmi les "terres" connues à la fin du XVIIIe siècle (chaux, magnésie, silice, alumine, baryte puis strontiane), l'yttria et la ceria étaient bien les plus rares (cf. 4.1.1). En effet, sur la base des abondances des éléments connues aujourd'hui, les abondances de ces oxydes dans la croûte terrestre est la suivante : silice : 60,3 % ; alumine : 15,6 % ; chaux : 5,8 % ; magnésie : 3,9 % ; baryte : 475 ppm (= 0,0475 %) ; strontiane : 438 ppm (0,0438 %) ; somme de tous les oxydes de Terres Rares (lanthanides + yttrium), c'est-à-dire somme de ce qui était connu en 1800 comme yttria + ceria : 260 ppm (0,026 %). Les Terres Rares étaient donc bien les plus rares de toutes les "terres" connues vers 1800, et méritaient donc alors largement leur nom.

Et même si 0,026 % de la croûte terrestre représente un tonnage global conséquent et que les éléments des Terres Rares ne manquent pas, il n'en demeure pas moins que ce ne sont pas des éléments très abondants. Et surtout leurs gisements, c'est-à-dire leurs concentrations naturelles à des niveaux économiquement exploitables, sont extrêmement localisés (cf. 4.1 et 4.2), liés à des contextes géologiques très particuliers.

** Les 17 métaux connus et cités par Lavoisier sont : manganèse, fer, cobalt, nickel, cuivre, zinc, arsenic, molybdène, argent, étain, antimoine, tungstène, platine, or, mercure, plomb et bismuth (Lavoisier, 1794).*

2.4. PROPRIÉTES PHYSIQUES

À l'état pur, les lanthanides et l'yttrium, ainsi que le scandium, sont des solides métalliques, la plupart gris-acier (, sauf l'europium et l'ytterbium dont la couleur a une tendance jaune pâle.

Les principales caractéristiques physiques de ces éléments, ainsi que leurs configurations électroniques, sont récapitulées dans le tableau 3.

À l'état métallique, non oxydé, qui n'existe pas dans la nature, ils sont de densité croissante avec le numéro atomique, à l'exception de l'europium et de l'ytterbium (cf. tab.3, 4ème colonne). Les densités des lanthanides sous forme métallique sont comprises entre 5,24 (europium) et 9,84 (lutétium). Pour un ordre d'idée, les lanthanides sont tous plus denses que le titane (4,54), par exemple, mais moins denses que l'argent ou le plomb (10,5 et 11,35 respectivement). La densité moyenne des lanthanides est proche de celle du fer (7,87). L'yttrium est nettement moins dense, avec une densité de 4,47, très voisine de celle du titane.

Sous forme métallique, neutre, les rayons atomiques sont assez proches pour tous les lanthanides, sauf pour l'europium et l'ytterbium qui ont un rayon atomique beaucoup plus grand, ce qui explique leur plus faible densité.

Ces métaux ont des duretés variables, certains étant assez tendres (lanthane, néodyme, ytterbium), d'autres étant plutôt durs (holmium, erbium, lutétium) (cf. tab.3, 15ème colonne).

Les lanthanides sont moyennement fusibles : leur température de fusion s'échelonne de 799 °C (cérium) à 1 663 °C (lutétium). Comme les densités, elles ont tendance à être croissantes avec le numéro atomique, à l'exception de l'europium et de l'ytterbium.

Les températures d'ébullition sont assez élevées (1 596 °C à 3 520 °C, à l'exception de l'ytterbium qui bout à 1 196 °C), ce qui rend difficilement utilisable une séparation par distillation fractionnée.

Les lanthanides, à l'exception de l'ytterbium, sont de médiocres conducteurs de l'électricité.

Les éléments des Terres Rares ont surtout des propriétés spectrales remarquables, tant en absorption (coloration) qu'en émission (luminescence), en grande partie liées aux électrons de la sous-couche interne 4f. Ce sont ces propriétés qui sont utilisées dans les applications de luminophores (écrans d'affichage, ampoules fluorescentes) et de lasers. Le degré de mobilité des électrons dans les niveaux d'énergies des atomes est à la base de cette propriété. Ainsi, lorsqu'un lanthanide entouré de ligands (oxyde ou molécule) est excité par des rayons puissants (ultra-violets par exemple), il peut y avoir transfert de l'excitation du ligand vers un état excité de l'ion lanthanide qui se désexcite en émettant de la lumière, avec des pics d'émission de longueurs d'onde dans le domaine du visible, très fins et spécifiques en fonction de l'élément. Les plus utilisés sont les ions de l'yttrium, de l'europium (rouge et bleu), du terbium et du thulium (vert), ainsi que du cérium (jaune).

Plusieurs éléments des Terres Rares ont des propriétés magnétiques remarquables, à l'origine d'une de leurs applications majeures, les aimants permanents de haute performance.

Leurs courbes d'aimantation montrent souvent de fortes hystérésis. Cette propriété est combinée à la propriété d'interaction avec des éléments de transition (principalement le fer et le cobalt) pour produire les aimants : Samarium-Cobalt $SmCo_5$ et Sm_2Co_{17}, et surtout Néodyme-Fer-Bore, $Nd_2Fe_{14}B$, les plus coercitifs connus à ce jour produits à l'échelle industrielle. Ces aimants présentent une température de Curie (température à laquelle le matériau perd son aimantation spontanée) élevée grâce au métal de transition, et une rémanence ainsi qu'un champ coercitif important[20], grâce au lanthanide (cf. 3.1).

[20] La rémanence mesure le magnétisme résiduel créé par l'alignement des atomes (création d'un dipôle magnétique), c'est-à-dire en d'autres termes, la force de l'aimant. Le champ coercitif est l'intensité du champ magnétique qu'il est nécessaire d'appliquer pour annuler l'aimantation.

Propriétés et dimensions atomiques et ioniques des terres rares (et de quelques éléments qui s'y substituent dans leurs minéraux)

Elé-ment	N° ato-mique	Masse atomique	Densité (métal à 25°C)	Configuration électronique simplifiée	Configuration électronique développée des éléments non ionisés (degré d'oxydation 0)	Degrés d'oxydation communs	Rayon ato-mique	Rayon de co-valence	Rayon du cation nonacoordonné			Point de fusion	Point d'ébul-lition	Dureté Brinell	Dureté Vickers
									dication	trication	quadricat.				
Sources :							Wikipedia	Cordero et al., 2008	Stosch, 2000	Stosch, 2000 Wall, 2015	Stosch, 2000	CRC Handbook of Chemistry and Physics, 2012		Wikipedia	
Sc	21	44.9559	2.989	[Ar] $3d^1 4s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^1$	+III	160 pm	170 pm		87.0 pm		1 541 °C	2 836 °C	750 MPa	*nd*
Y	39	88.9059	4.469	[Kr] $4d^1 5s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^1$	+III	180 pm	190 pm		107.5 pm		1 522 °C	3 345 °C	589 MPa	*nd*
La	57	138.9055	6.145	[Xe] $5d^1 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 5d^1$	+III	195 pm	207 pm		121.6 pm		920 °C	3 464 °C	363 MPa	491 MPa
Ce	58	140.1161	6.773	[Xe] $4f^1 5d^1 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^1 5d^1$	+III, +IV	185 pm	204 pm		119.6 pm	97.0 pm*	799 °C	3 443 °C	412 MPa	270 MPa
Pr	59	140.9077	6.773	[Xe] $4f^3 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^3$	+III, +IV	185 pm	203 pm		117.9 pm		931 °C	3 520 °C	481 MPa	400 MPa
Nd	60	144.2423	7.007	[Xe] $4f^4 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^4$	+II, +III (+IV)	185 pm	201 pm		116.3 pm		1 016 °C	3 074 °C	265 MPa	343 MPa
Pm	61	145	7.220	[Xe] $4f^5 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^5$	+III	185 pm	199 pm		nd		1 042 °C	3 000 °C	*nd*	*nd*
Sm	62	150.3620	7.520	[Xe] $4f^6 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^6$	+II, +III	185 pm	198 pm		113.2 pm		1 072 °C	1 794 °C	441 MPa	412 MPa
Eu	63	151.9641	5.243	[Xe] $4f^7 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^7$	+II, +III	185 pm	198 pm	130.0 pm	112.0 pm		822 °C	1 596 °C	*nd*	167 MPa
Gd	64	157.2530	7.900	[Xe] $4f^7 5d^1 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^7 5d^1$	+III	188 pm	196 pm		110.7 pm		1 313 °C	3 273 °C	*nd*	570 MPa
Tb	65	158.9254	8.229	[Xe] $4f^9 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^9$	+III, +IV	175 pm	194 pm		109.5 pm		1 356 °C	3 230 °C	677 MPa	863 MPa
Dy	66	162.5001	8.550	[Xe] $4f^{10} 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{10}$	+III (+IV)	175 pm	192 pm		108.3 pm		1 412 °C	2 567 °C	500 MPa	540 MPa
Ho	67	164.9303	8.795	[Xe] $4f^{11} 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{11}$	+III	175 pm	192 pm		107.2 pm		1 472 °C	2 700 °C	746 MPa	481 MPa
Er	68	167.2593	9.066	[Xe] $4f^{12} 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{12}$	+III	175 pm	189 pm		106.2 pm		1 529 °C	2 868 °C	814 MPa	589 MPa
Tm	69	168.9342	9.321	[Xe] $4f^{13} 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{13}$	+II, +III	175 pm	190 pm		105.2 pm		1 545 °C	1 950 °C	471 MPa	520 MPa
Yb	70	173.0430	6.965	[Xe] $4f^{14} 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{14}$	+II, +III	175 pm	187 pm		104.2 pm		824 °C	1 196 °C	343 MPa	206 MPa
Lu	71	174.9671	9.840	[Xe] $4f^{14} 5d^1 6s^2$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^{10} 5p^6 6s^2 4f^{14} 5d^1$	+III	175 pm	187 pm		103.2 pm		1 663 °C	3 402 °C	893 MPa	1160 MPa
Ca	20	40.0780	1.540	[Ar] $4s^2$		+II	180 pm	176 pm	118.0 pm			842 °C	1 484 °C		
Th	90	232.0381	11.724	[Rn] $6d^2 7s^2$		+IV	179 pm	206 pm			109.0 pm	1 750 °C	4 820 °C		
U	92	238.0289	19.100	[Rn] $5f^3 6d^1 7s^2$		+III, +IV, +V, +VI	175 pm	196 pm			105.0 pm	1 135 °C	4 131 °C		

1 pm (picomètre) = 10^{-12} m = 0.01 Å

** quadrication octocoordonné*

Tableau 3 - Quelques caractéristiques physico-chimiques des Terres Rares.

2.5. PROPRIÉTÉS CHIMIQUES

Quelques-unes des caractéristiques atomiques et chimiques des éléments des Terres Rares sont présentées dans le tableau 3.

Les éléments des Terres Rares sont des métaux réducteurs**.** Leur structure électronique permet préférentiellement la formation d'ions trivalents (notés de façon générique Ln^{3+}) de configuration électronique [Xe] $4f^n$, n allant de 0 à 14. Certains lanthanides s'oxydent aussi au degré +II (Eu, Sm, etc.) ou +IV (Ce, Pr, Tb).

Sous forme métallique massive, les Terres Rares s'oxydent plus ou moins rapidement à l'air à température ambiante. Un échantillon d'europium exposé à l'air ambiant s'oxyde complètement en quelques jours et tombe en poudre d'oxyde. Le lanthane, le cérium, le praséodyme et le néodyme se ternissent en quelques jours et finissent par tomber en poudre d'oxyde au bout de quelques semaines à quelques mois. Le samarium ternit en quelques semaines à quelques mois. Les autres éléments, et en particulier les Terres Rares lourdes (cf. 2.6) résistent mieux et peuvent garder leur éclat métallique plusieurs années (Fig.4).

Figure 4 - Quelques métaux des Terres Rares relativement stables à l'air (photo J.F. Labbé).

Sous forme finement divisée, ces métaux s'oxydent rapidement et même brûlent à l'air, c'est cette propriété qui est utilisée avec le ferrocérium dans les pierres à briquet classiques : la molette arrache quelques particules de ferrocérium qui brûlent en étincelles à l'air (cf.3.1.10)

Dans la nature et dans leurs minéraux primaires, les Terres Rares sont sous forme de cation trivalent (« trication »). Les rayons des trications des lanthanides décroissent progressivement au fur et à mesure que le numéro atomique s'accroit, passant, dans la position nonacoordonnée qu'ils ont dans les phosphates tels que la monazite ou le xénotime, de 121,6 pm[21] pour le lanthane à 103,2 pm pour le lutétium (Wall, 2014)[22], phénomène

[21] pm = picomètre = 10^{-12} m

connu sous le nom de « **contraction des lanthanides** ». L'yttrium, quant à lui, a un rayon ionique trivalent de 104 pm, similaire à celui de l'holmium. En revanche, le scandium a un rayon ionique bien inférieur (87 pm).

Nonobstant cette contraction, les propriétés chimiques des éléments des Terres Rares demeurent remarquablement homogènes, en particulier en solution, où le rayon ionique influe peu.

Les différentes Terres Rares[23] se substituent plus ou moins l'une à l'autre dans leurs minéraux. Toutefois, les structures cristallines de certains minéraux sont plus adaptées et plus favorables à des rayons ioniques de l'ordre de 113 - 122 pm et seront plutôt à cérium, lanthane, néodyme et praséodyme dominants (les "terres cériques"), un peu de samarium, d'europium et de gadolinium, et pratiquement pas des Terres Rares plus lourdes. C'est le cas de la monazite, $(Ce,La,Nd,Pr)PO_4$, un phosphate de Terres Rares à cristallisation monoclinique, ou de la bastnaesite, $(Ce,La)CO_3F$. Les structures cristallines d'autres minéraux sont plus adaptées à des rayons ioniques de l'ordre de 103 - 110 pm, à yttrium dominant, partiellement substitué par les lanthanides les plus lourds de rayon ironique proche (terbium, dysprosium et au-delà, "terres yttriques"). C'est le cas du xénotime, YPO_4, un phosphate de Terres Rares à cristallisation quadratique, ou bien de la gadolinite, $Y_2FeBe_2Si_2O_{10}$. Il est à noter que les minéraux à Terres Rares lourdes sont bien moins abondants que ceux à Terres Rares légères, du fait même de la proportion naturelle bien moindre des éléments des Terres Rares lourdes dans la croûte terrestre (cf. 4.1.1 et tab.11).

Le tableau 3 présente aussi, pour comparaison, les rayons ioniques du cation Ca^{2+}, proche des cations Ce^{3+} et Pr^{3+}, et du cation Th^{4+}, proche des cations Eu^{3+} et Gd^{3+}, ce qui explique leur substitution partielle fréquente dans les minéraux de Terres Rares[24]. À l'inverse, ces proximités expliquent pourquoi les apatites naturelles $Ca_5(PO_4)_3F$ contiennent souvent des Terres Rares en impuretés à des teneurs significatives, par substitution partielle du calcium.

Dans des conditions oxydantes, et en particulier dans les zones d'altération supergène de certains gisements, le cérium peut s'oxyder sous forme tétravalente et se comporter différemment des autres Terres Rares (argiles ioniques du sud de la Chine, relativement appauvries en cérium).

Dans leurs minéraux primaires, les Terres Rares sont sous forme trivalente, leurs oxydes sont tous sous forme Ln_2O_3. En revanche, dans la chimie séparative des Terres Rares, les oxydes obtenus industriellement sont sous des degrés d'oxydation plus variés : la plupart sont toujours sous forme trivalente, à l'exception du cérium, du praséodyme et du terbium. L'oxyde de cérium industriel est CeO_2 (tétravalent), l'oxyde de praséodyme industriel est Pr_6O_{11} (mixte trivalent-tétravalent : 4 PrO_2. Pr_2O_3), et l'oxyde de terbium industriel est Tb_4O_7 (mixte trivalent-tétravalent : 2 TbO_2. Tb_2O_3). Ainsi nombre de sociétés minières qui déclarent des réserves et ressources, qui les publient généralement en oxydes, les publient en La_2O_3, CeO_2, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3, Sm_2O_3, Eu_2O_3, Gd_2O_3, Tb_4O_7, Dy_2O_3, Ho_2O_3, Er_2O_3, Tm_2O_3, Yb_2O_3, Lu_2O_3, Y_2O_3., de façon à être cohérent avec les produits de sortie de traitement. Cet usage

---

[22] Les valeurs des rayons ioniques diffèrent légèrement selon les auteurs. Le tableau 3 présente les valeurs de Wall, 2014, mais aussi celles du site www.webelements.com qui distingue les rayons des trications hexacoordonnés des trications octocoordonnés, la valeur de Wall étant intermédiaire. Mais quelles que soient les séries de données, ces rayons sont toujours décroissants avec l'augmentation du numéro atomique.

[23] Le scandium, dont le rayon atomique est trop différent, ne se substitue que très peu aux autres Terres Rares dans leurs minéraux.

[24] Ces substitutions sont, pour garder les équilibres de charge, soit associées entre elles, soit combinées, comme dans les phosphates, avec des substitutions partielles concomitantes du phosphore par du silicium ou des chalcogènes.

est cependant discutable puisque, dans les ressources minérales en terre, ces éléments sont presque toujours sous forme trivalente (Ce, Pr et Tb sont sous forme Ce_2O_3, Pr_2O_3 et Tb_2O_3)[25] (cf. tab.12 section 4.1.2). Certaines sociétés minières publient cependant bien leurs ressources en Ce_2O_3, Pr_2O_3 et Tb_2O_3.[26]

2.6. PROPRIETES BIOLOGIQUES ET TOXICITE

Les éléments des Terres Rares n'ont pas de rôles biologiques connus.

L'éco- et la bio-toxicité des Terres Rares sont peu documentées, ces éléments ayant rarement des concentrations susceptibles de provoquer des problèmes de toxicité. De plus, ils sont peu solubles et peu mobiles.

Le médecin du travail québécois E. Bastarache publie sur son site http://smart2000.pagesperso-orange.fr/lanthanides_toxicologie.htm [27] quelques effets cliniques observés des lanthanides, résumés succinctement ci-après :

Les métaux des Terres Rares ne sont pas absorbés par la peau, sont peu absorbés par l'appareil digestif, et sont lentement absorbés par les poumons ou par injection. Ils tendent alors à se concentrer dans le foie et le squelette (substitution au calcium), duquel ils peuvent mettre des années avant d'être éliminés.

L'inhalation de poussières et fumées contenant des composés de Terres Rares en assez grande quantité peut provoquer des bronchites et pneumonies chimiques aiguës d'irritation. Quelques cas de pneumoconiose professionnelle ont été rapportés chez les photograveurs et les projectionnistes, suite à l'inhalation chronique de fumées d'oxydes de Terres Rares provenant de lampes à arc au carbone. Les fumées au lanthane peuvent provoquer maux de tête et nausées.

Le chlorure de terbium est un irritant de la peau intacte. Les chlorures de gadolinium et de samarium ont produit des ulcères sur des peaux déjà lésées.

Dans les yeux, les chlorures de Terres Rares causent des irritations oculaires sous forme de conjonctivite passagère. Le chlorure de terbium produit des dommages cornéens.

L'Institut National de Recherche et de Sécurité français (INRS, www.inrs.fr) ne publie, pour la France, de Valeur limite d'Exposition Professionnelle que pour l'yttrium, fixée à 1mg/m^3 d'air (INERIS, 2011, citant INRS, 2008).

Les problèmes environnementaux liés aux Terres Rares sont surtout liés à leurs procédés d'extraction. Ainsi l'exploitation des Terres Rares lourdes dans le sud de la Chine, utilisant *pro parte* des lixiviations *in situ* mal contrôlées, a entrainé localement des niveaux de pollutions critiques[28]. L'exploitation des Terres Rares légères (gisements à monazite ou bastnaesite), dont les gisements contiennent souvent du thorium (quelques centaines de

---

[25] Sauf dans le minéral cérianite, $(Ce,Th)O_2$, où le cérium est sous forme tétravalente.

[26] Certaines sociétés les publient en "oxydes de Terres Rares" sans préciser avec quelle stœchiométrie. Certaines publications utilisent même alternativement la stœchiométrie trivalente (minéralogique) et la stœchiométrie commerciale, sans qu'il soit précisé s'il y a bien conversion des chiffres (tonnages, teneurs) de l'une à l'autre.

[27] Accédé le 23/02/2015.

[28] Ainsi, pour obtenir les matériaux nécessaires à la production d'énergies "propres" en Occident (néodyme et dysprosium utilisés pour les éoliennes, par exemple, cf. 3.1.1.), il est généré des pollutions très significatives en Chine..

ppm) et des traces d'uranium, peut conduire à des pollutions radioactives au thorium et à l'uranium, notamment au niveau des sites de production de concentrés et de métallurgie séparative.

2.7. CLASSIFICATION DES TERRES RARES : TERRES RARES LEGERES ET TERRES RARES LOURDES. DIVERGENCES ET INCOHÉRENCES.

Les lanthanides ont des masses atomiques qui croissent progressivement avec leurs numéros atomiques, passant d'une masse atomique de 138,91 pour le lanthane (numéro atomique 57) à 174,97 pour le lutétium (numéro atomique 71) (cf. tab.3, 3ème colonne). Les Terres Rares sont, au sens propre, de plus en plus lourdes au fur et à mesure que les numéros atomiques augmentent. Ainsi on pourra parler, logiquement, de lanthanides légers (on parlera souvent de « Terres Rares légères ») pour les éléments dont les numéros atomiques sont les plus faibles, et de lanthanides lourds (« Terres Rares lourdes » *pro parte*) pour les éléments dont les numéros atomiques sont les plus élevés.

Nombre d'auteurs ont tenu à mettre une coupure, une limite fixe, entre Terres Rares légères et Terres Rares lourdes. Mais il n'y a pas de consensus sur cette limite. Le tableau 4 présente un certain nombre de subdivisions utilisées par les uns et les autres. Tous les auteurs s'accordent à classer La, Ce, Pr et Nd dans les Terres Rares légères et Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb et Lu dans les Terres Rares lourdes. Mais les éléments intermédiaires, Sm, Eu et Gd sont considérés par certains comme légers, par d'autres comme lourds, et par d'autres enfin comme intermédiaires. Par ailleurs, l'yttrium, bien que plus léger en masse, est souvent classé dans les Terres Rares lourdes, pour des raisons gîtologiques, parce qu'il est associé aux lanthanides les plus lourds dans ses minéraux et ses gisements, en raison de son rayon ionique (cf. tab.3 et 2.5). D'autres auteurs préfèrent le compter à part.

La publication en ligne "Rare Earth Handbook" (http://reehandbook.com), sans nom d'auteur accessible, veut justifier une césure léger/lourd entre le gadolinium et le terbium d'après des paramètres de configuration électronique, et en particulier des couplages des spins, considérant les Terres Rares légères comme les éléments n° 57 à 64 (du lanthane au gadolinium), caractérisés par l'addition progressive d'un électron à spin horaire sur la sous-couche 4f (0 pour le lanthane, 7 pour le gadolinium) et des électrons non-appariés. Les Terres Rares lourdes, selon ce même critère, se caractériseraient alors par l'ajout progressif dans la sous-couche 4f d'un électron à spin antihoraire, et des électrons pouvant être appariés. Elles comprendraient alors les éléments n° 65 à 71 (terbium à lutétium). Cette argumentation est très contestable, pour les raisons suivantes :

- cette même publication associe l'yttrium aux Terres Rares lourdes, ce qui est incohérent avec le fait que cet élément a une configuration électronique transposée de celle du lanthane. Si l'on considère que seul le critère électronique est déterminant, lanthane et yttrium devraient se trouver dans la même catégorie ;
- le seul électron non-apparié du lanthane est un électron $5d^1$, exactement comme le seul électron non-apparié du lutétium. Sur ce critère électronique, lanthane et lutétium devraient se trouver dans la même catégorie ;
- « léger » et « lourd » sont des adjectifs qualificatifs relatifs à la masse, et non pas à la configuration électronique. Si l'on souhaite faire aussi des classifications sur d'autres critères que la masse, il est préférable d'utiliser d'autres adjectifs[29] ;

[29] Par exemple, dans une population humaine, il y a des hommes plus ou moins grands et des hommes plus ou moins petits. Mais il n'est pas obligatoire de donner une taille limite fixe, absolue, généralisée et indiscutable entre "grand" et "petit". Et lorsque l'on aura besoin de classer une population selon un autre paramètre que la taille des individus, par exemple sur leur genre, ou leur âge, on utilisera d'autres adjectifs que "grand" et "petit".

- pourquoi une définition d'une césure absolue, fixe et indiscutable entre des Terres Rares lourdes et des Terres Rares légères devrait-elle s'imposer[26] ? Les sociétés productrices non-chinoises Molycorp et Lynas n'éprouvent apparemment plus ce besoin (cf. tab.4).

L'une des raisons d'un classement des Terres Rares en « légères » et « lourdes » est purement économique, voire « marketing ». En effet, elle est largement utilisée par les sociétés minières dans leur communication, notamment dans leur présentation de ressources et réserves des sociétés minières destinée à valoriser leur projet et attirer des investisseurs ou lever des fonds en bourse. La majorité des gisements de Terres Rares sont surtout concentrés en Terres Rares les plus légères (La à Sm), seule une minorité ont des concentrations significatives en Terres Rares les plus lourdes. Certaines de ces Terres Rares lourdes, comme Tb et Dy, sont particulièrement critiques (cf. 3.2.8 et 3.2.9) et ont des prix élevés (cf. 5.2). Une plus forte concentration en ces derniers éléments donne de la valeur au gisement. Les sociétés d'exploration minière, et en particulier les sociétés juniors qui recherchent des financements, utilisent, comme indicateur d'intérêt, le rapport Terres Rares Lourdes (HREE ou TREO[30]) sur Terres Rares Totales (TREE ou TREO[31]) des ressources de leur gisement.

Il serait donc nécessaire, pour pouvoir comparer les gisements entre eux, que ce ratio HREO/TREO ait la même définition pour tous. Le tableau 4 montre que ce n'est pas le cas.

Par ailleurs, certaines sociétés intègrent l'yttrium dans les HREE, d'autres le mettent à part. La présence de l'yttrium, la plus abondante des Terres Rares "lourdes", gonfle largement le ratio, alors que le prix de l'yttrium est relativement modeste (cf. 5.2). L'intégration de l'yttrium biaise donc l'utilisation du ratio HREO/TREO comme indicateur de la valeur financière du minerai.

On notera que la confusion est telle qu'un même organisme ou une même société peut utiliser plusieurs définitions contradictoires. On constate ainsi sur le tableau 4 que :

- pour l'USGS, le gadolinium était lourd en 2002 et léger en 2014 ;
- pour le projet européen EURARE (www.eurare.eu), l'europium était classé léger sur son poster présenté au congrès ERES2014 (European Rare Earth Resources, Milos, 4-7 septembre 2014) mais lourd sur son site Internet www.eurare.eu/RareEarthElements.html consulté en mars 2015 ;
- pour la société Greenland Minerals and Energy Ltd (qui développe actuellement le gisement majeur de Kvanefjeld, cf. 4.2.2), le gadolinium était lourd dans son Rapport Annuel 2013 et léger sur son site Internet consulté en novembre 2014. Et l'yttrium, qui est intégré dans les Terres Rares lourdes en page 1 de son Rapport Annuel 2013, est compté à part des Terres Rares Lourdes en page 16 de ce même rapport.

Dans la suite du présent panorama, nous choisirons donc de préférence de parler des éléments des Terres Rares individuellement. Et lorsqu'une classification sera inévitable, les éléments 57 à 60 (du lanthane au néodyme) seront, en consensus avec tous les auteurs, considérés comme des Terres Rares légères, les éléments 65 à 71 (du terbium au lutétium) seront, en consensus avec tous les auteurs, considérés comme des Terres Rares lourdes. Les éléments 62 à 64 (du samarium au gadolinium) sont *de facto* intermédiaires, puisque considérées par certains comme des Terres Rares lourdes, par d'autres comme des Terres Rares légères, et sont assumées par d'autres comme « intermédiaires » ou « médianes ».

---

[30] HREE : Heavy Rare Earth Elements ; HREO : Heavy Rare Earth Oxides

[31] TREE : Total Rare Earth Elements ; TREO : Total Rare Earth Oxides

Nous rejoindrons donc à ce sujet l'opinion des experts Jack Lifton et Dudley Kingsnorth (tab.4). Mais en pratique, leur positionnement pourra dépendre des sources, et il devra donc être précisé à chaque fois.

L'yttrium est associé géologiquement et minéralogiquement aux Terres Rares lourdes. Mais, puisqu'il n'est pas « lourd » (au sens propre, et mis à part le scandium, c'est l'élément des Terres Rares le plus léger en masse atomique ainsi qu'en densité), le terme « lourd » est sémantiquement impropre. Il serait préférable d'utiliser, pour parler collectivement de l'yttrium et des lanthanides les plus lourds, le terme historique de « terres yttriques », à connotation minéralogique et historique (cf. 2.3), pour des raisons de rayon ionique (cf. 2.5), mais sans connotation de masse. Il conviendra donc de préciser, chaque fois que nécessaire, si le terme collectif utilisé inclut ou non l'yttrium.

Tableau comparatif de la subdivision Terres Rares légères -Terres Rares lourdes selon divers auteurs

		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	
Numéro atomique		57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	39	
Masse atomique		138.9	140.1	140.9	144.2	145.0	150.4	152.0	157.3	158.9	162.5	164.9	167.3	168.9	173.0	175.0	88.9	
Abondance crustale (CRC Handbook 2012)		39.0	66.5	9.2	41.5		7.1	2.0	6.2	1.2	5.2	1.3	3.5	0.5	3.2	0.8	33.0	
Auteur / Organisme ou Société	Date																	Commentaires
Jack Lifton / TMR	27/11/2012	Légères					Médianes			Lourdes								Commentaire de J.Lifton : "Définitions en relation avec le traitement des concentrés, utilisée par les métallurgistes et les ingénieurs procédés. Pas toujours utilisée ailleurs dans l'industrie. Sm souvent regroupé avec les légères, Eu et Gd avec les lourdes. Bien préciser quelle convention est utilisée."
Dudley Kingsnorth / IMCOA	03/2010	Légères ou cériques					Médianes			Lourdes ou yttriques								
Jacques Lucas, Univ.de Rennes	05/2014	Légères					Lourdes											
Société Chimique de France	2011	Cériques					Yttriques											
Rhodia / Solvay	2012 - 2014	Légères					Lourdes											Présentation La Rochelle 12 octobre 2012 ; FEA 15 mai 2014.
Roskill	11/2011	Légères						Lourdes										
Oakdene-Hollins	03/2010	Légères						Lourdes										
Critical materials for the EU	2014	Légères						Lourdes										
SGU (Service Géol. de Suède)	04/07/2014	Légères						Lourdes										
Oeko-Institut e.v.	01/2011	Légères							Lourdes									
EURARE	09/2014	Légères							Lourdes									
BGS	06/2010	Légères							Lourdes									
F.Walls in Critical Metals Handbook (	02/2014	Légères							Lourdes									
USGS	2002	Légères							Lourdes									
USGS	2014	Légères								Lourdes								
http://reehandbook.com	22/11/2014	Légères								Lourdes								Prétend être le seul à avoir raison parce qu'il considère qu'on n'est autorisé à utiliser les mots "léger" et "lourd" que sur une base de spins électroniques - base elle-même fort discutable.
Molycorp, A Lanthanid Lanthology	1993	Légères								Lourdes								
Molycorp	2014	Ne se préoccupe plus de faire une coupure léger-lourd. Traite les éléments individuellement																
Lynas	2014	Ne se préoccupe plus de faire une coupure léger-lourd. Traite les éléments individuellement																
Greenland Minerals and Energy Ltd	21/11/2014	Légères							Lourdes									www.ggg.gl dans l'onglet Rare Earth Elements
Greenland Minerals and Energy Ltd	2013	Légères						Lourdes										Dans Rapport Annuel 2013, p.1 (répartition des Ressources Kvanefjeld).
Greenland Minerals and Energy Ltd	2013	Légères						Lourdes									Y	Dans Rapport Annuel 2013, p.16 (Déclaration Ressources Kvanefjeld par SRK).
Great Western Minerals Group	20/06/2014	Légères						Lourdes									Y	Dans rapport NI43-11 Steenkampskraal de juin 2014.
Texas Rare Earth Resources	22/11/2014	Légères						Lourdes									Y	Parle des HREE dans son NI43101 et de YHREE pour les Terres rares lourdes + Y dans une publication.
Tasman Metals Ltd	04/07/2014	Légères						Lourdes										
Avalon Rare Metals Inc	22/11/2014	Légères						Lourdes										
Frontier Rare Earth	2012	Légères						Lourdes										Dans PEA 2012
Alkane Resources Ltd	22/11/2014	Légères						Lourdes										(Dubbo Zirconia)
Namibia Rare Earths Inc.	22/11/2014	Légères						Lourdes										
Mkango Resources		Légères						Lourdes										
Peak Resources Ltd	10/2014	Légères					Lourdes											
Arafura Resources Ltd	22/11/2014	La	Ce	Pr-Nd			SEG			Lourdes								Division faite sur les produits qui seront commercialisés (oxydes de La, de Ce, de Pr-Nd, de Sm-Eu-Gd, et un mixte des autres TR.
Rare Elements Resources	22/11/2014			Critiques				Crit.		Critiques							Crit.	Classe en terres rares critiques (CREO) et autres terres rares.

Tableau 4 - Classification des Terres Rares en lourdes et légères selon les auteurs.

3. La demande : usages et consommation

Les différents éléments des Terres Rares ont des secteurs d'utilisations variés, avec un large éventail de tonnages et de tailles des marchés selon les éléments, comme récapitulé dans le tableau ci-dessous (tableau 5).

Il n'y a pas un marché des Terres Rares, mais une grande diversité de marchés, correspondant à des applications variées, qui peuvent évoluer assez rapidement en fonction de la naissance puis de l'éventuel déclin de filières technologiques.

Elément	Tonnage consommé en 2012 (t d'oxyde) (+/-15%)	Part relative de la consom-mation	*Proportion moyenne dans 51 gisements**	Principaux secteurs d'usages au niveau mondial **
Lanthane	31 495 t	27.8%	*24.9%*	Catalyse du craquage des pétroles lourds (44%), batteries NiMH (26%), alliages métallurgiques, optique, luminophores, mischmétal
Cérium	45 525 t	40.2%	*43.2%*	Polissage du verre (36%), alliages métallurgiques (19%), catalyse automobile (13%), optique, luminophores, mischmétal
Praséodyme	4 945 t	4.4%	*4.6%*	Aimants permanents (73%), luminophores (12%), céramiques (7%), mischmétal, alliages métallurgiques, catalyseurs d'oxydation
Néodyme	19 925 t	17.6%	*16.2%*	Aimants permanents (89%), céramiques (5%), alliages métallurgiques (2%), mischmétal, luminophores, lasers
Samarium	515 t	0.5%	*2.2%*	Aimants permanents (97%), optique, médecine, nucléaire
Europium	425 t	0.4%	*0.3%*	Luminophores (96%), optique, nucléaire
Gadolinium	1 020 t	0.9%	*1.4%*	Aimants permanents (35%), alliages métallurgiques (28%), luminophores (23%), imagerie médicale IRM, lasers
Terbium	290 t	0.3%	*0.2%*	Luminophores (71%), aimants permanents (24%), alliages métallurgiques, dopage de composants électroniques
Dysprosium	845 t	0.7%	*0.9%*	Aimants permanents (98%), alliages métallurgiques, optique, nucléaire
Erbium	540 t	0.5%	*0.2%*	Coloration du verre (72%), luminophores (25%), télécommunication optique, lasers médico-chirurgicaux
Holmium	75 t	0.1%	*0.2%*	Coloration du verre, dopage de cristaux lasers
Thulium			*0.4%*	Dopage de fibres lasers et de certains luminophores
Ytterbium			*0.1%*	Constituant de cristaux lasers, mesures sismiques, métallurgie
Lutétium			*0.1%*	Médecine (tomographie), dopage de cristaux lasers, catalyse
Yttrium	7 650 t	6.8%	*4.9%*	Luminophores (78%), céramiques (21%), alliages métallurgiques, lasers, catalyse
TOTAL	**113 250 t**	100%		

** Source : Ad-Hoc Working Group of the European Commission on Critical Raw Materials, 2014, citant Patrice Christmann*
*** Source : Ad-Hoc Working Group of the European Commission on Critical Raw Materials, 2014, d'après Roskill et Kingsnorth*

Tableau 5 - Les principaux usages des Terres Rares, par élément (tonnages estimés à +/- 15 %).

Les grands secteurs d'usages des Terres Rares sont décrits dans les sections 3.1.1 à 3.1.6. Les applications sont ensuite détaillées par élément dans les sections 3.2.1 à 3.2.15.

La valeur du marché brut mondial des Terres Rares a été de l'ordre de 3,4 GUS$ en 2014, pour un tonnage global d'oxydes de Terres Rares (OTR) estimé à 120 000 t en 2014 (et 113 250 t en 2012)[32].

[32] La valeur du marché des Terres Rares est donc relativement modeste par rapport à d'autres métaux : ainsi le marché du cuivre a été de 22,4 Mt en 2014 pour une valeur de 116 GUS$, soit 35 fois le montant de marché des Terres Rares. Pour un autre ordre d'idée, le montant de 3,4 GUS$ du marché mondial annuel des Terres Rares est équivalent au montant du marché annuel du chewing-gum aux seuls États-Unis (3,35 GUS$ en 2013).

La valeur ajoutée générée par les nombreuses industries aval qui utilisent les Terres Rares (aéronautique, automobile, défense, éclairage, énergie, optique, technologies de l'information et de la communication, santé…) est variable mais souvent incommensurablement supérieure à la valeur de marché des Terres Rares contenues.

Et sans Terres Rares les performances de ces industries seraient celles d'il y a vingt ou trente ans, ou elles n'existeraient simplement pas, comme l'affichage vidéo en couleurs, les amplificateurs EDFA dans les télécommunications, les lasers YAG ou les éoliennes à génératrice synchrone. C'est ce qui explique que de nombreux secteurs des économies modernes seraient impactés en cas de rupture des approvisionnements.

Le tableau 6 et la figure 5 présentent les tonnages globaux d'OTR consommés en 2012 pour chacun des grands secteurs d'utilisation, tels que publiés par l'Ad-Hoc Working Group de la Commission Européenne dans son rapport Critical Materials for the EU (mai 2014), d'après Roskill et Kingsnorth (IMCOA[33]), mars 2013, Les trois principaux secteurs d'usages sont, en tonnage global toutes Terres Rares confondues, les aimants permanents, les poudres de polissage et la catalyse du craquage des pétroles lourds (en anglais Fluid Catalytic Cracking, ou FCC).

Secteur d'usage	Consommation mondiale en 2012
Aimants permanents	23 000 t
Polissage	17 000 t
Catalyse de craquage des pétroles lourds (FCC)	14 750 t
Verres et céramiques	13 250 t
Alliages métallurgiques	12 540 t
Batteries NiMH	9 460 t
Luminophores	8 000 t
Catalyse automobile	6 750 t
Autres catalyses	1 250 t
Autres	7 250 t
TOTAL	**113 250 t**

Tableau 6 - Consommation mondiale de Terres Rares par filières en 2012, en tonnes d'oxydes (Source : Roskill / IMCOA, 2013).

[33] Industrial Minerals Company of Australia Pty Ltd, société de consultance de Dudley Kingsnorth.

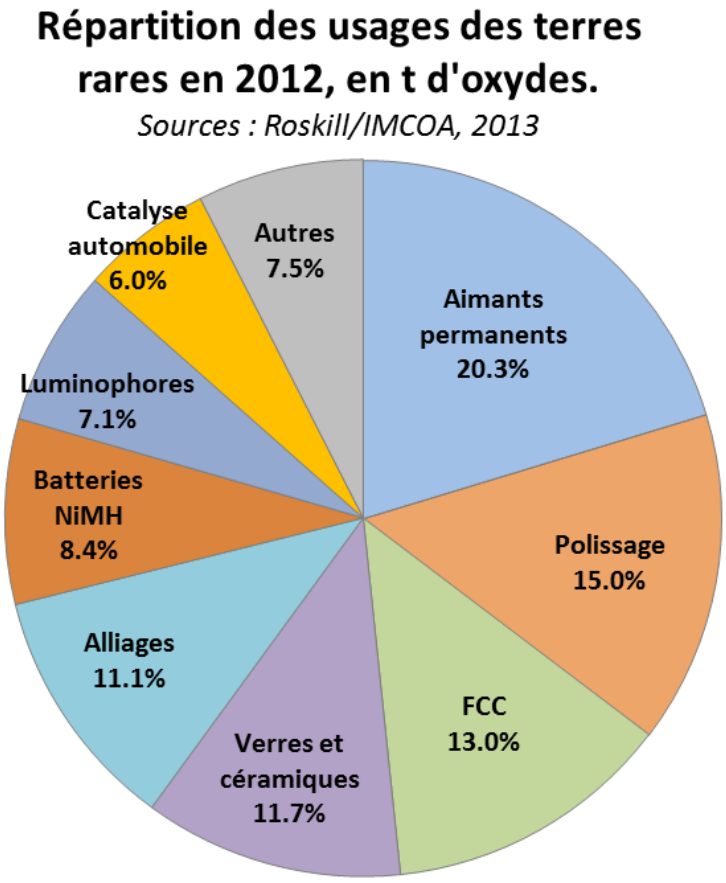


Figure 5 - Répartition des usages des Terres Rares par filières dans le monde en 2012.

Remarque : Les chiffres de 2012 ont été utilisés ici car présentant le plus grand niveau de détails par application. Cependant, les ordres de grandeur ont peu évolué pour l'année 2014 (tableau 7). Les tendances d'évolution des consommations sont décrites en 3.3.2.

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
Luminophores	8 000 t	6 180 t
Autres	7 250 t	9 900 t
TOTAL	**113 250 t**	**118 777 t**

Tableau 7 - Évolution des usages par filière entre 2012 et 2014. Source : Roskill 2015.

3.1. LES GRANDES FAMILLES D'USAGES

3.1.1. Les aimants permanents

La fabrication d'aimants permanents est l'application la plus consommatrice de Terres Rares à l'échelle mondiale, représentant 20 à 23 % en tonnage des usages (23 kt d'OTR en 2012, 24,8 kt en 2013), et près de 53 % de la valeur totale du marché des Terres Rares (Kingsnorth, 2014).

La demande correspondante est en croissance depuis la fin des années 1990, aux exceptions des années 2009 (comme toutes les matières premières minérales suite à la crise financière mondiale de 2008) et 2011-2012 en raison de la très forte flambée des prix des Terres Rares en 2011. Cette demande devrait rester assez fortement croissante dans les prochaines années (cf. 3.3.2).

Les aimants permanents sont utilisés dans divers types d'applications dont les principales sont la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique (générateurs) ou inversement (moteurs électriques). Ils sont aussi utilisés pour les haut-parleurs et écouteurs d'un grand nombre d'appareils électroniques. L'intérêt des aimants permanents à Terres Rares est que le volume et le poids nécessaires pour une performance magnétique équivalente est bien inférieur à celui des aimants de technologies plus anciennes (cf. fig.6).

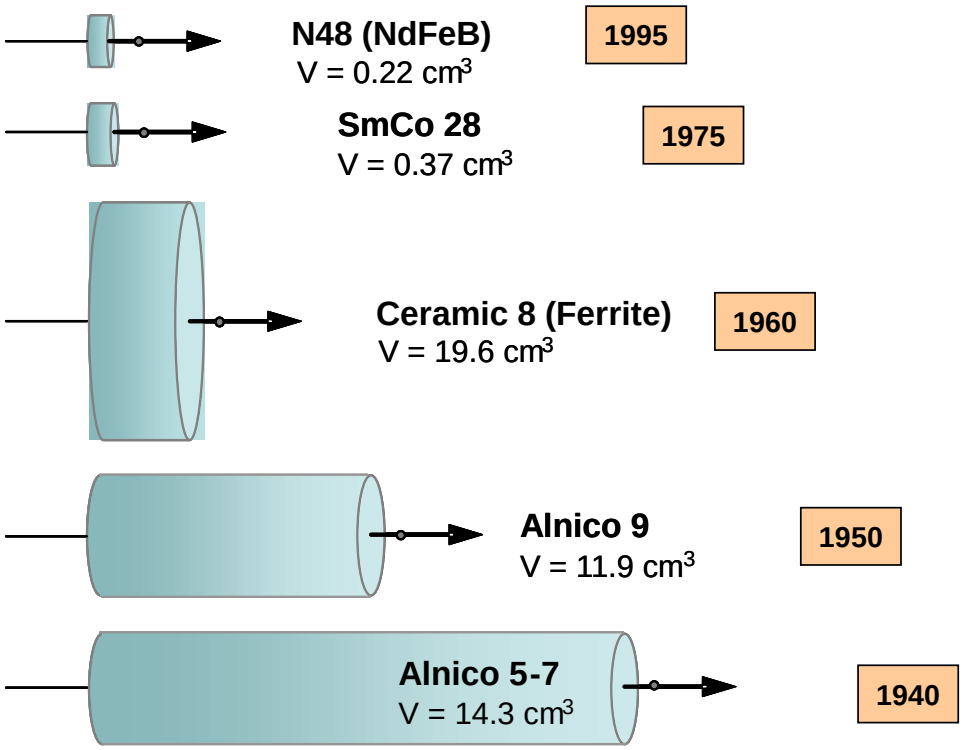


Figure 6 - Tailles (V = volume) et formes optimales relatives de aimants permanents pour générer un champ de 0,1 Tesla à 5 mm d'une face polaire de l'aimant, selon les technologies et leur dates de mise au point. Adapté d'après Arnold Magnetic Technologies.

Pour une performance donnée, c'est-à-dire un même champ magnétique fourni aux pôles, un aimant « N48 » à base de néodyme, développé en 1995 a un volume 89 fois inférieur à celui d'un aimant « Ceramic 8 » (aimant en ferrite développé dans les années 1960).

De plus, leurs propriétés magnétiques sont stables sur plusieurs décennies en l'absence d'échauffements au-delà du point de Curie.

Jusqu'à présent, principalement deux types d'aimants à base de Terres Rares ont été développés et ont conquis les marchés :

- les aimants samarium-cobalt, de composition $SmCo_5$ ou Sm_2Co_{17}, ont été développés à partir des années 1970. Ils possèdent la meilleure résistance connue à la démagnétisation. Ils sont aujourd'hui de plus en plus concurrencés par les aimants Nd-Fe-B, produits à un coût moindre. Les aimants Sm-Co sont privilégiés dans certaines applications où leur plus petite taille et leur plus grande stabilité aux hautes températures[34] sont des atouts. La production mondiale est évaluée à 1 300 t pour l'année 2014 (Roskill, 2015) ;
- les aimants néodyme-fer-bore (Nd-Fe-B), de composition $Nd_2Fe_{14}B$. Développés à partir de 1982, ils dominent désormais le marché grâce à leur coût compétitif et des propriétés supérieures en termes de force d'aimantation et de persistance (rémanence), mesuré par le paramètre BH_{max} (fig. 7). La production mondiale en est évaluée à 79 500 t pour l'année 2014 (Roskill, 2015).

BH_{max} est le produit énergétique maximal, exprimé en kJ/m^3. Ce produit tient compte à la fois de la densité du flux magnétique, B, et de l'intensité du champ, H. Il exprime la quantité maximale d'énergie magnétique stockée dans un matériau magnétique. Les aimants permanents à Terres Rares Nd-Fe-B offrent la plus forte valeur BH_{max} connue à ce jour, et de surcroît, proche du maximum théorique calculé (Gutfleisch et al., 2011)[35]. La valeur BH_{max} est la carte d'identité de l'aimant, fournie obligatoirement par le producteur.

Les aimants permanents à Terres Rares ont ainsi permis une diminution significative des dimensions et de la masse des dispositifs les utilisant. Ils sont un élément incontournable de la miniaturisation des moteurs électriques dans plusieurs domaines (informatique, automobile, défense, etc.) et de l'évolution des dispositifs électro-acoustiques. Le tableau 8 illustre la diversité de leurs secteurs d'applications, près de 70% de ces usages étant sous forme de moteurs électriques (Constatinides, 2015).

[34] Un aimant samarium-cobalt possède une énergie spécifique de 240 kJ/m^3 à 25 °C, avec une température d'utilisation pouvant aller jusqu'à 550°C. Un aimant néodyme-fer-bore possède quant à lui une énergie spécifique de 380 kJ/m^3 à 25°C, mais une température maximale d'utilisation de seulement 80°C (pouvant aller jusqu'à 220 °C si on y ajoute du dysprosium)

[35] Cette valeur maximale théorique est de BH_{max} = 512 Kj/m^3, pour un BH_{max} = 470 kJ/m^3 pour les plus puissants aimants Nd-Fe-B

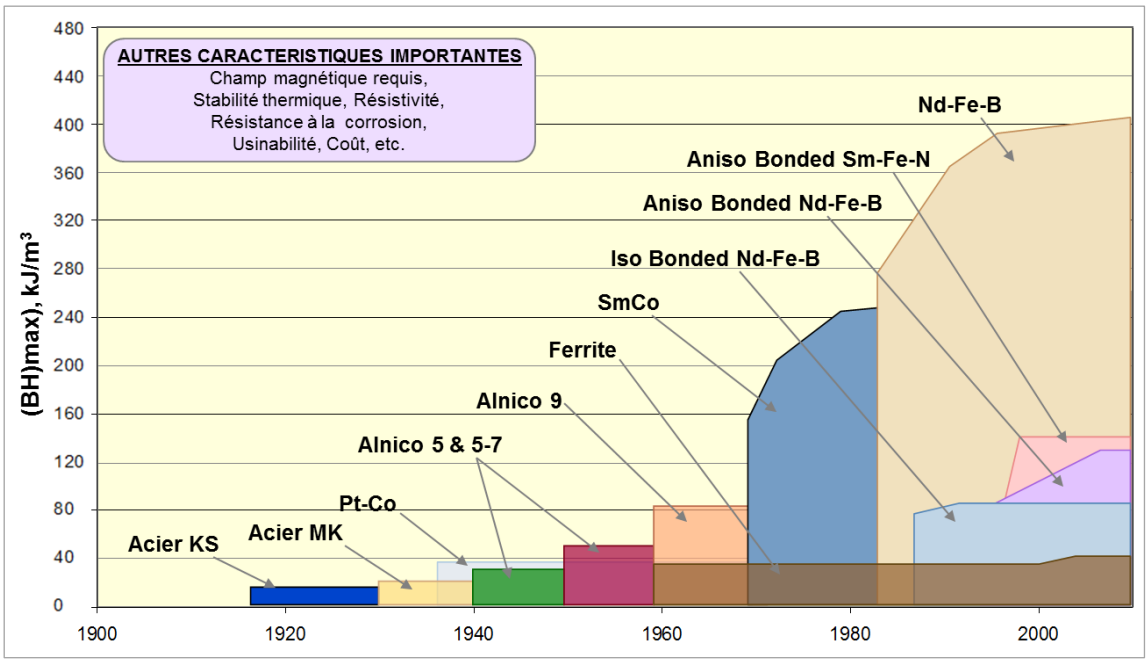


Figure 7 - Mesure du paramètre BH_{max} de différents aimants © Arnold Magentic Technologies.

Industrie	Applications
Aérospatiale et défense	Moteurs pas à pas, boussoles électroniques, capteurs, systèmes d'embrayage et de freins, systèmes de radars, systèmes de guidage des missiles, accéléromètres
Automobile	Démarreurs, 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.
Equipements 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.

Tableau 8 - Principaux domaines d'applications des aimants permanents à Terres Rares.

La performance des aimants à terres rares est liée à leur composition, alliant une Terre Rare (néodyme ou samarium) et un métal de transition (fer ou cobalt). Cet alliage permet d'obtenir une structure exceptionnellement anisotrope, à la fois capable de garder ses propriétés magnétiques de manière permanente, grâce au métal de transition, et de concentrer une force d'aimantation extrêmement puissante dans un très faible volume, grâce à la Terre Rare (fig. 8). À ce jour, aucune recherche n'a permis d'identifier de matériaux susceptibles de concurrencer à court terme les performances magnétiques de ces aimants pour une taille et une masse similaires.

Figure 8 - Illustration de la taille et de la force d'aimantation d'un aimant permanent Nd-Fe-B (© J.Lucas).

D'autres Terres Rares peuvent intervenir dans la composition des aimants Nd-Fe-B. Le néodyme peut être partiellement substitué par du praséodyme, qui a des propriétés très voisines. L'ajout de dysprosium ou éventuellement de terbium[36] permet de renforcer la résistance à la démagnétisation de l'aimant aux hautes températures. On passe ainsi de températures d'utilisations maximales de 80 °C à plus de 200 °C. Cette caractéristique est très recherchée en particulier pour leur usage dans les moteurs des voitures ainsi que dans les génératrices des éoliennes (cf. fig. 9 et 10), où les températures montent très vite dans ces ordres de grandeur.

La masse de dysprosium ajoutée peut aller de 5 à 11 % de la masse totale de l'aimant. Compte tenu du prix élevé de ce métal, le prix de l'aimant peut être multiplié par deux, facteur influençant le choix de son utilisation par les consommateurs finaux. En outre, les risques d'approvisionnement pesant sur cet élément, très peu abondant dans la plupart des gisements de Terres Rares (cf. tab 5), a conduit de nombreux industriels à développer des recherches pour tenter de réduire, voire d'éviter, l'utilisation de dysprosium dans la composition des aimants permanents. Les résultats progressent mais n'ont pas encore permis de passer au stade de la production industrielle (cf. 3.4).

[36] La substitution du dysprosium par le terbium est pénalisée par un prix deux fois plus élevé pour ce dernier (cf. chap 5)

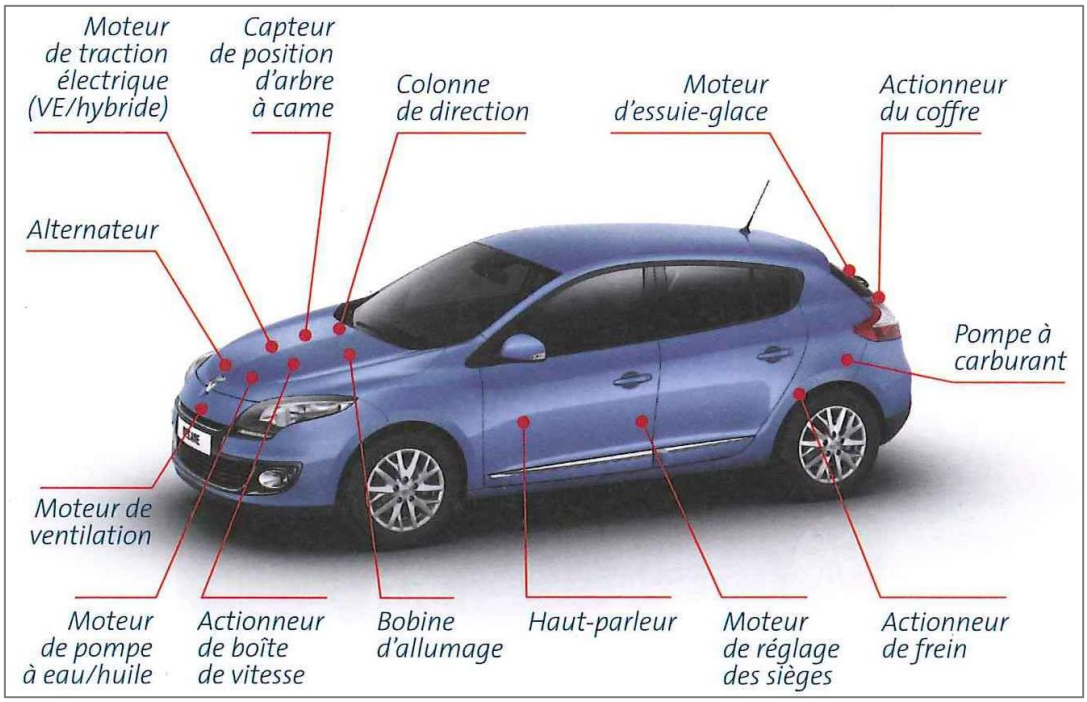


Figure 9 - Aimants permanents dans un véhicule standard (© Renault, 2011).

Il peut être anticipé qu'à court et moyen termes, l'utilisation des aimants permanents à base de Terres Rares continuera à se développer, par exemple du fait de nouvelles réglementations des pays occidentaux exigeant de plus hauts rendements des moteurs électriques: électroménager, robots, automobiles (fig. 9), etc., mais aussi étant donné leurs possibles champs d'applications futurs. En effet, les aimants Nd-Fe-B sont utilisés dans les nouvelles générations d'éoliennes à générateurs synchrones et entrainement direct (sans boîte de vitesses) atteignant 6 à 7 MW, contre de l'ordre de 2 MW pour les éoliennes terrestres classiques à générateur asynchrone sans aimants permanents (à rotor et stator bobinés), nécessitant un système multiplicateur.

Leur taille et leur maintenance simplifiée permet d'exploiter les vents faibles, et leur permet d'être installées là où la maintenance est plus difficile, comme en mer (off-shore). Si l'installation d'éoliennes en mer se développait massivement, elle pourrait avoir une influence considérable sur la demande en néodyme, dysprosium, et terbium (cf. 3.3.2).

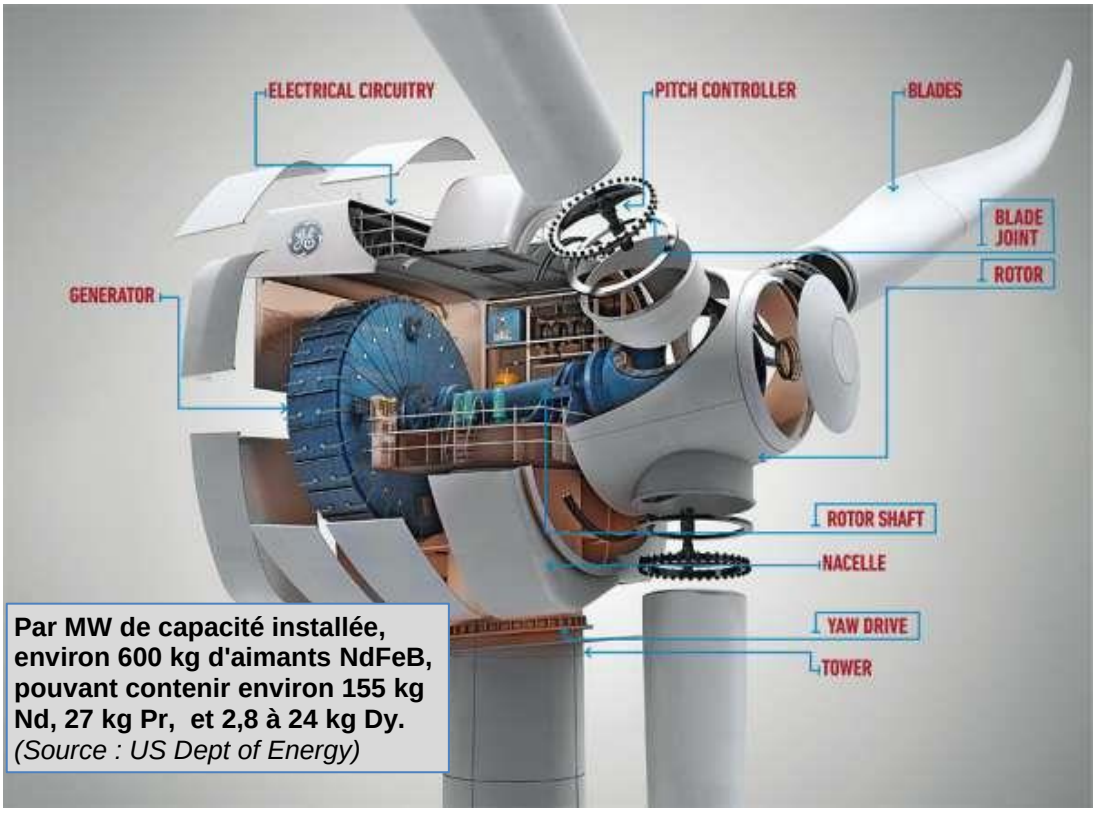


Figure 10 - Éolienne à entrainement direct à aimants permanents de 4 MW de General Electric pour installation off-shore (sur mât de 90 m, diamètre du rotor de 110 m).

3.1.2. Les poudres de polissage

Les poudres de polissage consomment près de 15 % des tonnages totaux d'oxydes de Terres Rares, soit 17 000 t d'OTR en 2012. Elles en représentent cependant moins de 5 % en valeur, du fait qu'elles utilisent surtout les éléments les moins chers.

Les poudres à base d'oxydes de Terres Rares ont remplacé l'oxyde de fer utilisé auparavant pour un très grand nombre de surfaces à polir : verres de lunettes, montres, écrans plats des téléviseurs, pièces électroniques (puces d'ordinateurs, disques, galettes de silicium, etc.) et sont aussi utilisées en optique de précision, cristallerie, miroiterie, et joaillerie. Le dioxyde de cérium (CeO_2) est l'une des meilleures poudres de polissage du verre connue, et cette application constitue la plus grande part des usages du cérium à l'échelle mondiale (36 %)[37]. L'oxyde de mischmétal, un mélange de Terres Rares légères non séparées (cf. 3.1.6) a également été largement utilisé, en raison de son faible coût et de sa simplicité de production, dans l'industrie du polissage, tout particulièrement par les industries chinoises et japonaises avant la crise des prix des Terres Rares en 2010.

La supériorité du dioxyde de cérium pour le polissage du verre par rapport à d'autres matériaux (alumine ou diamant, par exemple) tient à son action à la fois mécanique et chimique, le "chemical mechanical polishing" (fig. 11). Ainsi, non seulement le CeO_2 casse les petits grains et les impuretés à la surface du verre, mais il permet également une réaction chimique : l'ion hydroxyde (OH^-) à la surface des nanoparticules de CeO_2 se lie avec un

[37] Ce pourcentage varie en fonction des zones géographiques. Par exemple en Europe, la part d'utilisation du cérium pour la catalyse automobile est très supérieure à celle du polissage, du fait notamment d'une faible production d'écrans plats en Europe par rapport à l'Asie.

autre ion hydroxyde à la surface du verre, et permet ainsi un pelage couche par couche, assurant une meilleure qualité de poli.

La plus grande part de marché des poudres de polissage concerne les écrans de tous types (écrans plats des téléviseurs, smartphones, baladeurs mp3, etc.) dont la production s'est considérablement accélérée cette dernière décennie. Le prix peu élevé du cérium et les perspectives de croissance de la demande pour ces biens de consommation pourraient encore faire augmenter cette part, malgré un recyclage de plus en plus efficace des poudres de polissage par les industriels chinois et japonais (cf. 3.3.2).

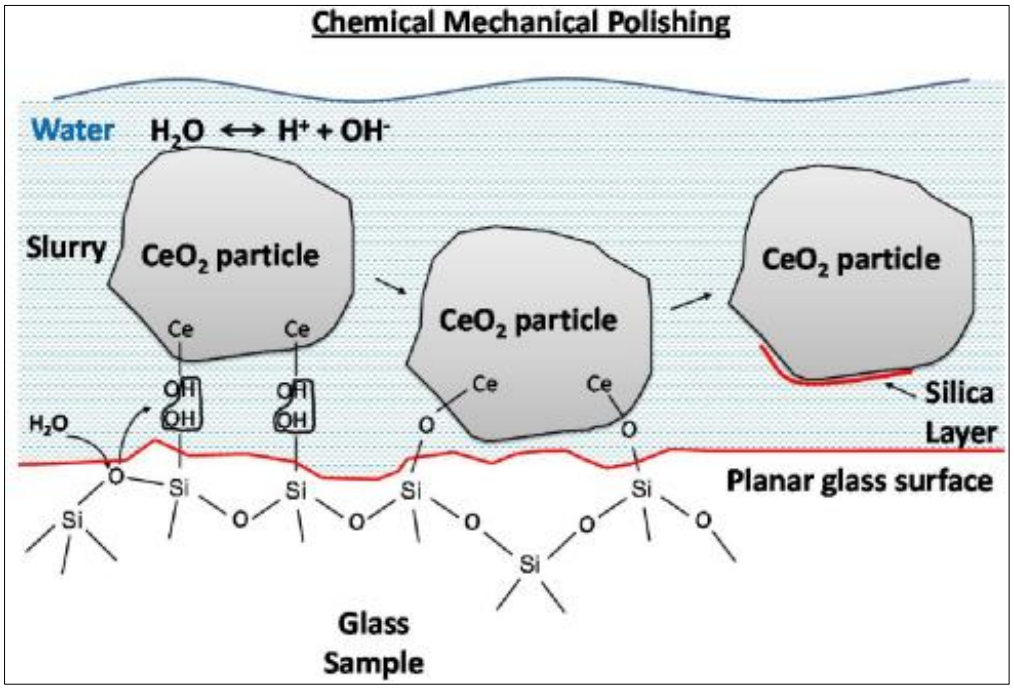


Figure 11 - Mécanisme d'action chimico-mécanique des poudres de polissage à base de dioxyde de cérium (© J. Lucas, 2014).

3.1.3. La catalyse de craquage des pétroles lourds

La catalyse du craquage des pétroles lourds en lit fluide (Fluid Cracking Catalyst, FCC) a consommé 14 750 t d'OTR en 2012, soit 13 % des usages globaux des Terres Rares à l'échelle mondiale (cf. tab 6). Elle est la principale filière d'utilisation du lanthane (44 %).

Les catalyseurs sont des substances augmentant la vitesse d'une réaction chimique sans pour autant subir elles-mêmes de changements chimiques lors de la réaction. La catalyse du craquage des pétroles lourds est une étape du traitement du pétrole brut consistant à scinder les fractions lourdes des hydrocarbures en produits plus légers, utilisables comme carburant (diesel, kérosène). Elle fait intervenir comme catalyseur une zéolithe (alumino-silicate hydraté, naturel ou de synthèse), activée et stabilisée grâce au lanthane. L'ajout de lanthane permet d'augmenter les rendements de la réaction de 10 %. Il existe deux types de mélanges pouvant être utilisés pour traiter les zéolithes avec des performances catalytiques comparables. Le plus courant, très enrichi en lanthane (80 % La_2O_3, 10 % CeO_2, 5 % Nd_2O_3), l'autre plus proche de la composition du mischmétal, à 20 % La_2O_3. Le principe de la réaction de craquage catalytique est présenté en figure 12.

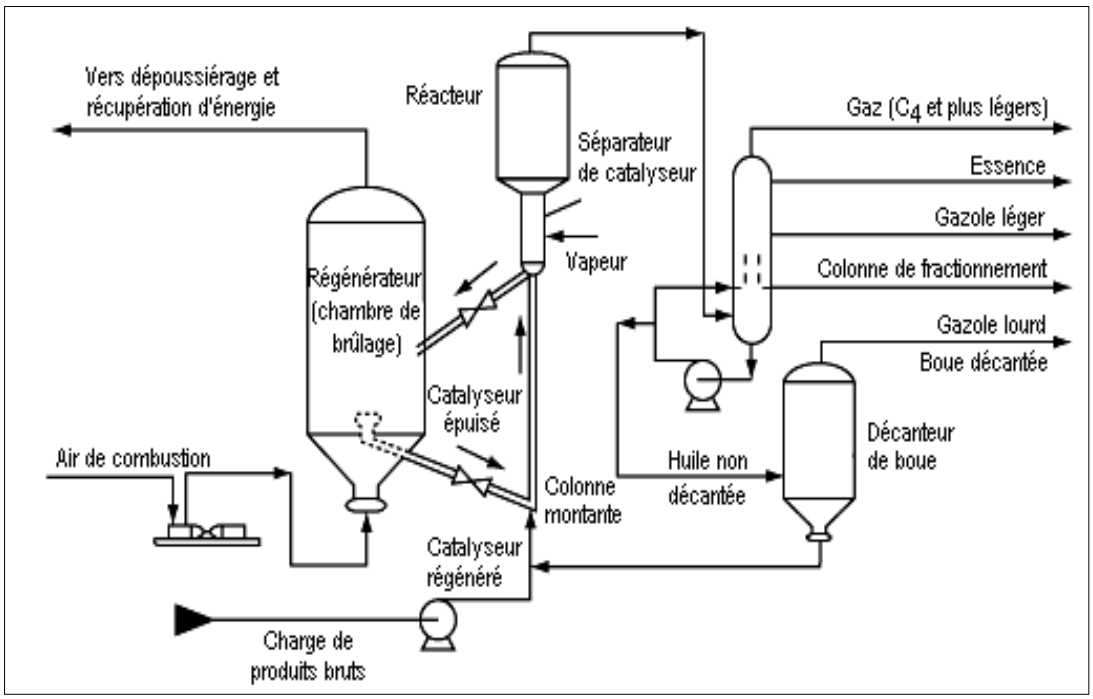


Figure 12 - Schéma du procédé de craquage catalytique. Source : Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 1996.

3.1.4. La catalyse automobile

Le rôle des pots d'échappement catalytiques des véhicules automobiles (voitures individuelles, véhicules utilitaires et de transport collectif) est de convertir au maximum les composés polluants rejetés par la combustion de l'essence ou du gazole dans les moteurs thermiques en composés non nocifs. Ces moteurs rejettent en effet surtout du dioxyde de carbone (CO_2) et de la vapeur d'eau (H_2O) qui sont les produits inévitables de la combustion des hydrocarbures. Mais ils rejettent aussi du monoxyde de carbone (CO), divers oxydes d'azote (NO_x), et quelques hydrocarbures imbrûlés (C_xH_y), nocifs par inhalation à l'homme et aux animaux. Le fonctionnement de ces moteurs, et plus particulièrement celui des moteurs diesels, rejette aussi des aérosols de particules fines (fumées).

Les pots catalytiques ont été développés à partir de 1974 (General Motors) puis ont été rendus obligatoires pour les constructeurs dans les années 1990. Ils sont désormais généralisés à tous les pays constructeurs, et les normes antipollution sont de plus en plus serrées (en Union Européenne, normes successives Euro1 (1993) à Euro6 (2014), exigeant des systèmes catalytiques toujours plus performants.

Les pots catalytiques sont composés d'une chambre en acier inoxydable contenant un ou plusieurs « monolithes » en série (le plus souvent 2 à 3), qui consistent généralement en une céramique à composition de cordiérite avec une texture en « nid d'abeille » (microconduits alvéolaires) tapissée d'alumine et oxyde de cérium (CeO_2) revêtus de microparticules de métaux du groupe du platine (Pt, Pd, Rh) qui sont les principaux éléments catalyseurs (fig.13 et 14).

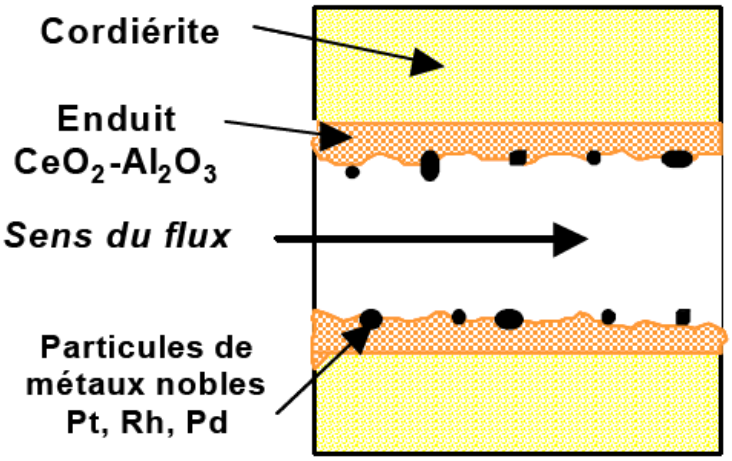


Figure 13 - Vue en coupe d'un canal de monolithe de pot catalytique.
© Société Chimique de France, division catalyse (www.societechimiquedefrance.fr).

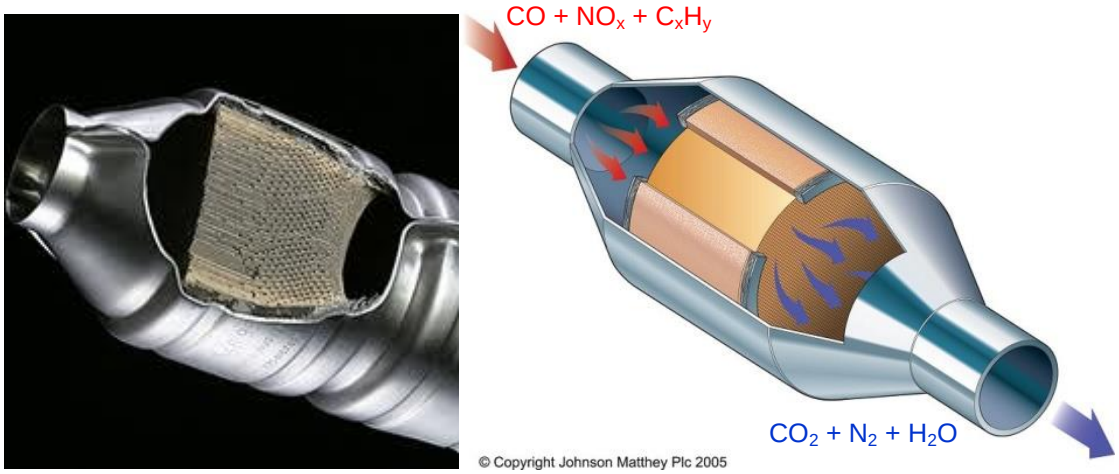


Figure 14 - Écorché et schéma d'un pot catalytique simple (© Johnson Matthey Plc).

Le support est composé d'alumine (Al_2O_3), associée à environ 20 % en masse de CeO_2. Le rôle du cérium est de réguler la teneur en dioxygène lors de la combustion qui assure la conversion de CO en CO_2 (rendement > 90 %) et des hydrocarbures imbrûlés en CO_2 et H_2O. En effet, l'existence de deux degrés d'oxydation permet aux oxydes de cérium de jouer soit un rôle d'oxydant (CeO_2), soit un rôle de réducteur (Ce_2O_3). Ainsi, en présence d'un excès de dioxygène, l'oxyde de cérium stocke l'oxygène ($Ce_2O_3 + ½\ O_2 \rightarrow 2\ CeO_2$), et inversement, quand le dioxygène est en défaut, CeO_2 le restitue. Les qualités réfractaires des oxydes de cérium sont également appréciées dans cette application.

La catalyse automobile représentait 13 % des usages mondiaux du cérium en 2012 (part plus importante en Europe, notamment du fait des réglementations d'émissions plus strictes). La généralisation des réglementations anti-pollution hors d'Europe, notamment en Asie, ainsi qu'une tendance haussière du marché automobile mondial devraient continuer à soutenir la demande en cérium pour cet usage, renforcée par des prix bas et des excédents conséquents de cet élément.

Les autres applications des Terres Rares en catalyse sont plus marginales et font intervenir des Terres Rares comme le néodyme et le praséodyme (au sein du mischmétal), ou l'yttrium (cf. 3.2.15).

3.1.5. Les batteries NiMH

Les batteries NiMH (Nickel Metal Hydride[38]) sont constituées d'une électrode positive en hydroxyde-oxyhydroxyde de nickel, d'un électrolyte d'hydroxyde de potassium à 8,7 moles/l et d'une électrode négative en alliage lanthane-pentanickel ($LaNi_5$). Ces batteries rechargeables ont remplacé les batteries nickel-cadmium à la fin des années 1990. Les batteries NiMH ont eu de nombreuses applications (ordinateurs portables par exemple), mais elles sont elles-mêmes en cours de remplacement par les batteries Li-ion. Représentant désormais moins de 2 % du marché total mondial des batteries (Pillot, 2015), on les retrouve encore essentiellement dans de l'outillage portatif et dans certains véhicules hybrides. Les modèles initiaux de Toyota Prius étaient par exemple équipés exclusivement de batteries NiMH (fig. 15).

Figure 15 - Batterie NiMH utilisée dans les véhicules hybrides (contient 10 à 15 kg de Terres Rares, lanthane principalement) (source : Lucas, 2014).

Le lanthane est la principale Terre Rare utilisée à cette fin, mais il peut être associé à d'autres Terres Rares légères (cérium, néodyme ou praséodyme) si elles n'ont pas été totalement séparées[39]. La teneur en Terres Rares dans ces batteries est d'environ 7 % en masse (Vignes, 2011). Ainsi, dans une batterie AAA, la masse de Terres Rares est de 1 g, dans une batterie d'outil professionnel, 60 g, et dans un véhicule hybride, de 10 à 15 kg. Pour ce dernier usage, les batteries Li-ion remplacent aussi progressivement cette technologie, car elles présentent une densité d'énergie (rapport puissance fournie / masse de la batterie) supérieure aux batteries NiMH et des prix de production qui diminuent.

La demande en Terres Rares pour le secteur des batteries NiMH s'est élevée à 9 460 t d'OTR en 2012 (cf. tab.6). Elle devrait diminuer, avec la migration progressive vers les batteries Li-ion, déjà en cours chez plusieurs constructeurs (comme Toyota avec les nouvelles versions de son hybride Prius).

3.1.6. Les autres applications des alliages métallurgiques

Les alliages métallurgiques autres que ceux pour batteries NiMH comptent pour 11 % des quantités de Terres Rares consommées à l'échelle globale, soit 12 540 t d'OTR en 2012 (cf. tab.6).

[38] En français, Nickel - Hydrure de métal

[39] Le néodyme et le praséodyme en sont de plus en plus séparés, du fait de leur plus grande valeur. Quant au cérium, la plus grande part peut en être séparée plus facilement par oxydation.

Sous forme de mousse, l'alliage $LaNi_5$ peut absorber jusqu'à 400 fois son propre volume d'hydrogène. Il peut donc être utilisé pour stocker de l'hydrogène pour des générateurs électriques (en particulier les piles à combustibles) de secours (hôpitaux, bases militaires) ou pour des sites isolés.

C'est sous forme de mischmétal (cf. encadré) que les Terres Rares sont principalement utilisées en métallurgie et en particulier en sidérurgie.

Par son caractère réducteur, il permet la désoxydation et la désulfuration de l'acier. Il peut être ajouté à des teneurs comprises entre 0,1 et 0,2 %. Il sert également à catalyser la précipitation de nodules de graphite et la neutralisation d'éléments indésirables dans la production de fonte. En outre, les caractéristiques des Terres Rares contenues dans ce mélange permettent d'augmenter la résistance à la corrosion, à la déformation et aux hautes températures de l'acier.

Le mischmetal

Le terme de mischmétal (de l'allemand, mischmetall, mélange métallique) désignait à l'origine un alliage de Terres Rares légères non séparées dans lequel on retrouve les proportions naturelles de chaque élément, en moyenne, c'est-à-dire environ 50% de cérium, 20-25% de lanthane, 15-17% de néodyme et 5-10% de praséodyme, ~1% de samarium, etc. Plus simple et moins coûteux à obtenir, en comparaison des procédés industriels de séparation de Terres Rares individuelles, le mischmétal a été la principale forme d'utilisation des Terres Rares pendant longtemps, en particulier pour une de leurs toutes premières utilisations, la pierre à briquet en ferrocérium (cf.3.2.2). Aujourd'hui, compte tenu des prix élevés du praséodyme et du néodyme et de leur demande spécifique pour les aimants permanents, et à l'inverse des prix assez faibles du lanthane et du cérium, les deux premiers (Pr et Nd) sont désormais pratiquement toujours séparés, et le mischmétal commercialisé est désormais un alliage La-Ce. La Chine commercialise un mischmétal qui est un alliage, à environ 35 % La - 65% Ce (Metal-Pages). Le mischmétal reste privilégié pour les applications ne requérant pas des Terres Rares hautement séparées et purifiées, et en particulier pour ses applications métallurgiques.

Les autres utilisations des Terres Rares en métallurgie incluent les alliages de magnésium et d'aluminium, ainsi que des superalliages et autres alliages de haute qualité à destination des industries aéronautique, nucléaire et militaire, dont les productions sont principalement implantées au Japon, en Autriche et au Royaume-Uni (Roskill, 2011). Ces alliages utilisent des Terres Rares individuelles (cérium, gadolinium, terbium, dysprosium, erbium, holmium ytterbium, ou yttrium) en petites quantités (teneurs de l'ordre de 1 %, variant en fonction de l'élément). De manière générale, l'ajout de Terres Rares à ces alliages permet d'améliorer la mise en forme du matériau, renforce ses propriétés mécaniques et augmente la résistance à la corrosion et aux hautes températures de manière très significative.

La demande en Terres Rares pour les alliages métallurgiques (hors batteries NiMH) devrait rester stable si les prix des Terres Rares se maintiennent à leur niveau actuel.

3.1.7. Industries du verre et des céramiques

La consommation de Terres Rares dans l'industrie du verre et des céramiques s'élevait à 13 000 t d'OTR en 2012, soit 12 % des usages mondiaux. Bien que regroupées au sein d'un même groupe d'usages, les applications des Terres Rares dans ces industries sont variées. L'application la plus connue et commune à ces deux industries est l'utilisation des propriétés optiques individuelles de plusieurs Terres Rares dans la composition des pigments de

coloration des verres et céramiques. Les Terres Rares y sont utilisées préférentiellement du fait de leurs couleurs vives et de leur faible toxicité.

Pour les céramiques, ce marché est cependant restreint (1 % de la demande totale en Terres Rares), et dominé par la production de carreaux céramiques colorés pour la construction domestique chinoise (Roskill, 2011). En comparaison, l'utilisation des Terres Rares dans les céramiques dites « avancées » représente un marché quatre fois plus gros en termes quantitatifs, dominé par l'oxyde d'yttrium (70-80 %). Ce terme désigne des céramiques aux performances améliorées principalement utilisées dans les réfractaires et dans des applications électroniques telles que des condensateurs, un certain nombre de capteurs, ou encore dans des piles à combustibles. Leur principale caractéristique est la résistance à des conditions extrêmes, en température notamment. L'ajout de Terres Rares permet d'augmenter cette résistance jusqu'à 300°C.

Les pigments de coloration des céramiques sont principalement obtenus à partir d'oxydes de praséodyme, de néodyme et d'yttrium. Ces Terres Rares servent à produire les couleurs jaune, violet et orange et sont ajoutées à des teneurs respectives de 3 %, 33 % et 1 %. Le dioxyde de cérium est aussi utilisé comme opacifiant pour les émaux. Dans la coloration du verre, on utilise les oxydes de néodyme (violet), praséodyme (jaune vif à vert clair) et erbium (rose).

Dans l'industrie du verre, les applications autres que la coloration font intervenir en priorité le lanthane et le cérium, du fait de leur abondance. Ces deux lanthanides rentrent dans la composition des verres en tant qu'additifs pour en améliorer les propriétés optiques, sous quatre formes principales :

- le procédé de décoloration du verre ;
- la résistance au brunissement ;
- l'augmentation de l'indice de réfraction pour les verres de haute pureté (optique) ;
- la résistance à l'altération par des rayons UV.

Procédé de décoloration du verre

La fabrication du verre implique l'utilisation de matières premières (sable, calcaire, soude) contenant des impuretés colorantes, dont les principales sont des oxydes de fer qui donnent à long terme des teintes indésirables au verre (vert-jaune). La décoloration consiste à neutraliser ces impuretés pour rendre le verre transparent et clair. La première étape (décoloration chimique) consiste à oxyder les ions Fe^{2+}. Parmi les divers oxydants mis en œuvre, l'oxyde de cérium (CeO_2) a été utilisé dès les années 1950 en remplacement de l'arsenic et l'antimoine, car moins toxique, stable aux hautes températures, absorbant peu les rayonnements dans le spectre visible, et réduisant l'addition de décolorants physiques en deuxième étape. On utilise en moyenne 1 kg de CeO_2 à 65 % par tonne de sable riche en silice, pour la production de verre flotté (Roskill, 2011). La deuxième étape, la décoloration physique, consiste à ajouter des colorants au verre afin d'atténuer la teinte jaunâtre résultant de la décoloration chimique. Parmi ceux-ci, on retrouve le cobalt, le sélénium, le manganèse ou le nickel, mais également l'oxyde de néodyme ou l'oxyde d'erbium, qui permettent d'absorber les couleurs indésirables.

Résistance au brunissement

Le cérium sert également d'agent anti-brunissant du verre. Cette application utilise le caractère oxydo-réducteur du cérium et le couple Ce^{4+}/Ce^{3+}. L'oxyde de cérium est incorporé dans des proportions de 0,2 à 0,3 % dans des verres subissant d'importants rayonnements ionisants (rayons X, rayons gamma). En piégeant les électrons libérés par le rayonnement,

Ce^{4+} se transforme en Ce^{3+}, ion incolore, et empêche la formation de centres colorés responsables du brunissement. Cette application est importante dans les industries nucléaire et médicale. Elle l'était aussi pour la fabrication des verres des tubes cathodiques, mais ce marché est en nette réduction (cf. 3.3.2).

Augmentation de l'indice de réfraction pour les verres de haute pureté

L'ajout d'oxyde de lanthane La_2O_3 ou de son carbonate $La_2(CO_3)_3$ permet d'augmenter l'indice de réfraction du verre et en diminue l'aberration chromatique. Ces composés sont ajoutés dans la composition des verres de haute pureté, comme les lentilles d'objectifs d'appareils photos haut de gamme, de télescopes, de jumelles, de caméras de surveillance (grand angle) ou de téléphones portables. Ces additifs sont également employés dans la composition de fibres optiques pour augmenter la vitesse de transmission de la lumière. Le tableau 9 ci-dessous indique quelques exemples de proportions de La_2O_3 ajoutées en fonction du verre optique recherché.

Type de verre	Teneur en La_2O_3	Description
Verre optique borosilicaté au plomb	0 à 5%	Verre à fort indice de réfraction pouvant être fusionné avec un verre photochromique de bas indice de réfraction. Utilisé pour les lentilles multifocales.
Verre optique à dispersion anormale aux faibles longueurs d'ondes	0 à 9%	L'oxyde de lanthane y est ajouté pour augmenter la résistance aux attaques chimiques
Verre utilisé dans les fibres optiques	31 à 35%	Le fort indice de réfraction permet l'utilisation de ce verre au cœur de la fibre optique, pour améliorer la conduction de la lumière et la transmission de données
Verre lanthane-zinc-borate	32.7%	Verre optique ayant un indice de réfraction supérieur à 1,7 (contre 1,5 en moyenne). Permet une meilleure transmission des UV

Source : Glass Technology cité par Roskill, 2011

Tableau 9 - Proportions de La_2O_3 ajouté dans certains verres optiques. Source : Glass Technology, cité par Roskill (2011).

Résistance à l'altération par des rayons ultra-violets

Grâce à une bande d'absorption de la lumière située autour de 400 nm, le dioxyde de cérium (CeO_2) a une bonne capacité d'absorption des rayons ultraviolets (UV). Cette caractéristique est mise à profit dans la composition des verres de protection solaires, ainsi que dans d'autres verres soumis à des rayonnements UV, dans la protection des emballages alimentaires, par exemple.

L'industrie des verres et des céramiques est un secteur de consommation des Terres Rares relativement stable, favorisé par les prix peu élevés du lanthane et du cérium (cf. 5.2). L'IMCOA (D.Kingsnorth) envisage des perspectives de croissance de la demande de 4-6 % par an pour ce secteur pour la période 2014-2017.

3.1.8. Les luminophores

Remarque préliminaire sur la terminologie : un luminophore est une substance qui, lorsqu'elle subit une excitation (par des électrons comme dans les tubes cathodiques, des photons ou d'autres particules) émet de la lumière sur des longueurs d'onde spécifiques. Dans les publications françaises sur les Terres Rares et leurs propriétés luminescentes, on rencontre les termes de « luminophore » mais aussi de « phosphore». Mais ce dernier terme, dans ce sens, est un anglicisme. En français, phosphore désigne plutôt l'élément

chimique phosphore. Tandis qu'en anglais, l'élément est désigné par "phosphorus", un mot distinct du terme anglais "phosphor" qui désigne les luminophores. Ainsi, pour éviter toute ambiguïté en français, c'est le terme luminophore qui sera employé exclusivement dans ce rapport.

Les propriétés de luminescence de la plupart des lanthanides sont largement utilisées pour la production de luminophores. On retrouve ces luminophores dans un grand nombre d'applications des lumières fluorescentes, notamment pour les systèmes d'affichage des écrans de télévision, ordinateurs et autres appareils électroniques, ainsi que dans les systèmes d'éclairage à la fois domestiques, publics et commerciaux (enseignes publicitaires, par exemple). Ce marché représentait, en 2012, 7 % des quantités de Terres Rares consommées autour du globe, soit 8 000 t d'OTR.

Historiquement, c'est cette filière qui a permis l'essor de l'industrie des Terres Rares dans les années 1970, tiré par la croissance de la demande en téléviseurs couleur à tube cathodique. En effet, la couleur rouge de ces téléviseurs était obtenue grâce à un luminophore à base d'europium et d'yttrium, dont le fonctionnement est détaillé ci-dessous (figure 16).

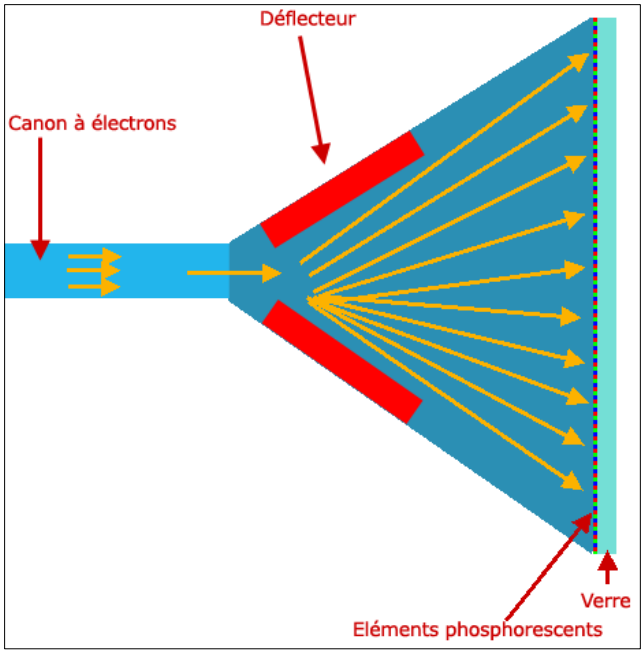


Figure 16 - Schéma d'un écran à tube cathodique.

Un tube cathodique est un tube en verre sous vide, dans lequel un dispositif, composé d'un filament de tungstène, d'une cathode et d'une anode, permet la création d'un flux d'électrons dirigés à grande vitesse vers l'écran par un champ électrique[40]. L'écran est recouvert sur sa face interne d'éléments fluorescents, ou luminophores, juxtaposés en éléments d'image ou « pixels ». Ces éléments, lorsqu'ils sont frappés par le faisceau d'électrons, émettent une lumière dans une couleur spécifique. Dans les écrans cathodiques couleur, il y a 3 faisceaux d'électrons, correspondant à trois cathodes, qui viennent chacun heurter un luminophore émettant une couleur spécifique : un rouge, un vert, et un bleu. Les luminophores rouges nécessitaient l'utilisation de Terres Rares, soit sous forme d'orthovanadate d'yttrium ($YVO_4:Eu^{3+}$), soit d'oxysulfure d'yttrium ($Y_2SO_2:Eu^{3+}$), tous deux dopés à l'europium. Les luminophores verts étaient réalisés à base de sulfure de zinc activé par du cadmium, les bleus à base de sulfure de zinc activé par du cadmium et de l'argent. Le rôle des déflecteurs

[40] Ce champ électrique est généré grâce à la différence de tension entre la cathode et l'anode

(bobines en cuivre), est de créer un champ magnétique déviant le faisceau d'électrons horizontalement et verticalement, créant donc un balayage continu de l'écran et orientant ce flux vers les luminophores appropriés en fonction de l'intensité du faisceau. Ce balayage n'étant pas perçu par l'œil humain grâce à la persistance rétinienne, l'observateur extérieur voit une image composée des pixels allumés au cours du balayage sur la face externe de l'écran.

Les téléviseurs étaient encore presque tous à tube cathodique jusqu'au début des années 2000, puis les écrans plats les ont progressivement remplacés entre 2004 et 2011. Display Search (www.displaysearch.com), du groupe américain NPD Group Inc., publie périodiquement des profils d'évolution du marché des téléviseurs. La figure 17 est extraite de leur rapport du 3 janvier 2012.

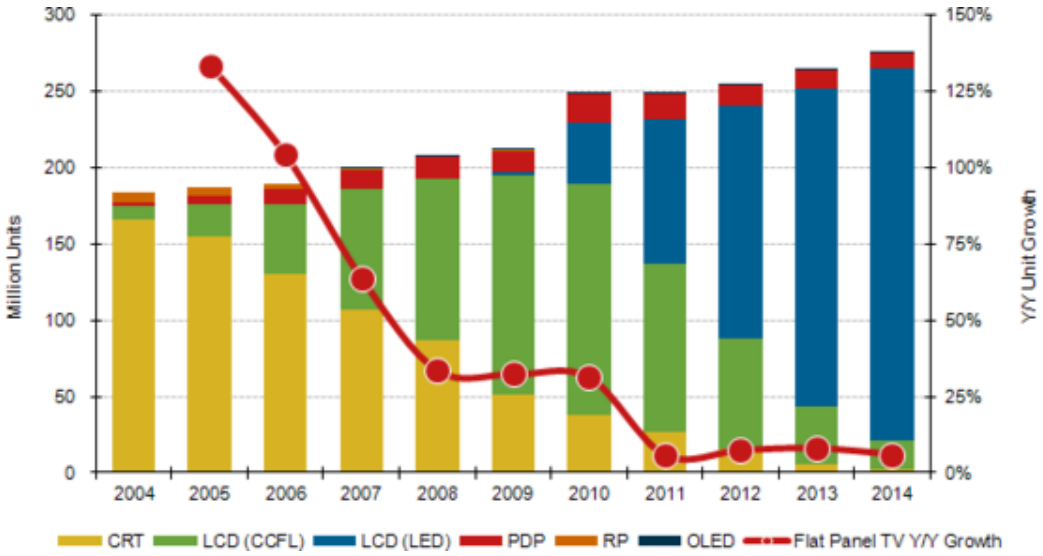


Figure 17 - Evolution des livraisons de téléviseurs par technologie
(source : Display Search, Quarterly advanced global TV shipment and forecast report, 3/01/12).

Les téléviseurs à tubes cathodiques (CRT) ne représentaient plus qu'une part marginale en 2012 et leur production a pratiquement disparu en 2014. Les écrans à cristaux liquides (LCD) deviennent largement majoritaires, avec un basculement progressif entre 2010 et 2014 des éclairages par tubes fluorescents (CCFL) vers les éclairages par LED. Les écrans plasma (PDP) voient leur part de marché diminuer, et la technologie OLED se développe surtout pour les écrans de petite taille (téléphones portables).

Une autre part conséquente de la demande en Terres Rares pour la production de luminophores depuis le début des années 2000 est le marché des ampoules fluo-compactes, aussi dénommées « ampoules basse consommation ». Le principe de fonctionnement de ces ampoules est présenté en figure 18, il est le même pour les tubes fluorescents, dits « néons ».

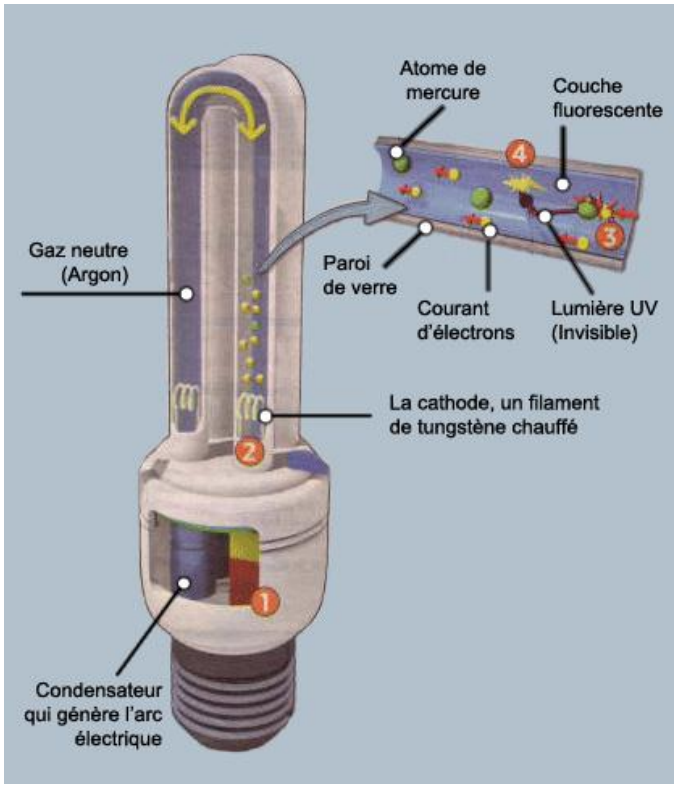


Figure 18 - Composition et fonctionnement d'une ampoule fluo-compacte.

Au moment où l'interrupteur est actionné, l'arc électrique créé provoque l'échauffement du filament de tungstène, ce qui émet des électrons. Ceux-ci, excités, se propagent et entrent en collision avec les atomes de vapeur de mercure, les excitant à leur tour. Lors de la désexcitation spontanée des atomes de mercure, des rayonnements ultraviolets (UV) sont émis et viennent percuter la paroi du verre recouverte de luminophores, composant la « couche fluorescente » indiquée sur la figure18 ci-dessus. Ces luminophores à base de Terres Rares ont la propriété d'absorber les rayonnements UV et de ré-émettre une radiation lumineuse dans le domaine du visible.

Il existe une certaine variété de luminophores utilisés dans le revêtement des ampoules fluo-compactes. Les principaux sont les suivants (Tab.10) :

Luminophore	Acronyme	Formule
Bleu	BAM	$BaMgAl_{10}O_{17} : Eu^{2+}$
		$Sr_5 (PO_4)_3 Cl :Eu^{2+}$
Vert	CAT	$(Ce,Tb)MgAl_{11}O_{19}$
	CBT	$(GdMg)B_5O_{10}:Ce^{3+},Tb^{3+}$
Rouge	LAP	$LaPO_4:Ce^{3+},Tb^{3+}$
	YOX	$Y_2O_3:Eu^{3+}$

Tableau 10 - Principaux composés luminophores utilisés dans les ampoules fluo-compactes.

C'est la superposition de ces différentes couleurs qui donne la lumière blanche émise par l'ampoule. Le rôle du gaz rare (argon) est d'éviter la détérioration du filament et d'améliorer sa durée de vie. En moyenne, la composition massique du revêtement luminophore des ampoules fluo-compactes serait de : 69,2 % d'oxyde d'yttrium, 11 % d'oxyde de cérium, 8,5 % d'oxyde de lanthane, 4,9 % d'oxyde d'europium et 4,6 % d'oxyde de terbium (Vignes, 2011).

Ces ampoules fluo-compactes, qui ont remplacé progressivement les ampoules à incandescence à filament de tungstène au cours des deux dernières décennies, sont à leur tour appelées à être progressivement substituées par les éclairages à diodes électroluminescentes (ou LED, pour Light-Emitting Diode) dans de nombreuses applications commerciales et domestiques, au fur et à mesure de la baisse de coût de ces dernières. En effet, les ampoules à LED ont une meilleure efficacité (moindre consommation d'énergie pour un flux lumineux donné) et une moindre toxicité (absence de mercure). Certaines LED blanches utilisent également des luminophores à base de Terres Rares (fig. 19), mais en quantité moindre que les ampoules fluo-compactes. La part de marché des LED pour les ampoules d'éclairage devient de plus en plus importante et deviendra probablement majoritaire dans les prochaines années[41].

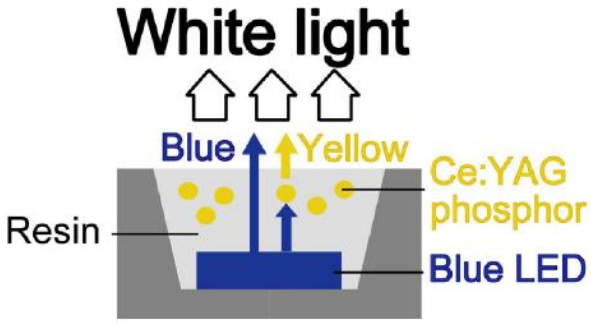


Figure 19 - Dispositif de production de lumière blanche à partir d'une LED bleue.

Les principales Terres Rares utilisées pour la production de luminophores sont l'yttrium (70 à 80 % du total), l'europium (6 à 8 %), le terbium (1 à 3 %), le gadolinium (1 à 2 %), les autres éléments se partageant le solde (Roskill, 2011). À moyen terme, les perspectives d'évolution de la consommation de Terres Rares pour la production de luminophores sont attendues à la baisse en raison de la conquête de parts de marché par les LED peu ou moins consommatrices de Terres Rares.

Les propriétés luminescentes des Terres Rares sont également utilisées pour la production d'encres spéciales, dont la composition précise est tenue secrète, pour la protection des billets de banque, notamment l'Euro, contre la contrefaçon (cf. 3.2.6)

3.1.9. Les Lasers

Les lasers ont été mis au point à partir de 1960 et des applications ont commencé à en être développées à partir du milieu des années1960 et au cours des années 1970. Mais les applications à échelle industrielle (découpe, micro-usinage, etc.), pour la défense (guidage) puis grand public (lecture de CDs, de codes barre, etc.) se sont développées à la fin des années 1970 et dans les années 1980. Les lasers sont désormais largement diversifiés et ont de nombreuses applications, dans les domaines militaires (communication, guidage de missiles), en médecine de précision (dentisterie, dermatologie, ophtalmologie), dans la recherche sur la fusion nucléaire, dans les réseaux de communication longue distance (fibres optiques), dans la découpe industrielle (joaillerie et coupe de haute précision de certains matériaux), dans l'équipement informatique et loisirs multimédias (stockage et lecture de données sur CD, DVD, Blu-ray etc.) et le spectacle.

[41] Une présentation de Frost & Sullivan (2015, http://fr.slideshare.net/FrostandSullivan/2015-to-thepoint-trend-7-led-lighting) estime cette part de marché à 50% en 2015 et la prédit à 84% en 2020, sans toutefois préciser les contours du marché considéré (États-Unis ? OCDE ? Monde ?). Ces estimations mériteraient d'être mieux précisées.

Il existe des lasers à gaz, à liquides, à verres et à cristaux. Les tout premiers cristaux utilisés étaient du rubis (corindon dopé au chrome). Nombre de lasers à cristaux sont désormais à base de grenats artificiels, en particulier le YAG (Yttrium-Aluminium Garnet, $Y_3Al_5O_{12}$) dopés avec d'autres éléments, et en particulier des Terres Rares, ces éléments dopants pouvant déterminer la longueur d'onde et donc la couleur émise.

Parmi les principaux cristaux lasers, on pourra citer sont :

- YAG:Nd dopé au néodyme ;
- YAG:Ho dopé à l'holmium ;
- YAG:Er dopé à l'erbium.

On utilise aussi des YIG (Yttrium Iron Garnet), des GGG (Gadolinium Gallium Garnet), etc.

Les lasers à verre utilisent aussi généralement un dopant de terre rare (Nd, etc.).

Les quantités de Terres Rares nécessitées pour le marché des Lasers sont toutefois marginales par rapport aux quantités demandées des autres applications.

3.1.10. Autres applications

Domaine médical

Plusieurs Terres Rares sont utilisées en faibles quantités dans le domaine médical. Le gadolinium est en particulier utilisé en imagerie IRM (cf. 3.2.7). Certains isotopes radioactifs d'autres éléments des Terres Rares, obtenus artificiellement en laboratoire, sont utilisés pour le traitement de certains cancers, et notamment Sm, Er, Yb et Y (cf. 3.2.5 à 3.2.15).

Énergie nucléaire

Le samarium, l'europium, le gadolinium et le dysprosium sont des absorbeurs de neutrons et sont ainsi utilisés, en faible quantité, dans des barres de contrôle des réacteurs nucléaires.

Pierre à briquet

Historiquement, le mischmétal (un mélange de cérium (50 à 65 %), de lanthane (20 à 35 %) avec éventuellement un peu de Nd, Pr et Sm, cf. 3.1.6) entrait dans la composition des pierres à briquet sous forme de ferrocérium (alliage composé à 30 % de fer et 70 % de mischmétal, lui-même composé de cérium majoritaire). Aujourd'hui, la part de cet usage s'est nettement réduite au profit de briquets piézoélectriques.

3.1.11. Domaine de la défense

Les diverses applications des Terres Rares citées plus haut (aimants haute performance, optique, lasers, etc.) se déclinent notamment dans le domaine de la défense, et en particulier pour les dispositifs suivants

- les systèmes de guidage lasers de munitions, et les missiles de croisière ;
- la détection des mines sous-marines ;
- les systèmes de communication ;
- les mécanismes de commande en aviation ;
- les systèmes de radars et sonars ;

- les lunettes de vision nocturne (infrarouge) ;
- les moteurs électriques des missiles ;
- etc.

3.2. USAGES PAR ELEMENTS

Les divers usages des différents éléments des Terres Rares étaient résumés dans le tableau 5. Leurs parts relatives sont illustrées par un ensemble de diagrammes en figures 20 et 21.

Ces usages sont repris dans les sections 3.2.1 à 3.2.15 qui font suite.

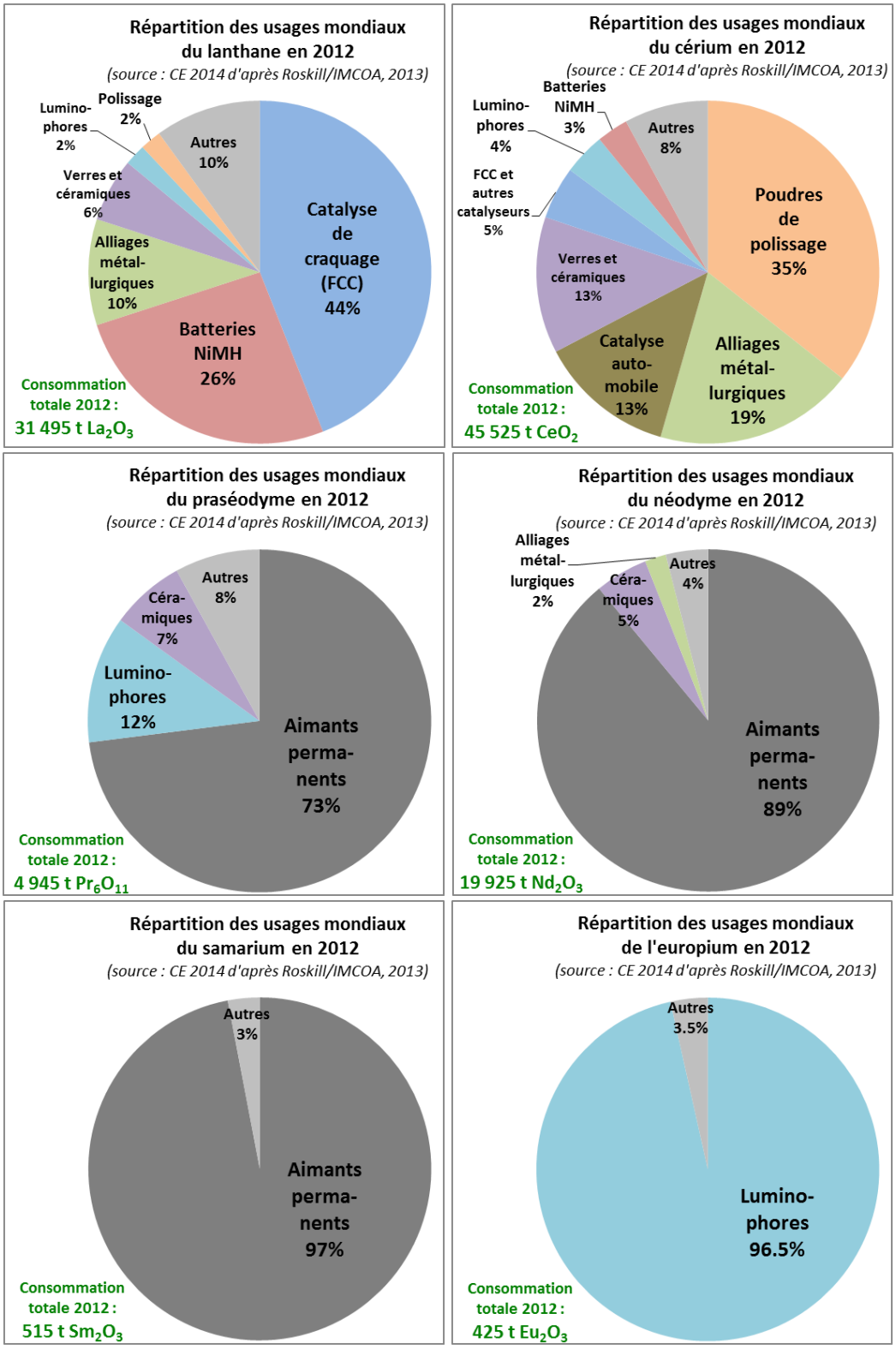


Figure 20 - Répartition des usages de La, Ce, Pr, Nd et Eu en 2012.

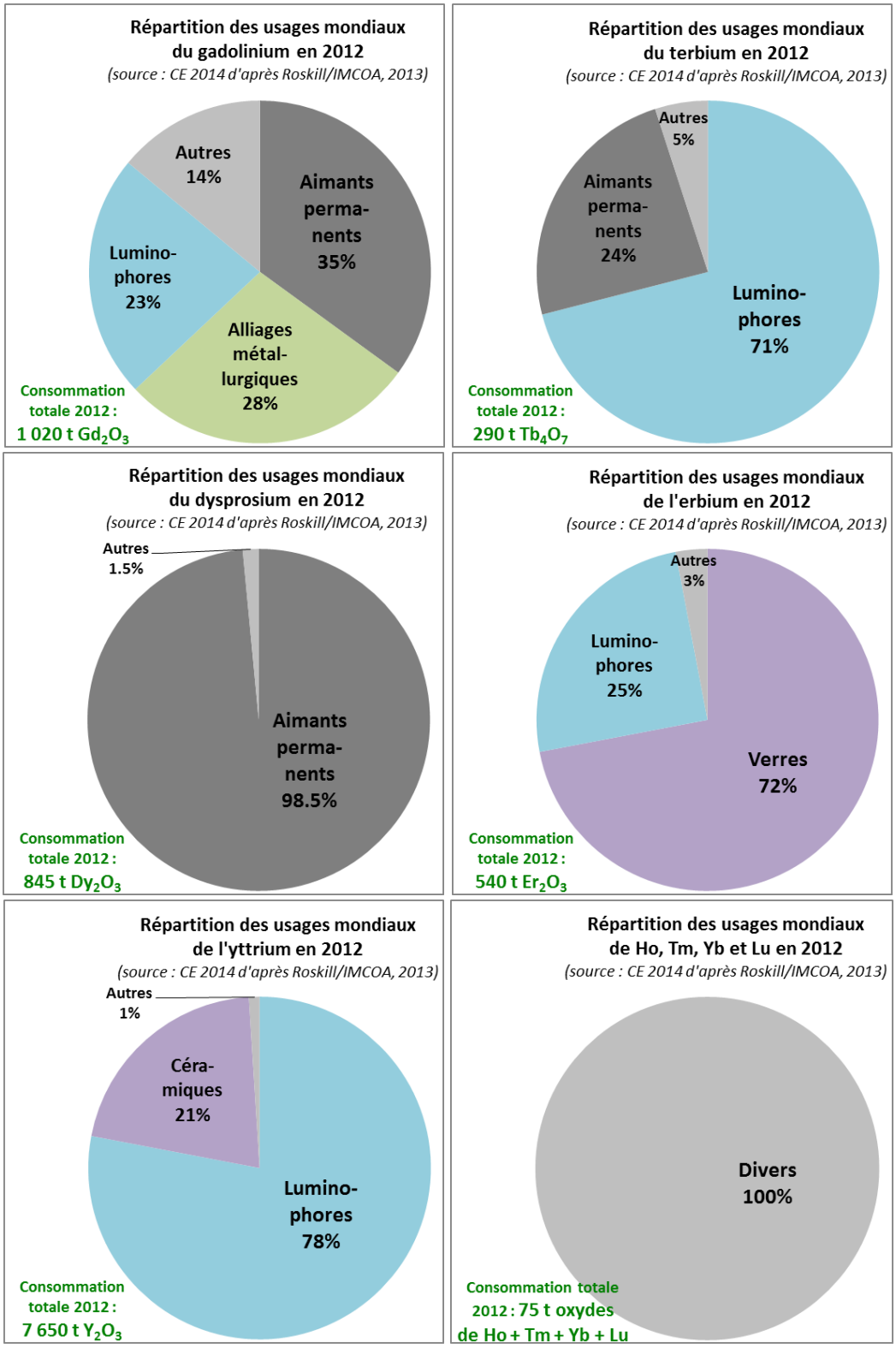


Figure 21 - Répartition des usages de Gd, Tb, Dy, Er, Y et Ho-Tm-Yb-Lu en 2012.

3.2.1. Usages du lanthane

Le lanthane est la deuxième Terre Rare la plus abondante. Dans les gisements connus, le lanthane représente en moyenne près d'un quart des Terres Rares totales (cf. tab.5). C'est aussi, avec le cérium, l'une des Terres Rares dont le prix est aujourd'hui le plus bas (cf. 5.2). Ses utilisations sont récapitulées en figure 20.

La consommation totale de lanthane est estimée à 31 500 t d'oxyde pour l'année 2012, pour les usages suivants :

- catalyse de craquage des pétroles lourds en lit fluide (FCC) : 44 % (cf. 3.3.1) ;
- batteries NiMH : 36 % (cf. 3.1.5) ;
- autres alliages métallurgiques (principalement sous forme de mischmétal) : 10 % (cf. 3.1.6) ;
- verres et céramiques : 6 % (cf 3.1.7) ;
- luminophores : 2 % (cf.3.1.8) ;
- poudres de polissage (sous forme d'oxyde de mischmétal : 2 % (cf. 3.1.2)
- autres 10 %.

Parmi ces autres usages, on pourra citer :

- dopant dans certains cristaux pour lasers ;
- composé fluorescent étudié pour des marquages antifraude (phosphate de lanthane $LaPO_4$) ;
- allié au tungstène, sous forme de baguettes cylindriques, comme électrode émissive pour les torches de soudage TiG ou les torches de soudage plasma. L'alliage tungstène-oxyde de lanthane permet d'accroître l'intensité admissible, de faciliter l'amorçage de l'arc et de limiter la dégradation de l'électrode lors du soudage ;
- cathodes pour la microscopie électronique ;
- détecteurs de neutrons et de rayons gamma ;
- quelques essais pilotes de traitement de l'eutrophisation lacustre ;
- usage médical : le médicament Fosrenol, commercialisé par la compagnie pharmaceutique Shire sous forme de comprimés à croquer, indiqué dans le contrôle de l'hyperphosphorémie chez les patients souffrant d'insuffisance rénale chronique, intègre du carbonate de lanthane $La_2(CO_3)_3$ comme chélateur du phosphate. Il en existe une version vétérinaire (Renalzin Bayer) ;
- des nanofils en manganate de plomb-lanthane $La_{(1-x)}Pb_xMnO_3$ font l'objet de recherche et développement dans le domaine des semi-conducteurs.

Globalement, la demande en lanthane est attendue avec une croissance de l'ordre de 5,5 % par an d'ici 2020, selon l'Ad-Hoc Working Group de la Commission Européenne sur les Matières Premières Critiques (AHWG-CE, 2014) citant Roskill, IMCOA et TMR, soit un taux de croissance équivalent à la prévision de croissance du PIB mondial par le FMI.

3.2.2. Usages du cérium

Le cérium est la Terre Rare la plus abondante, représentant en moyenne 40 à 50 % des Terres Rares totales contenues dans les gisements (cf. tab.5). Une de ses propriétés

remarquables est l'existence du degré d'oxydation IV : l'ion Ce^{4+} est un oxydant, stable en solution aqueuse. Il forme avec l'ion Ce^{3+} un couple oxydo-réducteur intervenant dans de nombreux usages.

L'abondance relative du cérium et son prix peu élevé expliquent la diversité de ses applications (fig. 20). Comme le lanthane, cette abondance le place en situation excédentaire sur les marchés. En effet, la demande mondiale en Terres Rares est surtout tirée par d'autres Terres Rares comme le néodyme et le dysprosium pour la production d'aimants permanents. Le cérium est ainsi une production fatale au moins deux fois supérieure à celle du néodyme, d'où une production pouvant être supérieure à la demande, et donc des prix déprimés (cf. 5.2).

La consommation de cérium est estimée à 45 525 t d'oxyde sur l'année 2012. Ses usages prédominants au niveau mondial son :

- 36 % pour les poudres de polissage (cf. 3.1.2) ;
- 19 % pour les alliages métallurgiques (cf. 3.1.6) ;
- 13 % pour la catalyse automobile (cf. 3.1.4). Le cérium peut également être utilisé comme additif dans des carburants diesel[42] ;
- 13 % pour les industrie des verres et céramiques (cf 3.1.7) ;
- 5 % avec le lanthane comme catalyseur de craquage d'hydrocarbures (FCC) et d'autres catalyseurs (cf. 3.1.3) ;
- 4 % pour les luminophores (cf. 3.1.8) ;
- 3 % avec le lanthane dans les batteries NiMH (cf. 3.1.5) ;
- 8 % pour divers autres usages.

Parmi ces autres usages, des produits à base de chlorure de cérium (ou de mischmétal à cérium dominant) mis au point et commercialisés par Molycorp sous les noms SorbX et PhosFix sont utilisés pour le traitement de l'eau et en particulier sa déphosphatation pour limiter le développement d'algues. Ce marché pourrait se développer à l'avenir (cf. 3.3.2).

L'oxyde de cérium est utilisé dans le revêtement des fours domestiques autonettoyants.

3.2.3. Usages du praséodyme

Le praséodyme représente en moyenne 4,6 % des Terres Rares totales dans les gisements. En conséquence, les quantités d'oxydes de praséodyme sur le marché sont 6 à 9 fois plus faibles que pour le lanthane ou le cérium, avec 4 945 t mises sur le marché en 2012 (cf. tab.5).

Les principales utilisations du praséodyme sont (fig.20) :

- fabrication d'aimants permanents : 73 %. Comme évoqué au chapitre 3.1.1, du praséodyme peut être intégré aux aimants Nd-Fe-B en substitution partielle du néodyme, sans en réduire les performances magnétiques. Il peut également être utilisé en substitution partielle du samarium dans la production des aimants SmCo ;
- luminophores : 12 % (cf. 3.1.8) ;

[42] L'ajout au carburant diesel d'un additif (50 g/t) organo-soluble contenant 6 % de cérium permet d'améliorer la combustion des composés polyaromatiques condensés émis par les moteurs diesel et ainsi de diminuer la pollution et la fumée noire émise (Vignes, SCF, 2011).

- coloration des céramiques : 7 %. Les pigments à base de zircon dopé au praséodyme, donnent un jaune vif éclatant, également employés pour colorer les verres et plastiques. Parmi les autres utilisations, on peut citer en optique la fabrication des verres de protection solaire et les lunettes des soudeurs et des souffleurs de verre, qui privilégient l'oxyde de praséodyme pour ses propriétés d'absorption des rayons UV ;
- autres : 11 %. En particulier, en tant que composant du mischmétal et à l'instar d'autres Terres Rares légères, le praséodyme peut être utilisé en petites quantités dans les alliages métallurgiques (4% de la consommation) et comme composant de catalyseur.

3.2.4. Usages du néodyme

Le néodyme est la troisième Terre Rare la plus abondante dans les gisements, dont il constitue entre 15 % et 20 % du total (cf. tab 5). La consommation mondiale en 2012 est évaluée à près de 19 900 t d'oxyde de néodyme. Cet élément est primordial dans la fabrication des aimants permanents au fer-néodyme-bore (Nd-Fe-B, cf. 3.1.1), les plus performants actuellement, ce qui en fait l'une des Terres Rares pour laquelle l'approvisionnement sera particulièrement crucial dans les années à venir.

En 2012, les utilisations se répartissaient comme suit (cf. fig. 20) :

- aimants permanents Nd-Fe-B (cf. 3.1.1) : 89 % ;
- céramiques (comme pigment violet et comme dopant dans la composition isolante de certains condensateurs) : 5 % ;
- alliages métallurgiques : le mischmétal peut contenir de 0 à 15 % de néodyme. Des alliages magnésium-néodyme font l'objet de travaux de recherche et développement ;
- autres usages (dont poudres de polissage, luminophores, lasers, etc.) : 4 %. Le néodyme sert notamment de dopant aux cristaux Nd:YAG des lasers utilisés pour la coupe et la soudure des matériaux et métaux relativement fins. Dans l'industrie chimique, le néodyme est utilisé dans la catalyse du polybutadiène qui sert de base à des caoutchoucs synthétiques utilisés pour des pneumatiques[43].

3.2.5. Usages du samarium

Le samarium représente en moyenne environ 2,2 % des Terres Rares dans leurs gisements (cf. tab.5). Environ 500 t d'oxyde de samarium ont été consommées en 2012.

La fabrication des aimants permanents Sm-Co représente 97 % des usages du samarium (cf. 3.1.1). Les 3 % restants concernent des applications de pointe en optique et en médecine.

En optique, l'oxyde de samarium est utilisé pour doper des cristaux de fluorure de calcium dans la production de lasers optiques, et pour ses fortes propriétés d'absorption des infrarouges dans la composition de certains verres.

En médecine, l'isotope radioactif artificiel ^{153}Sm est utilisé en radiothérapie symptomatique, principalement pour le traitement des métastases osseuses. Le complexe ^{153}Sm-lexidronam de pentasodium ($C_6H_{12}N_2Na_5O_{12}P_4{}^{153}Sm$), injecté par perfusion intraveineuse, se fixe préférentiellement dans les régions où le cancer a envahi les os. Le radio-isotope libère des électrons β^-, qui tuent les cellules cancéreuses et soulagent rapidement la douleur. On

[43] Le chimiste allemand Lanxess AG vient de construire une usine de Nd-PBR (Néodymium Polybutadiene Rubber) à Singapour, d'une capacité de 140 kt/an, qui devrait entrer en production en 2015.

l'utilise aussi dans les cancers du poumon, de la prostate et du sein. Cet isotope, d'une durée de vie de 46 heures, n'existe pas dans la nature. Il est produit par bombardement neutronique de l'isotope stable ^{152}Sm.

Dans l'industrie nucléaire, l'isotope ^{149}Sm est un produit de fission stable qui, par la capture de neutrons, joue le rôle de « poison nucléaire », réduisant la réactivité d'un réacteur thermique. Cette réaction est qualifiée « d'empoisonnement samarium » et est utilisée pour le contrôle des réacteurs nucléaires.

3.2.6. Usages de l'europium

L'europium est, selon les auteurs et les sociétés minières, classé comme Terre Rare légère, Terre Rare lourde, ou Terre Rare intermédiaire (cf. 2.7).

Malgré son abondance très faible, en moyenne 0,3 % des Terres Rares totales des gisements, il fut un des moteurs du développement de l'industrie des Terres Rares dans les années 1970, en raison d'une forte croissance de la demande en téléviseurs couleur. Il était en effet utilisé en association avec l'yttrium pour la production des luminophores rouges des écrans à tubes cathodiques (cf. 3.1.8). Les Terres Rares étaient alors extraites essentiellement du gisement de Mountain Pass, en Californie, et les États-Unis dominaient à l'époque cette industrie.

Les poudres luminophores à europium restent marginalement utilisées pour la production résiduelle de tubes cathodiques, désormais largement remplacés par des écrans plats. Mais elles sont surtout utilisées pour les systèmes d'éclairage domestiques, publics ou commerciaux (néons mais aussi ampoules fluo-compactes, qui se sont largement répandues dans les années 2000) (cf. 3.1.8).

La consommation mondiale d'europium est estimée à 425 t d'oxyde en 2012, dont 96 % destinés à la production de luminophores

En fonction des substances auxquelles il est associé, l'europium permet d'obtenir toute une gamme de couleurs, allant du rouge au bleu. En dopage du vanadate d'yttrium (YVO_4) il donne des luminophores rouges. Avec l'aluminate de strontium $SrAl_2O_4$, il donne un bleu (490 nm), un bleu-vert persistant (505 nm) et un vert brillant (520 nm). Le thiogallate de strontium ($SrGa_2S_4$) dopé par l'europium donne une luminescence verte persistant plusieurs secondes.

Les autres applications de l'europium, qui comptent pour 4 % de sa consommation, comprennent :

- les lasers (dopage de certains cristaux) ;
- l'industrie nucléaire, comme capteur de neutrons dans les barres de contrôle des réacteurs ;
- la protection anti-fraude des billets de banque en Euros, utilisant un marquage avec une encre spéciale contenant entre autres de l'europium (fluorescence rouge aux ultraviolets, fig. 22) ;

Figure 22 - Fluorescence rouge des complexe à Eu^{3+} verte des complexes Tb3+ et bleue (fibres) des complexes Tm3+ dans un billet de banque en Euros.
(© H. Grobe dans Wikimedia Commons
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:050euro-uv.jpg#/media/File:050euro-uv.jpg)

- la recherche médicale en histologie : un marquage à l'europium permet le suivi de complexes biochimiques dans des tissus vivants.

3.2.7. Usages du gadolinium

Le gadolinium, avec ses 7 électrons célibataires de la sous-couche 4f, présente le plus fort spin du tableau périodique, en particulier sous sa forme de cation Gd^{3+}, d'où en particulier ses usages en imagerie médicale par résonnance magnétique. Le gadolinium métal est ferromagnétique, avec une température de Curie[44] de 20 °C. Il a un effet magnétocalorique, il s'échauffe lorsqu'il est soumis à un champ magnétique et se refroidit lorsque ce champ cesse, d'où des recherches et développement en réfrigération magnétique.

Le gadolinium est relativement peu abondant dans les gisements (1,4 % du total des Terres Rares). Sa consommation mondiale se situe aux alentours de 1 000 t d'oxyde, avec une relative diversité d'usages (cf. fig. 21) :

- 35 % comme additif dans les aimants permanents NdFeB et SmCo. En effet, s'il n'est pas l'élément principal de la constitution de ces derniers, le gadolinium permet, par ses propriétés magnétiques particulières, d'améliorer la rémanence et de renforcer la résistance à la corrosion des aimants permanents ;
- 28 % dans les alliages métallurgiques. L'ajout d'1 % de gadolinium à l'acier ou au chrome (et alliages connexes) facilite leur mise en forme (façonnage), et augmente leur résistance à l'oxydation et à la corrosion ;
- 23 % pour la production de luminophores de couleur verte (sous forme de sels de gadolinium). Ces luminophores sont utilisés notamment dans les écrans de téléviseurs et d'ordinateurs. Un des meilleurs composés pour la fabrication des écrans à rayons X est l'oxysulfure de gadolinium dopé au terbium ($GdO_2S:Tb^{3+}$) ;
- 14 % d'autres usages, parmi lesquels :
  - en optique, les grenats gadolinium-gallium ($Gd_3Ga_5O_{12}$ ou GGG), dopés au néodyme, à l'ytterbium ou au dysprosium servent à fabriquer certains types de lasers, notamment

[44] Température au-delà de laquelle le matériau perd son ferromagnétisme.

à rayons X. Le GGG est également utilisé en joaillerie comme alternative au diamant, et peut avoir des applications dans le domaine des micro-ondes,

- dans l'industrie nucléaire, l'oxyde de gadolinium est employé dans les barres de commande des réacteurs nucléaires pour contrôler le processus de fission, grâce à sa forte capacité d'absorption des neutrons (isotopes ^{155}Gd et ^{157}Gd),
- en médecine, le gadolinium est utilisé comme agent de contraste dans la technique d'imagerie par résonance magnétique (IRM). Il est injecté dans l'organisme du patient sous une forme associée avec un chélateur ou un ligand, (cf. encadré ci-dessous),

Usage du gadolinium comme agent de contraste pour l'Imagerie médicale par Résonnance Magnétique (IRM)

Grâce à ses sept électrons célibataires en sous-couche 4f, le gadolinium a un caractère paramagnétique très élevé (10,8 magnétons de Bohr, contre 5,6 pour le fer). Le gadolinium présent dans l'eau accélère les vitesses de relaxation des protons après leur stimulation par un champ magnétique. La technique IRM utilise précisément cette propriété des protons de l'organisme, en particulier ceux de l'eau, d'émettre des signaux lorsqu'ils retournent à leur état d'équilibre après avoir été stimulés par un champ magnétique. C'est donc en accélérant ce temps de relaxation que le gadolinium permet d'améliorer le contraste des images obtenues, et de mettre en évidence des lésions des tissus, notamment certaines tumeurs.

L'ion Gd^{3+}, toxique isolément, est emprisonné dans des complexes organiques de synthèse en masquant les effets chimiquement toxiques mais en laissant libre les effets des électrons célibataires 4f. Les complexes utilisés doivent être solubles dans l'eau. Ils sont injectés par voie intraveineuse. Ce sont par exemple le gadopentétate de méglumine, le gadotérate de méglumine, le gadotéridol ou le gadodiamide (fig.23).

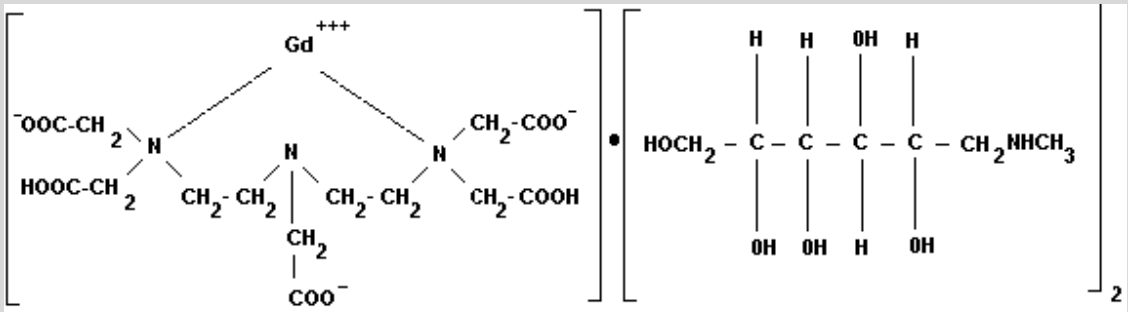


Figure 23 - Formule développée du gadopentétate de diméglumine commercialisé par Bayer sous le nom de Magnevist™
(Source : www.bayer.ca/files/MAGNEVIST-PM-FR-7FEB2014-170935.pdf)

Leur première application avait été la mise en évidence par IRM de la rupture de la barrière hémato-encéphalique. Ils sont maintenant aussi utilisés pour: le diagnostic des tumeurs cérébrales, des tumeurs de la moelle épinière, des os, des parties molles, du foie.

Quelques effets indésirables ont pu être signalés lors de l'utilisation des dérivés du gadolinium : réactions allergiques, nausées, vomissements et exceptionnellement chocs anaphylactiques et crises convulsives.

- en réfrigération magnétique, le gadolinium a été l'un des premiers matériaux magnétocaloriques utilisés par les travaux de recherche et développement. Les recherches s'étendent toutefois à d'autres alliages magnétocaloriques plus efficaces,

comme LaFeSi, MnFeP, GdSiGe[45]. Diverses sociétés commencent à en développer des applications commerciales, comme le français Cooltech Applications[46], mais aussi l'américain General Electric[47] et nombre d'autres sociétés européennes, chinoises et japonaises. Cooltech Application commence à proposer des équipements de refroidissement commerciaux. Ce marché en est à son tout début et pourrait être appelé à se développer,

- des études de recherches et développement se poursuivent sur divers composés du gadolinium, comme par exemple le triéthyl-sulfate de gadolinium [$Gd^{3+}(C_2H_5SO_4^-)_3$], pour des applications variées.

3.2.8. Usages du terbium

Le terbium est l'une des Terres Rares les moins abondantes, avec 0,2 % en moyenne dans les gisements, mais elle est aussi des plus recherchées. Parmi les Terres Rares critiques, c'est celle dont le tonnage produit est le plus faible. 290 t d'oxyde en ont été consommées en 2012, réparties par usage comme suit (cf. fig. 21) :

- luminophores (cf. 3.1.8) : 71 %. L'oxyde de terbium permet d'obtenir la couleur verte ou jaune des néons et des ampoules fluo-compactes. Il constitue de l'ordre de 4 % de la composition des poudres luminophores utilisées en éclairage ;
- aimants permanents : 24 %. L'ajout de terbium dans la composition des aimants permanents Nd-Fe-B, à l'instar du dysprosium (cf. 3.2.9), permet d'élever la température de Curie de ces aimants. Cette caractéristique améliore considérablement les performances des aimants à hautes températures (200°C), rendant possible les applications au sein des moteurs automobiles ou des turbines des éoliennes. Le dysprosium est toutefois souvent préféré en raison de son moindre prix (cf. 5.2) ;
- autres usages : 5 %. Le plus important est son ajout dans certains alliages métallurgiques où, comme d'autres Terres Rares, il peut améliorer la qualité et la résistance du matériau final. L'alliage TbFeCo est utilisé pour des supports d'enregistrement magnéto-optique. Le Terfenol D, de composition $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9}$, est l'alliage ayant la plus forte magnétostriction[48] à température ambiante connue. Ses applications comprennent les injecteurs de carburant liquide de haute précision et les transducteurs électroacoustiques des sonars (développés par l'armée américaine dans les années 1950). Enfin, avec le dioxyde de zirconium (zircone), il est utilisé en tant que stabilisateur de cellules pour pile à haute température. Le terbium est également utilisé dans la fabrication d'encres spéciales pour la protection des billets de banque (cf. 3.2.6 et fig.22).

3.2.9. Usages du dysprosium

Le dysprosium a une abondance moyenne de 0,9 % des Terres Rares totales contenues dans les gisements (cf. tab 5), et représentait un marché de 845 t d'oxyde consommées en 2012.

---

[45] L'effet magnétocalorique d'un métal ou alliage est d'autant plus important qu'on est proche de sa température de Curie. Ainsi pour obtenir des refroidissements importants il peut être nécessaires d'utiliser une série de matériaux à températures de Curie échelonnées.

[46] Cf. www.cooltech-applications.com.

[47] Cf. www.ge.com/research/live/magnetic_refrigeration.

[48] Propriété de certains matériaux ferromagnétiques à se déformer sous l'effet d'un champ magnétique.

C'est l'une des Terres Rares pour laquelle la tension sur l'approvisionnement pourrait s'accroître dans les années à venir, en raison de son rôle dans les aimants permanents Nd-Fe-B, et les perspectives de croissance de ce marché (cf. 3.3.2).

Cet usage compte pour 98 % de ses utilisations. Ajouté à hauteur de 2 à 11 % de la masse des aimants Nd-Fe-B, le dysprosium en augmente la température de Curie, tout comme le terbium (cf. 3.2.8 ci-dessus). Ces aimants sont aujourd'hui les plus performants du marché pour des applications à hautes températures.

Des recherches intenses ont été et sont toujours menées pour limiter ou abandonner l'utilisation de dysprosium dans cet usage, en raison de sa disponibilité aléatoire et de son prix élevé (cf. 3.4). Si leurs résultats conduisent à des mises en œuvre à l'échelle industrielle, ils seront de nature à réduire significativement la demande en dysprosium.

Parmi les 2 % d'autres usages, on pourra citer :

- les alliages métallurgiques, où le dysprosium permet le renforcement de la résistance des alliages, notamment les alliages de magnésium utilisés en aéronautique. Le dysprosium entre aussi, avec le terbium (cf. 3.2.8 ci-dessus) dans la composition de l'alliage Terfenol D ($Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9}$) ;
- les lampes à vapeur d'halogénures de métaux. Celles-ci contiennent des halogénures de Terres Rares (dysprosium, holmium et thulium). Ces métaux sont déterminants dans le spectre de lumière émise par la lampe, le niveau de rendu des couleurs et l'efficacité lumineuse ;
- quelques utilisations ponctuelles dans le contrôle des réactions nucléaires (barres de contrôle), la protection contre les rayons X, comme dopant de cristaux lasers, et comme agent de contraste en imagerie médicale.

3.2.10. Usages de l'holmium

L'holmium a une abondance moyenne d'environ 0,2 % des Terres Rares au sein des gisements (cf. tab. 5). Du fait de sa rareté, et par conséquent de son prix élevé, ses applications industrielles sont très limitées. Il n'y a pas de publication de chiffres précis de consommation mondiale pour cet élément. Elle est de l'ordre de quelques tonnes à quelques dizaines de tonnes d'oxyde.

L'holmium a quelques usages de niche :

- la composition des lasers YAG : le grenat yttrium-aluminium peut être dopé à l'holmium pour fournir une lumière infrarouge à 2100 nm. Les applications sont principalement médicales (dermatologie) ;
- la coloration du verre : l'oxyde d'holmium donne au verre une couleur rose spécifique pouvant être recherchée dans certaines applications décoratives notamment ;
- les lampes à vapeurs d'halogénures de métaux (cf. 3.2.9) ;
- la composition d'aimants très puissants ou au sein de concentrateurs de flux magnétiques particulièrement forts, car l'holmium possède un moment magnétique parmi les plus élevés connus (10,6 magnétons de Bohr).

3.2.11. Usages de l'erbium

L'erbium est une terre rare très peu abondante, comptant pour environ 0,2 % des Terres Rares totales en moyenne dans les gisements (cf. tab. 5). Sa consommation mondiale s'élève à 540 t d'oxyde en 2012.

En termes quantitatifs, les usages les plus importants sont :

- 72 % pour l'industrie des verres et fibres optiques. La bande d'absorption très réduite de l'ion Er^{3+} donne lieu à deux applications distinctes : la coloration (rose vif) et l'amplification de signaux lumineux (amplificateurs EDFA[49], Lasers) ;
- 25 % pour la production de luminophores, où l'erbium intervient principalement comme dopant avec d'autres Terres Rares (yttrium, gadolinium) ;
- 3 % d'autres usages dont les alliages métallurgiques (l'erbium facilite l'usinage du vanadium en réduisant sa dureté), les lasers YAG dopés à l'erbium, utilisés en particulier en chirurgie, les barres de contrôle des réacteurs nucléaires.

La coloration du verre en rose vif par des sels d'erbium est sans équivalent en termes de stabilité. Ces colorants sont aussi utilisés pour les émaux pour porcelaine, ainsi que dans certains verres de protection solaire et de filtres photographiques, permettant de rehausser la qualité des photos prises en ambiance nuageuse.

Les amplificateurs optiques dopées à l'erbium (fig.24), ou EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) sont devenus un élément standard des réseaux de télécommunication par fibre optique longue distance. Ils permettent en effet de transmettre l'information sur de très longues distances, en amplifiant un signal lumineux sans avoir besoin de le convertir en signal électrique.[50] L'erbium émet par désexcitation de la lumière à 1,55 µm, correspondant exactement au spectre de meilleure transparence de la silice, longueur d'onde favorisée pour la transmission de signaux par fibre optique.

L'amplification fait intervenir la technique du "pompage optique[51]". Dans les boîtiers amplificateurs, le segment de fibre optique est dopé aux ions Er^{3+}. Une onde lumineuse d'une longueur d'onde spécifique (980 nm ou 1480 nm) est envoyée (diode laser), elle excite les ions erbium qui vont restituer une énergie photonique amplifiant le signal lumineux. De tels boîtiers peuvent être disposés environ tous les 80 km, distance à laquelle le signal lumineux s'atténue et doit être renforcé jusqu'au boitier suivant.

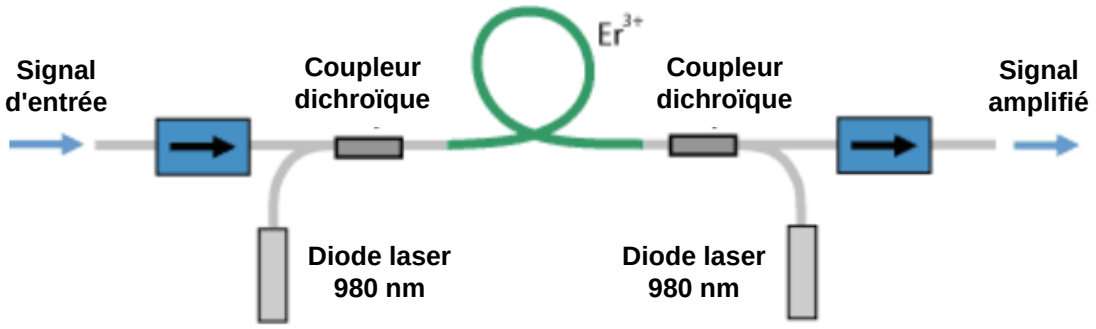


Figure 24 - Schéma simplifié d'un amplificateur optique à l'erbium (© www.rp-photonics.com/erbium_doped_fiber_amplifiers.html).

Les lasers YAG dopés à l'erbium sont principalement employés en chirurgie dermatologique, cosmétique et en dentisterie, ce qui constitue un marché réduit où l'excellence prévaut sur le prix. L'un des principaux avantages de ces lasers est de pénétrer peu profondément dans les

[49] Erbium-Doped Fiber Amplifiers, en français "Amplificateurs optiques dopés à l'erbium."

[50] Pour plus d'informations : http://www.rp-photonics.com/erbium_doped_fiber_amplifiers.html

[51] La technique du pompage optique permet de modifier les états des atomes à l'aide d'une irradiation lumineuse polarisée. La lumière polarisée joue le rôle d'une "pompe" à atomes dans l'échelle des niveaux d'énergie, car elle permet de faire passer des atomes d'un niveau de basse énergie à un niveau de haute énergie.

tissus. Ceci est rendu possible grâce au rayonnement généré grâce à l'erbium, à la longueur d'onde de 2 940 nm, et qui permet une très forte absorption par l'eau des tissus de l'organisme (phénomène de photo-vaporisation). En conséquence, l'énergie produite par le laser est directement absorbée à la surface irradiée. En dentisterie, ces lasers permettent de traiter aussi bien les tissus mous (gencive, langue) que les tissus durs (émail, os) de la cavité buccale, remplaçant avantageusement la fraise dentaire dans de nombreux cas. On peut aussi noter qu'il y a moins de risques de carbonisation des tissus et une cicatrisation tissulaire plus rapide que les lasers CO_2. Ce laser apporte améliore aussi le confort des patients (absence d'anesthésie, moindres douleurs).

3.2.12. Usages du thulium

Les usages du thulium sont limités en raison de sa rareté (0,4 % des Terres Rares totales en moyenne) et de son prix élevé.

Il intervient :

- comme dopant dans des fibres lasers et certains luminophores, sous forme d'oxyde (Tm_2O_3). Ainsi, le sulfure de zinc dopé avec de l'oxyde de thulium peut produire la phosphorescence verte des tubes cathodiques (Vignes, 2011) ;
- comme composant ajouté dans certaines ferrites ou céramiques magnétiques pour en améliorer les performances ;
- pour la protection anti-fraude de billets de banque en Euros (fluorescence bleue aux ultraviolets, cf. fig.22) ;
- l'isotope ^{170}Tm, obtenu par bombardement de neutrons sur l'isotope stable ^{169}Tm, est utilisé comme source de rayonnement gamma dans des appareils radiographiques portables.

3.2.13. Usages de l'ytterbium

L'ytterbium est l'une des Terres Rares les moins abondantes, avec 0,1 % des Terres Rares totales en moyenne dans les gisements. Ses usages sont très limités :

- dopant de certains cristaux lasers YAG, mais aussi Yb:KYW (cristaux de tungstate de potassium yttrium dopés à l'ytterbium) et Yb:KGW (cristaux de tungstate de potassium gadolinium, dopé à l'ytterbium). Ces cristaux laser émettent dans le proche infrarouge (1020-1060 nm) et sont utilisés pour générer des impulsions haute puissance ultracourtes. Ils disposent de sections d'absorption plus large que les cristaux Nd:YAG, ce qui réduit l'intensité de la pompe optique nécessaire pour assurer la transparence dans le système. Ils peuvent également être intégrés dans des disques lasers minces de haute puissance et comme pompe à diode laser ;
- en métallurgie, l'ytterbium peut permettre d'augmenter les propriétés mécaniques de l'acier inoxydable, comme la résistance et la taille des grains ;
- en mesure sismique, dans les jauges de contraintes pour le contrôle des mouvements du sol et du sous-sol. En effet, lorsqu'il est soumis à de fortes contraintes, la résistance électrique de l'ytterbium augmente très fortement. Cette propriété est utilisée pour mesurer et contrôler les effets de déformations locales (séismes, explosions nucléaires) ;
- en radiographie industrielle, l'isotope ^{169}Yb, produit par bombardement de l'isotope stable^{168}Yb, avec une demi-vie de 32 jours, a pu être utilisé ponctuellement comme source de rayonnement pour des appareils radiographiques portables, en l'absence d'électricité. Son spectre d'émission gamma permet de réaliser des clichés de très bonne

qualité, voisins de clichés obtenus avec un tube à rayons X. Il a également été proposé dans le traitement du cancer de la prostate.

Enfin, le National Institute of Standards and Technology (NIST) étatsunien a développé l'horloge atomique la plus stable et précise du monde (précision <2 x 10^{-18}), à base d'ytterbium, selon un communiqué du 22/08/2012[52].

3.2.14. Usages du lutétium

Étant l'une des Terres Rares les moins abondantes des gisements (0,1 %), le lutétium n'a qu'un petit nombre d'applications :

- en médecine, l'oxyorthosilicate de lutétium (LSO) dopé au cérium est utilisé comme détecteur pour la tomographie par émission de positron (Positron Emission Tomograghy, ou PET) ;
- l'isotope ^{177}Lu, obtenu par activation neutronique de ^{176}Lu et ayant une demi-vie de 6,7 jours, est un émetteur de rayonnement β^-, utilisé en médecine nucléaire pour le traitement de certaines tumeurs neuro-endocrines ;
- en optique, le lutétium sert à doper les Grenats de Gadolinium-Gallium (GGG) et des lentilles très réfringentes (Grenat Lutétium-Aluminium : $Al_5Lu_3O_{12}$), ainsi que comme matériau luminescent intensifiant les rayons-X (tantalate de lutétium, $LuTaO_4$) ;
- enfin, le lutétium peut être utilisé dans certaines catalyses (craquage d'hydrocarbures et la polymérisation, l'hydrogénation et l'alkylation).

3.2.15. Usages de l'yttrium

En terme de tonnage, le marché de l'yttrium est le quatrième le plus important des Terres Rares après ceux du cérium, du lanthane, et du néodyme, avec 7 650 t d'oxyde d'yttrium consommées à travers le monde en 2012. Son abondance relative est d'environ 4,9 % des Terres Rares en moyenne dans les gisements (cf. tab. 5).

La répartition de ses usages est la suivante :

- luminophores : 78 %. L'yttrium est la Terre Rare la plus employée à cette fin, totalisant 70 à 80 % des Terres Rares destinées à la production de luminophores, d'après Roskill (2011), et 69 % en masse dans le revêtement des lampes fluo-compactes d'après Vignes (2011). Les composés d'yttrium peuvent être dopés par différents cations de lanthanides. Dopés à l'europium, l'orthovanadate d'yttrium ($YVO_4:Eu^{3+}$) ou l'oxysulfure d'yttrium ($Y_2O_2S:Eu^{3+}$) sont les luminophores produisant la couleur rouge dans les téléviseurs à tube cathodique ou les lampes à vapeur de mercure à haute pression (éclairage public). Dopés par du cérium, les cristaux de YAG:Ce sont quant à eux utilisés pour la production de luminophores jaunes, destinés à la fabrication de LED blanches ;
- céramiques : 21 %. L'yttrium y est utilisé pour plusieurs fonctions :
  - la coloration : l'ajout d'1 % d'oxyde d'yttrium dans certains pigments permet de colorer les céramiques en orange et représente une part de marché non négligeable,
  - la résistance aux chocs et la réduction du coefficient de dilatation thermique. Une des applications est la fabrication des creusets en céramique dopés à l'yttrium utilisés pour la fusion de métaux réactifs. Une autre est l'oxyde de zirconium stabilisé à l'yttrium,

[52] cf. www.nist.gov/pml/div688/clock-082213.cfm

servant dans les isolants thermiques des surfaces soumises à de très hautes températures en aérospatiale.

- autres usages : 1 %, dans les domaines de l'optique, la catalyse, la métallurgie et la médecine.

En optique, l'yttrium associé au fer et à l'aluminium intervient dans la production d'une grande variété de grenats synthétiques. L'oxyde d'yttrium est en effet utilisé pour produire des **YIG** (grenats de fer et d'yttrium) qui sont des filtres micro-ondes très efficaces, également très performants en tant que transmetteurs d'énergie acoustique et comme transducteurs. Ils sont utilisés dans la communication satellites et pour des applications de défense. Les grenats d'aluminium et d'yttrium ($Y_3Al_5O_{12}$ ou **YAG**), dopés notamment par le néodyme, l'erbium ou l'ytterbium, émettent principalement dans le proche infra-rouge et sont utilisés pour la conception de lasers de très hautes puissances, dont les usages vont de la joaillerie à la découpe de métaux. Les grenats d'yttrium, fer, aluminium et gadolinium (par exemple. $Y_3(Fe,Al)_5O_{12}$ et $Y_3(Fe,Ga)_5O_{12}$) possèdent également des propriétés magnétiques importantes.

En catalyse, l'yttrium intervient dans les sondes à oxygène associés aux catalyseurs automobiles mesurant la teneur en dioxygène des gaz émis par les moteurs à explosion. Ces sondes sont composées de zircones plus ou moins dopées en oxyde d'yttrium (de 1 à 10 %) et ont pour but d'ajuster la teneur en dioxygène afin d'assurer la combustion efficace du monoxyde de carbone et des hydrocarbures imbrûlés dans les pots catalytiques (cf 3.1.3). La stabilisation de la zircone par les ions d'yttrium trivalents à la place d'ions tétravalents entraîne la création de lacunes en oxygène, conférant au matériau une conductibilité ionique qui varie avec la pression partielle en dioxygène (Vignes, 2011).

Des composés de l'yttrium sont aussi utilisés comme catalyseur pour la polymérisation de l'éthylène, dans les électrodes de certaines bougies d'allumage à hautes performances et dans la fabrication de manchons à incandescence pour les lampes au propane, en remplacement du thorium radioactif. L'oxyde d'yttrium est également utilisé comme additif de frittage pour la production de nitrure de silicium poreux[53].

En métallurgie, l'ajout d'yttrium à des alliages facilite généralement leur mise en forme, réduit la recristallisation à haute température et augmente de manière significative la résistance à l'oxydation à hautes températures. Ainsi, l'yttrium métal est employé pour améliorer la tenue aux chocs thermiques des aciers pour pipeline. De petites quantités d'yttrium (0,1 à 0,2 %) sont aussi utilisées pour réduire la taille des grains du chrome, du molybdène, du titane et du zirconium, et il permet d'améliorer les propriétés mécaniques d'alliages d'aluminium et de magnésium. Enfin, il intervient pour désoxyder le vanadium et d'autres métaux non ferreux.

En médecine, l'isotope radioactif artificiel ^{90}Y est un émetteur $ß^-$ utilisé dans le traitement de plusieurs cancers dont les lymphomes, les leucémies, les cancers des ovaires, du pancréas, des os, et le cancer colorectal. Il agit en se fixant aux anticorps monoclonaux, qui à leur tour se lient aux cellules cancéreuses et les détruisent du fait des émissions β^-. Mais cet isotope n'est pas d'origine minière, il se produit par la désintégration β^- du strontium-90 (^{90}Sr), qui est lui-même l'un des produits de fission de l'uranium des réacteurs nucléaires et est extrait du retraitement de ces produits.

[53] Brevet US n°5935888, "*Porous silicon nitride with rodlike grains oriented*", 1999-08-10, Agency Ind Science Techn (JP)et Fine Ceramics Research Ass

3.3. CONSOMMATION

3.3.1. Évolution récente de la consommation globale

S'il y a bien des évaluations des consommations récentes par éléments (2012, cf. tab. 5, p.51), les données historiques sur plusieurs années sont très parcellaires. Il existe cependant des données plus ou moins fiables sur la consommation globale de Terres Rares.

En complément aux informations déjà fournies dans le tableau 5, la figure 25 ci-dessous illustre la répartition de la consommation globale par ensemble géographique en 2012.

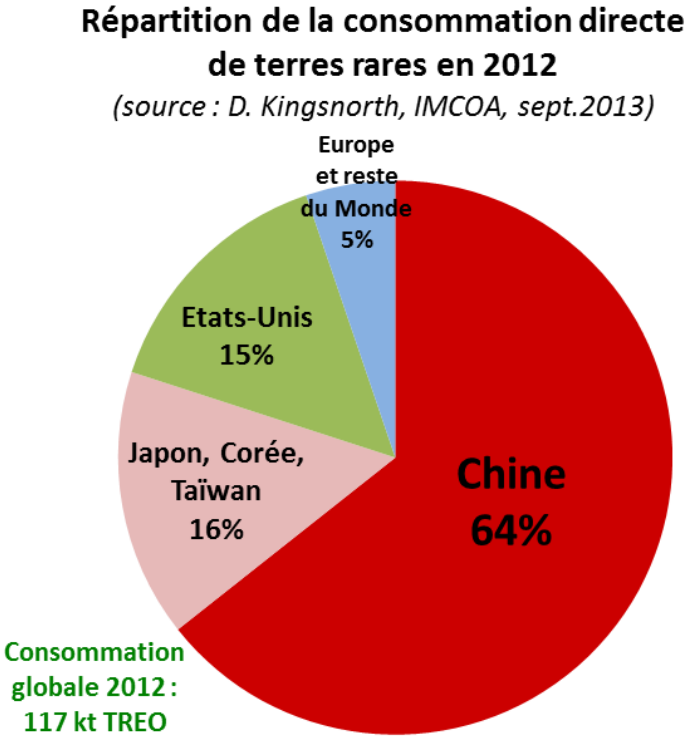


Figure 25 - Répartition de la consommation directe de Terres Rares par ensemble géographique.

Cette répartition n'est pas indicative de la répartition de la consommation finale des produits contenant des Terres Rares. La Chine, le Japon et l'Asie du nord-est concentrent par exemple l'essentiel de la production des aimants permanents, mais ceux-ci sont ensuite exportés dans le Monde entier soit séparément, soit à l'intérieur de produits finis. Cette répartition est davantage une illustration de la position de la Chine comme « usine du Monde ».

La dépendance de l'Union Européenne et des économies occidentales par rapport à l'Asie est double, tant comme source de Terres Rares brutes que de semi-produits. La faiblesse de la production directe de Terres Rares et de semi-produits dérivés en Europe est une mesure indirecte de sa désindustrialisation au profit de l'Asie. Cette évolution sera difficile à inverser à court terme, les investissements industriels allant là où les perspectives de rentabilité sont les meilleures, et la Chine a beaucoup à offrir à ce niveau : maîtrise des chaînes d'approvisionnement, main d'œuvre de mieux en mieux formée, recherche dynamique, amélioration rapide des infrastructures, etc.

La figure 26 donne une illustration de l'évolution récente de la consommation de Terres Rares prises dans leur globalité, ainsi qu'une indication de la croissance de cette consommation telle qu'anticipée par l'analyste spécialisé Dudley Kingsnorth (IMCOA) dans

sa présentation de juin 2014, de l'ordre de 7,1% par an. Cette figure présente aussi, à titre indicatif, les niveaux de l'offre selon le même auteur pour comparaison.

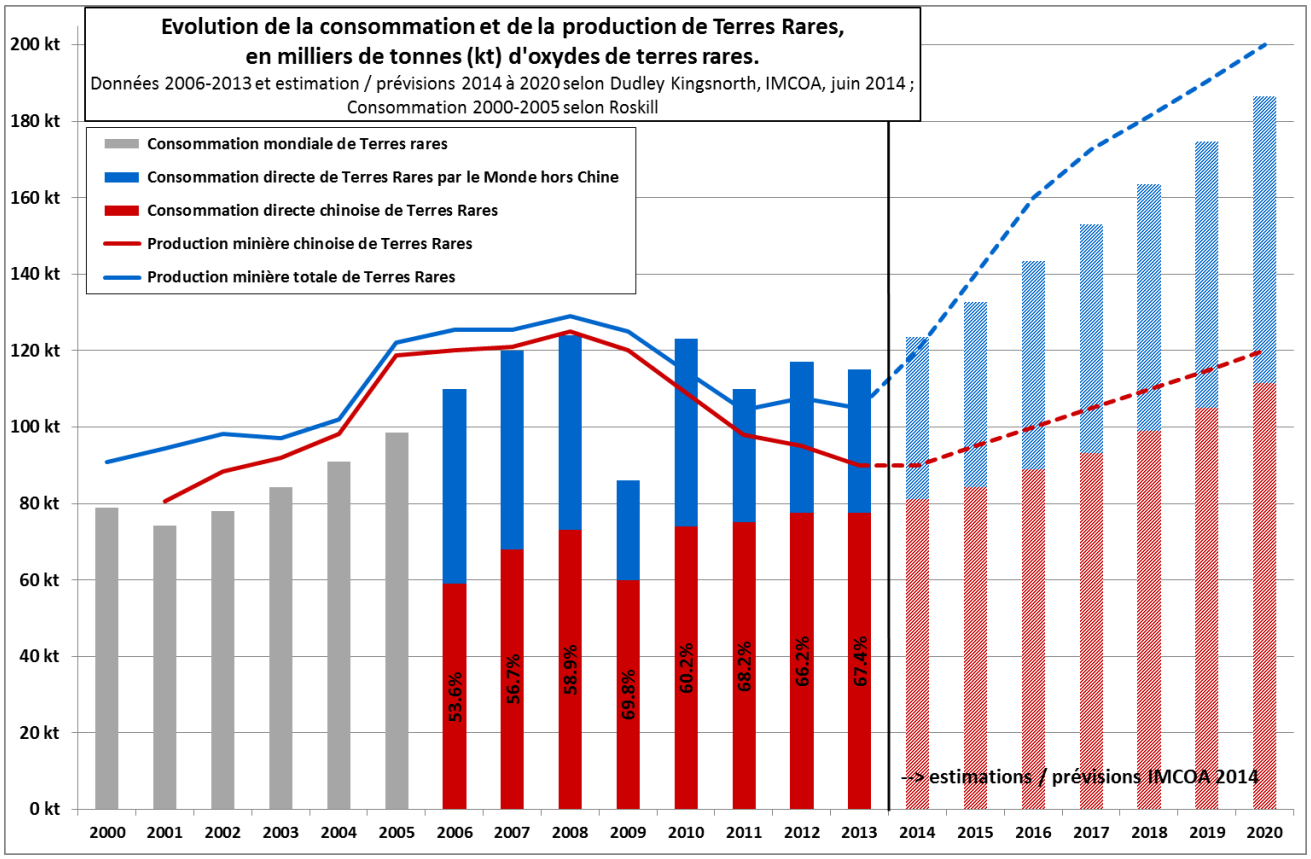


Figure 26 - Évolution récente de la consommation mondiale de Terres Rares et prévisions d'évolution selon D. Kingsnorth, IMCOA, juin 2014.

Les données sur les consommations doivent être prises et interprétées avec précaution. Les fourchettes d'incertitudes dépassent probablement les 15 %. Les prévisions d'évolution pour les prochaines années sont encore plus incertaines et pourront dépendre de nombreux facteurs comme la conjoncture économique globale, l'état de la croissance économique en Chine, les évolutions technologiques et les ajustements et substitutions en fonction des prix.

L'environnement général de l'industrie des Terres Rares est rapidement évolutif et les prévisions, même lorsqu'elles viennent des meilleurs experts, sont très aléatoires.

<u>Remarque :</u> Les indications de production de la figure 26 doivent être encore davantage prises avec grande circonspection. Le diagramme est élaboré à partir des chiffres publiés par Dudley Kingsnorth en juin 2014. Ils diffèrent notablement des chiffres publiés par d'autres auteurs, et en particulier Roskill, 2015. Les données de D. Kingsnorth indiquaient un déficit de 2010 à 2014. La chute continue des prix en 2012-2013 (cf. chap.5) tend plutôt à indiquer une situation d'excédent, ce que mentionne Roskill (2015), en ajoutant en particulier à la production chinoise une estimation de sa production illégale. Voir détails en 4.3.1, 4.3.3, Tableau 19 et fig.42.

La demande globale en Terres Rares a augmenté significativement à partir du milieu de la décennie 1990, et surtout entre 2000 et 2008 (+5,8 % par an en moyenne), sous l'effet conjugué du développement des aimants permanents Fe-Nd-B et des ampoules fluo-compactes, et du développement rapide de la production chinoise puis de son industrie de transformation, dans le sillage de la très forte croissance économique de la Chine dans la décennie 2000. La demande chinoise en Terres Rares est ainsi passée de 21 % de la

demande mondiale en 2000 à 50 % en 2005 et 66-68 % en 2011-2013 (Kingsnorth, 2013). Dans la même période, la Chine a consolidé sa place de premier producteur mondial de Terres Rares, après l'arrêt de la production américaine en 2002, reprise seulement en 2012, puis à nouveau arrêtée mi-2015 (cf. 4.3.1).

Cette position dominante a incité le gouvernement chinois à mettre en place dès 2005 une politique de quotas à l'exportation des Terres Rares extraites de Chine. Alors que la demande mondiale était tirée par des prix relativement bas et le développement rapide de nouvelles technologies utilisant ces métaux, la diminution progressive de ces quotas à destination des utilisateurs étrangers à partir de 2007 a provoqué une tension sur l'offre mondiale en Terres Rares hors Chine.

La crise financière de 2008-2009 avait fragilisé les fondamentaux des marchés et ralenti la croissance des industries les plus consommatrices de Terres Rares (hautes technologies, automobile, énergies renouvelables) et avait fait chuter en 2009 la demande mondiale en ces métaux (ainsi qu'en la quasi-totalité des autres matières premières minérales). La reprise économique et de la consommation de matières premières en 2010 s'est combinée avec le resserrage des quotas à l'exportation de la part de la Chine. Entre 2009 et 2010, ces quotas ont été réduits d'environ 40 %, passant de près de 50 000 à 30 000 tonnes d'oxydes de Terres Rares disponibles aux utilisateurs étrangers (cf. 4.6.1). Ceci a conduit à une envolée des prix fulgurante en 2010-2011 (cf. chapitre 5) et une prise de conscience internationale du risque d'approvisionnement pesant sur ces matières premières. Elle a également entrainé une baisse relative de la consommation de Terres Rares en 2011 (110 000 t d'OTR).

La consommation de Terres Rares a ainsi chuté en 2009, puis après une brève reprise, s'est à nouveau affaiblie en 2011. Ce n'est qu'en 2014 que, après l'explosion de la bulle spéculative des prix des Terres Rares et le retour à des prix dictés par le marché physique, la demande est revenue à un niveau équivalent à celui de 2008, frôlant à nouveau les 124 000 t d'oxydes de Terres Rares (IMCOA).

Parmi les facteurs ayant contribué à limiter la demande ces dernières années, la réduction de 15 % de l'usage des oxydes de mischmétal par les industriels japonais, notamment dans le secteur des poudres de polissage, mérite d'être citée. En effet, avant l'envolée des prix des Terres Rares de 2010-2011, le prix du mischmétal était si bas qu'il était utilisé sans économie d'usage. Avec la hausse des prix, une optimisation de la consommation de mischmétal s'est rapidement mise en place notamment grâce à une réutilisation plus importante et un meilleur taux de recyclage des poudres abrasives à base de Terres Rares par des compagnies comme Asahi Glass. Cette pratique s'est depuis répandue, et contribue aujourd'hui à une demande plus faible dans ce secteur.

La récupération et le recyclage des chutes de fabrication des aimants ont aussi été optimisés (cf. 4.5).

Enfin, compte tenu des prix très élevés de 2010-2011, nombre d'industriels sont revenus à des aimants permanents plus classiques, moins performants mais plus abordables (jeu de l'équilibre coûts / bénéfices), et des recherches ont progressé pour diminuer les quantités de Terres Rares nécessaires à performances égales (en particulier pour diminuer la quantité de dysprosium nécessaire dans les aimants permanents les plus performants).

3.3.2. Perspectives d'évolution de la demande

Les analystes spécialisés anticipent plutôt une hausse globale de la demande en Terres Rares dans les prochaines années, tirée par une reprise progressive de l'économie mondiale et par la pénétration croissante sur le marché, à l'échelle mondiale, de produits manufacturés contenant des Terres Rares.

Le FMI prévoyait en octobre 2014 une croissance du PIB mondial d'environ 5,5 % par an entre 2014 et 2020 (www.imf.org, World Economic Outlook Database, octobre 2014), ramenée à 3,6 à 3,7 % pour 2014 à 2015 et 2015 à 2016 dans sa mise à jour de janvier 2015.

Les analystes des marchés des Terres Rares anticipent des croissance de la consommation de ces éléments comprises entre 3 et 10 % par an selon les familles d'usages et selon les éléments, donc à des taux de croissance soit à peu près équivalents à la croissance économique globale, soit un peu au-dessus pour des applications appelées à se développer, et en particulier les aimants permanents. Certains anticipent cependant une baisse de la demande dans le secteur particulier des luminophores.

Il convient toutefois de remarquer, comme le souligne A. Rollat (2015), que les prévisions d'évolution de la demande faites en 2010 pour 2014, faites pourtant par des experts reconnus, se sont révélées largement erronées[54], Trop de facteurs, prévisibles ou non (décisions sur l'offre affectant les prix donc la demande, évolutions technologiques, etc.), ont affecté le marché, et de nouveaux paramètres pourraient à leur tour affecter de manière similaire les anticipations actuelles pour l'horizon 2020.

Roskill anticipait, en 2014, une croissance globale de la demande en Terres Rares de 5 à 6 % par an d'ici 2020, variables selon les éléments, dont la demande est pilotée par des usages bien différents. Il anticipait en particulier une croissance de la demande en néodyme de 9 % par an d'ici 2020 (Roskill, 2014).

Pour BCC Research (www.bccresearch.com), la demande globale en Terres Rares devrait croître de 6,2 % par an entre 2014 et 2019.

De son côté, l'IMCOA anticipait les évolutions présentées par marché dans le tableau 11 ci-après (Kingsnorth, juin 2014) :

Comparées à d'autres sources, les prévisions de croissance de D. Kingsnorth semblent relativement optimistes et représentent probablement plutôt le haut de la fourchette des possibles. En mai 2014, Solvay (/Rhodia) présentait une prévision de croissance de la demande globale en Terres Rares de 5 % par an d'ici 2018, principalement tirée par les aimants permanents à + 7 % par an, avec une croissance nettement plus faible des luminophores, d'à peine 2 % par an (Rollat, 2014[55]). En avril 2015, Solvay (/Rhodia) présente une prévision ramenée à 3 à 4 % de croissance pour la demande globale en Terres Rares d'ici 2020, avec toujours 7 % de croissance pour le secteur des aimants mais une éventuelle baisse pour les luminophores (Rollat, 2015[56]).

[54] Dans ses présentations en congrès de 2010, D. Kingsnorth annonçait une demande de 170 à 190 kt d'oxydes de Terres Rares en 2014. Dans une présentation de septembre 2013, sa prévision pour 2014 était de 136 kt. Dans une présentation de juin 2014, elle était de 123.5 kt. En janvier 2015, l'USGS estimait la consommation de 2014 à 117 kt.

[55] cf. www.fondationecologiedavenir.org/Colloque_Terres_Rares/Rollat.pdf

[56] cf. www.mineralinfo.fr/actualites/conference-cloture-projet-anr-aster-relatif-aux-flux-stocks-terres-rares-en-europe

Application	Estimation du TCAM 2014-2017 selon IMCOA, juin 2014	**Commentaire**, traduit de Dudley Kingsnorth (IMCOA / Curtin University), juin 2014
Catalyseurs	+ 4 à 6 % /an	Baisse de la demande en 2013 (-5%). Croissance ferme de 4 à 6% par an pour 2014-2017, éventuel-lement encore plus élevée avec l'amélioration de la disponibiité et la basse des prix de La et Ce.
Verre	+ 4 à 6 % /an	Croissance minimale en 2013. Comme davantage de Ce deviendra disponible, croissance envisagée à 4 à 6% par an.
Polissage	+ 5 à 10 % /an	Très forte hausse en 2010-2011 pour les besoins de polissages des écrans tactiles. Les prix très élevés de 2011 ont réduit la demande en 2012-2013. Croissance attendue à 5 à 10%/an d'ici 2017 grâce au bas prix du Ce.
Alliages métallurgiques et batteries NiMH	+ 6 à 10 % /an	Croissance minimale en 2013 avec la réduction des stocks. Suite aux problèmes de Boeing avec les batteries Li-ion, croissance prévue à au moins 6 à 10% par an.
Aimants permanents	+ 8 à 12 % /an	Croissance modeste en 2013. Croissance prévue à 8 à 12%/an d'ici 2017. Elle pourrait être supérieure si les terres rares utilisées devenaient disponibles en plus grande quantité et de manière fiable sur le long terme à des prix raisonnables. De nouveaux procédés permettant la récupération économique de Nd, Pr et Dy des chutes de fabrication, qui ont ainsi ajouté 30 à 50 kt d'OTR aux disponibilités et aidé à la croissance bien que l'offre primaire ne suffise pas à satisfaire la demande.
Luminophores et pigments	+ 0 à 3 % /an	Les nouveaux équipements d'éclairage et d'affichage (écrans) utilisent significativement moins de Terres Rares, ce qui conduit à une contraction de ce marché. Les pigments pour les plastiques, les textiles et les cosmétiques sont potentiellement un secteur de forte croissance. La croissance globale est attendue à 0 à 3%, mais le marché pourrait même se contracter si la tendance actuelle se poursuit.
Céramiques	+ 4 à 6 % /an	Croissance soutenue au taux historiques de 4 à 6% par an.
Autres	+ 6 à 10 % /an	L'utilisation du cérium pour la purification de l'eau fait partie des applications à forte croissance potentielle à long terme. D'autres nouvelles applications pourraient inclure la réfrigération magnétique au gadolinium.
Global	+ 6 à 9 % /an	Après une demande stagnante en 2013, L'IMCOA et l'Université de Curtin prévoient un taux de croissance "modeste [sic*]" de 6 à 9% par an pour la période 2014-2017, marquant une reprise tandis que les sources d'approvisionnement alternatives à la Chine arrivent en production. Cependant, si la Chine restreint son offre en Terres Rares lourdes, ce taux de croissance pourrait être resserré.

Tableau 11 - Prévisions de croissance de la demande en Terres Rares par secteur d'application, selon D. Kingsnorth (IMCOA / Curtin Universtity, juin 2014).

Le Rapport sur les Matières Premières critiques du Groupe de Travail ad-hoc de la Commission Européenne, publié en mai 2014, contient les estimations suivantes de prévisions de croissance annuelle, en ordres de grandeur d'ici 2020, en citant les sources Roskill, IMCOA (Dudley Kingsnorth) et Technological Metals Research (TMR) : La : + 5,5 %/an ; Ce : +6 %/an ; Pr : +6 %/an ; Nd : +7 %/an ; Sm : +10 %/an ; Eu : +8 %/an ; Gd : +9 %/an ; Tb : +8 %/an ; Dy : +9 %/an ; Er : +6%/an ; Y : +8 %/an ; Autres (Ho, Tm, Yb, Lu) : + 8 %/an. Ces prévisions sont récapitulées en fig. 27.

Ce rapport estime la demande en oxyde de néodyme (Nd_2O_3) à 34 kt environ en 2020. Le rapport du PIPAME[57] de mars 2013 envisageait une demande en oxyde de néodyme de 40 kt (estimation basse) à 54 kt (estimation haute) en 2020. Les écarts des prévisionnistes sont donc très importants.

[57] Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques. Rapport téléchargeable sur www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/prospective/automobile/pdfinal-metaux-strategiques.pdf

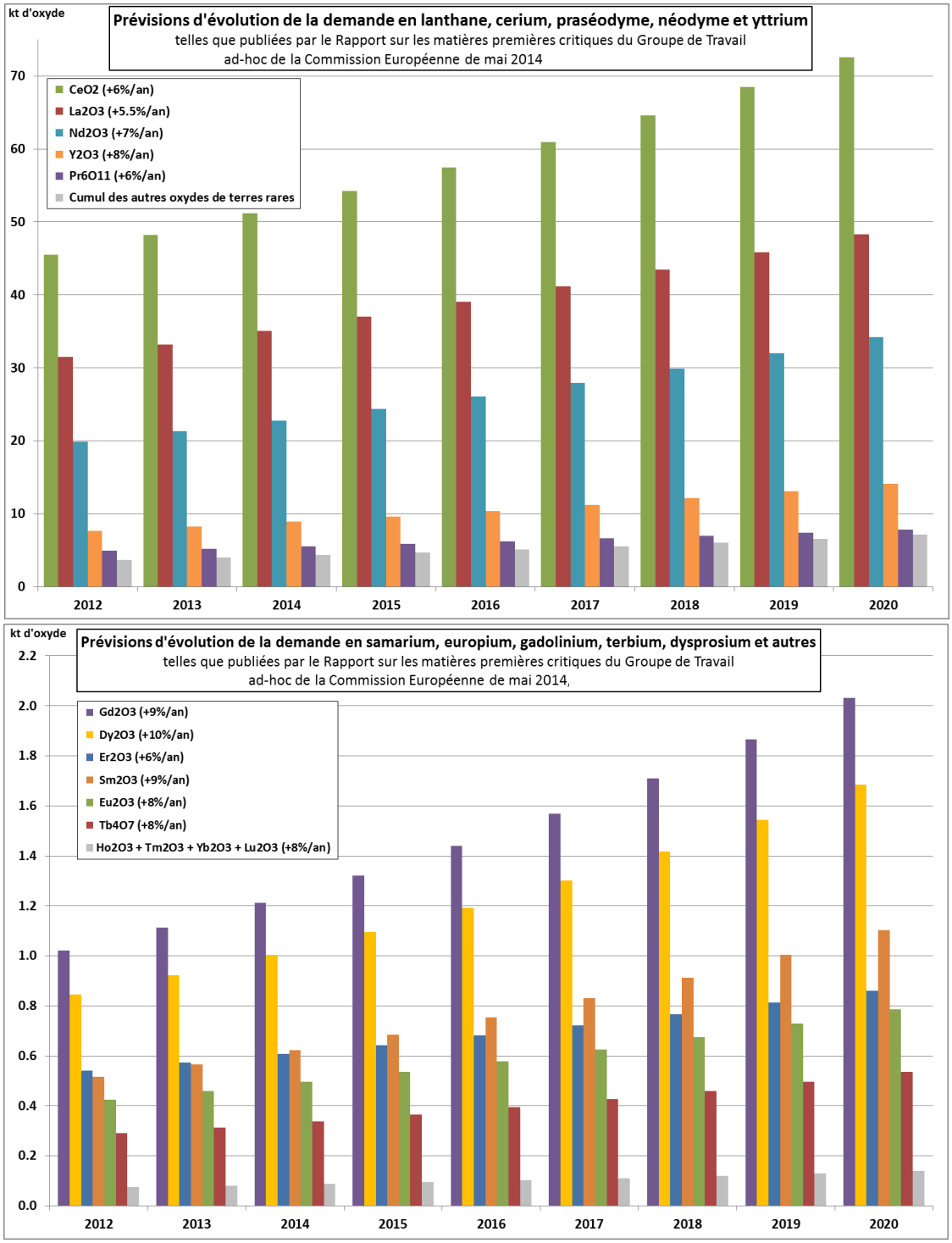


Figure 27 - Prévisions d'évolution de la demande en Terres Rares selon le Rapport sur les Matières Premières critiques du Groupe de Travail ad-hoc de la Commission Européenne (mai 2014), citant Roskill, IMCOA et TMR. En haut, éléments dont la consommation excède 4,9 kt d'oxyde par an (La, Ce, Pr, Nd et Y) ; En bas : éléments dont la consommation est inférieure à 2,1 kt d'oxyde par an.

Les hausses mentionnées plus haut seront aussi tributaires d'un maintien des prix à un niveau modéré. De trop fortes flambées de prix comme celle connue en 2011 (cf. chap.5) conduiront les fabricants à revenir vers des technologies moins performantes mais plus abordables.

Le secteur attendu avec la plus forte de croissance de la demande, de 7 % à 10 % par an selon les auteurs d'ici 2018-2020, est celui des aimants permanents, avec le développement de la demande en énergies renouvelables et en particulier des parcs d'éoliennes off-shore, et l'augmentation continue de la demande en biens de consommation électriques et électroniques en tous genres, secteurs dans lesquels les aimants à Terres Rares offrent les meilleures performances. Cette hausse attendue de la demande concernera en priorité Nd, Pr, Dy et accessoirement Tb et éventuellement Sm.

À l'inverse, la demande en Terres Rares pourrait stagner, voire même décroitre dans les secteurs suivants :

- dans les poudres de polissage, du fait de la réduction des quantités de Terres Rares (principalement du cérium et accessoirement du lanthane au sein du mischmétal) utilisées grâce à une meilleure efficience, et de la réutilisation croissante et efficace de ces poudres. Cette faiblesse anticipée de la demande pourrait néanmoins être inversée par la croissance de la production d'appareils électroniques à polir (écrans en tous genres) et par la surproduction chronique de cérium (comme production fatale à celles d'autres Terres Rares plus critiques) et donc un prix redevenu très faible ;
- dans les poudres luminophores. Leur emploi initial, et en particulier celui de l'europium, pour les tubes cathodiques couleur (téléviseurs, moniteurs), à partir des années 1970, a pratiquement disparu, avec le remplacement progressif, entre 2004 et 2008, des écrans cathodiques par des écrans plats, moins consommateurs de produits luminophores. Puis leur emploi plus récent, depuis une quinzaine d'années, dans les ampoules fluo-compactes qui ont progressivement pris des parts de marché aux anciennes ampoules à incandescence, est à son tour affecté par l'arrivée des ampoules à LED, encore minoritaires mais appelées à accroitre leur part de marché.

Dans les autres secteurs, les prix bas du lanthane et du cérium devraient favoriser leurs utilisations dans la plupart de leurs applications, notamment comme catalyseurs et comme additifs dans les verres. L'IMCOA anticipe des taux de croissance de 4 à 6 % par an entre 2014 et 2017 pour ces deux secteurs. Les secteurs des pigments et les technologies de purification de l'eau pourraient aussi continuer à croitre.

Un éventuel développement de la réfrigération magnétique pourrait dynamiser la demande en gadolinium.

La demande devra aussi s'adapter à l'offre. La satisfaction d'une demande croissante par une offre croissante n'est pas acquise à court terme (cf. 5.3). Les exploitations de Terres Rares hors Chine, et en particulier celles de Molycorp aux États-Unis et de Lynas en Australie, qui produisent majoritairement des Terres Rares légères, connaissent des difficultés financières en raison des prix trop bas, et les autres nouveaux projets potentiels, en particulier ceux qui contiennent suffisamment de Terres Rares lourdes dont le dysprosium, demandent des délais pour être développés, mais aussi des investissements qui sont différés voire abandonnés en raison aussi des prix peu motivants. La Chine de son côté a aussi baissé sa production officielle ces dernières années. La flambée des prix de 2011 puis l'anticipation du risque d'approvisionnement et la volonté de limiter la dépendance envers la Chine ont déjà conduit certains industriels à privilégier des technologies s'affranchissant au moins partiellement des Terres Rares[58], et en particulier du dysprosium dans les aimants permanents.

[58] Renault, par exemple, privilégie désormais les moteurs à rotor bobiné à ceux à aimants permanents pour équiper ses voitures.

Si l'offre ne suit pas la demande qui serait croissante, les prix pourront repartir à la hausse, motivant une reprise des investissements pour lancer de nouvelles exploitations minières, essentiellement à partir du portefeuille de projets avancés d'exploration existants (cf. 4.2 et tab.15 et 18). Mais la hausse de production ne sera pas immédiate compte tenu des délais de développement et de mise en production minière qui sont fréquemment au moins de l'ordre d'une dizaine d'années.

Par ailleurs, les projections sont liées à des perspectives d'évolutions des parts de marchés de technologies qui elles-mêmes peuvent changer rapidement. Ces projections ont donc de grandes marges d'incertitudes. Ainsi, si l'on peut prédire avec une bonne confiance que les voitures hybrides et électriques joueront un rôle de plus en plus important dans la transformation des moyens de locomotion des années à venir, la rapidité à laquelle cette transformation va s'opérer reste soumise à de nombreuses inconnues. Il est également très difficile d'évaluer quelle part de marché les technologies à base de Terres Rares occuperont par rapport aux technologies concurrentes. Quant au développement de la production d'énergies renouvelables, et par exemple l'expansion à venir de la demande en éoliennes offshore, pouvant consommer jusqu'à 200 kg de néodyme par MW installé, il dépend aussi largement de décisions politiques, elles-mêmes difficiles à anticiper.

La demande peut ainsi changer rapidement avec les innovations rapides des industries de haute technologie, alors que la flexibilité de l'offre est très limitée : le processus pour passer d'une découverte de gisement à la production industrielle est plutôt de l'ordre de la décennie au moins, durée pendant laquelle la demande peut varier considérablement.

Des études telles que celles de Kleijn (2012) et Alonso *et al.* (2012) ont calculé que si la société fait le pari massif d'une transition vers des systèmes d'énergie renouvelable, les besoins pourraient atteindre des quantités sans précédent de Terres Rares. Ces incertitudes accentuent les risques pour les investisseurs sur de nouveaux projets miniers, qui ont besoin de vision à moyen-long terme sur les évolutions de la demande.

3.4. SUBSTITUTIONS

Dans la plupart des technologies utilisant des Terres Rares, les efforts de recherche se poursuivent pour réduire les quantités nécessaires de ces métaux, dont l'approvisionnement présente certains aléas. Ces éléments restent difficilement substituables dans leurs principales applications, ou alors au détriment de la qualité et des performances du produit final. Mais une recherche active se poursuit, menée par de nombreux acteurs à la fois industriels et institutionnels (dont l'Union Européenne) afin de trouver des moyens de réduire les quantités de Terres Rares utilisées dans leurs applications.

Dans le secteur des aimants permanents, l'une des solutions consiste à remplacer les aimants permanents Nd-Fe-B ou Sm-Co par des aimants à base de ferrites, beaucoup moins chers, produits en grandes quantités, et résistant bien à la corrosion. Ils sont largement utilisés pour certains moteurs électriques, des capteurs et des appareils électroniques de faibles performances massiques. Néanmoins, leur puissance et leurs rendements sont très inférieurs (cf. fig.6). Cette substitution est mal adaptée aux hautes technologies, même si elle a pu s'appliquer pour réduire les coûts de production d'industries comme l'automobile ou la fabrication d'éoliennes. Les aimants à ferrites restent les plus vendus, en termes quantitatifs : d'après Arnold Magnetics Technologies, ils représentaient 88 % des ventes totales d'aimants permanents au monde en 2010. Une autre solution propre à l'industrie automobile peut être celle choisie par Renault, préférant la technologie de moteurs synchrones à rotor bobiné plutôt que les moteurs à aimants permanents. C'est le cas

également dans la production d'éoliennes, le fabricant allemand Enercon préférant une technologie à base d'électroaimants pour la construction de ses éoliennes[59].

Comme indiqué en 3.1.1, la substitution entre Terres Rares au sein des aimants permanents est possible, reposant souvent sur des critères de prix ou de disponibilité des éléments. Ainsi, le praséodyme peut se substituer au néodyme ou au samarium, du fait de propriétés similaires. Le terbium peut également se substituer au dysprosium pour assurer l'augmentation du point de Curie des aimants Nd-Fe-B. Mais les substituts ont les mêmes problèmes de disponibilité que les éléments à substituer et proviennent des mêmes sources, ils ne permettent donc pas de contourner les risques sur les approvisionnements en Terres Rares.

Des recherches visant à diminuer autant que possible les quantités de dysprosium nécessaires sans réduire les performances magnétiques de l'aimant concernent le positionnement précis du dysprosium dans la microstructure de l'alliage (Park *et al.* 2000 ; Komuro *et al*. 2010). D'autres recherches visent à éliminer complètement le dysprosium de ces aimants grâce à une modification de la structure des grains ou en utilisant un procédé diminuant les impuretés (jouant sur les quantités d'oxygène consommées lors du procédé). C'est le cas de la compagnie électronique japonaise TDK, qui a présenté lors du congrès Ceatec (Combined Exhibition of Advanced Technologies) d'octobre 2014 des prototypes d'aimants annoncés contenir 50 % moins de néodyme et pas du tout de dysprosium. Les sociétés japonaises Hitachi, Shin-Etsu et Intermetallic Japan Co ont aussi annoncé des procédés permettant de réduire significativement la quantité de dysprosium nécessaire pour permettre d'élever la plage de température de fonctionnement optimal de leurs aimants permanents. De tels aimants ne sont cependant pas encore au stade de la production industrielle.

En 2014, la société allemande Siemens a déposé un brevet sur la production d'aimants permanents dopés avec seulement 0,1% de dysprosium offrant une résistance à la démagnétisation suffisante pour un usage dans la production de générateurs d'éoliennes si ceux-ci bénéficient également d'un refroidissement par eau.

L'institut étatsunien d'Ames a annoncé avoir découvert un nouvel alliage magnétique Nd-Fe-B dopé au cérium et au cobalt, présentant des propriétés de coercivité dépassant de loin celle des aimants dopés au dysprosium, pour un coût de production qui pourrait être de 20 à 40 % inférieur à celui de ces derniers (Pathak *et al.,* 2015).

Dans le secteur des batteries, les batteries NiMH, contenant des Terres Rares, sont de plus en plus substituées par des batteries Li-ion sans Terres Rares.

Pour les systèmes d'éclairage, les diodes électroluminescentes (LED) gagnent des parts de marché et se substituent progressivement aux ampoules fluo-compactes. Les ampoules à LED, encore handicapées par un prix supérieur mais décroissant, ont pour avantage d'avoir un meilleur rendement énergétique, de ne pas contenir de mercure, et d'être annoncées avec une durée de vie supérieure. De plus, elles contiennent bien moins de Terres Rares que les ampoules fluo-compactes.

Le rapport de l'European Rare Earths Competency Network (ERECON) publié en mars 2015 résume la substituabilité des Terres Rares comme suit (Fig. 28) :

[59] Voir www.enercon.de/fr-fr/753.htm

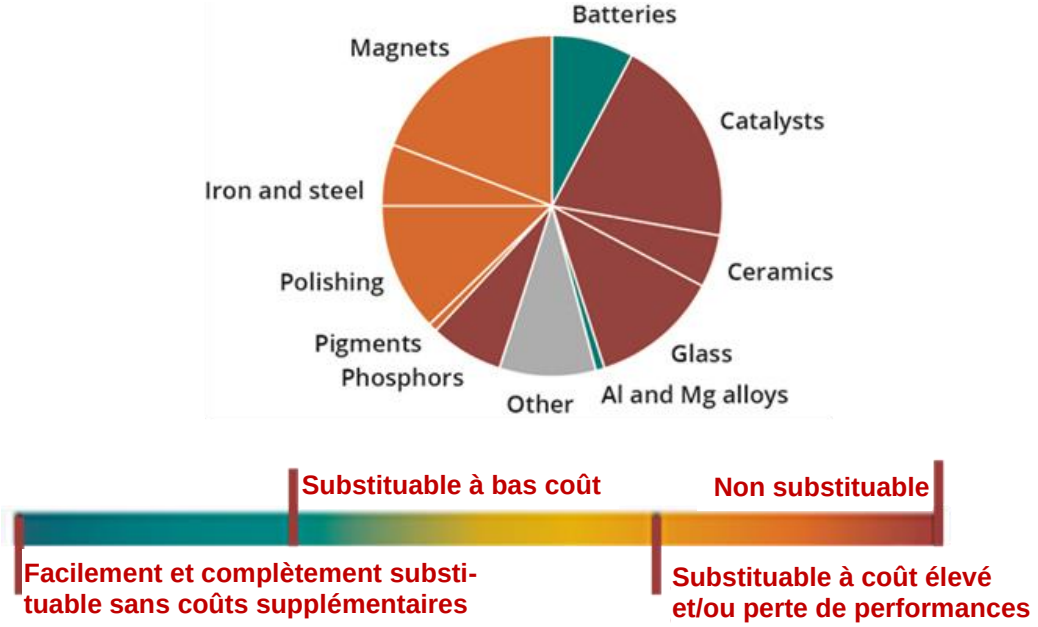


Figure 28 - Substituabilité des Terres Rares selon leurs applications (© ERECON, mars 2015).

4. L'offre : ressources et production mondiale

4.1. LES SOURCES DE TERRES RARES

4.1.1. Abondance des Terres Rares dans l'écorce terrestre

Le tableau 12 présente les abondances élémentaires de chaque Terre Rare dans l'écorce terrestre (« Clarke »), selon le CRC Handbook, 2012. Les estimations de ces abondances diffèrent légèrement d'un auteur à l'autre. Le tableau 12 fournit également, pour comparaison, l'estimation de Wedepohl (1995), mais les ordres de grandeur restent comparables.

Ces Clarkes s'échelonnent de 66,5 ppm[60] pour le cérium, le plus abondant de ces éléments, à 0,5 ppm pour le thulium, le moins abondant.

Elé-ment	N° ato-mique	Masse atomique	Abondance massique de l'élément (CRC Handbook, 2005-2012)	Rang par ordre d' abondance sur 92 éléments*	Oxyde trivalent (dans les minéraux)	Abondance massique comptée en oxyde trivalent	Oxyde industriel	Abondance massique comptée en oxyde industriel	Abondance massique de l'élément (Wedepohl, 1995)	Abondance l'élément dans l'eau de mer (CRC Handbook, 2005- 2012)
Sc	21	44.956	22 ppm	31	Sc_2O_3	33.7 ppm	Sc_2O_3	33.7 ppm	16 ppm	6×10^{-4} µg/l
Y	39	88.906	33 ppm	29	Y_2O_3	41.9 ppm	Y_2O_3	41.9 ppm	24 ppm	1.3×10^{-2} µg/l
La	57	138.906	39 ppm	28	La_2O_3	45.7 ppm	La_2O_3	45.7 ppm	30 ppm	3.4×10^{-3} µg/l
Ce	58	140.116	66.5 ppm	25	Ce_2O_3	77.9 ppm	CeO_2	81.7 ppm	60 ppm	1.2×10^{-3} µg/l
Pr	59	140.908	9.2 ppm	39	Pr_2O_3	10.8 ppm	Pr_6O11	11.1 ppm	6.7 ppm	6.4×10^{-4} µg/l
Nd	60	144.240	41.5 ppm	27	Nd_2O_3	48.4 ppm	Nd_2O_3	48.4 ppm	27 ppm	2.8×10^{-3} µg/l
Pm	61	145.000			Pm_2O_3		Pm_2O_3		10^{-12} ppm	
Sm	62	150.360	7.1 ppm	40	Sm_2O_3	8.2 ppm	Sm_2O_3	8.2 ppm	5.3 ppm	4.5×10^{-4} µg/l
Eu	63	151.964	2 ppm	52	Eu_2O_3	2.3 ppm	Eu_2O_3	2.3 ppm	1 ppm	1.3×10^{-4} µg/l
Gd	64	157.250	6.2 ppm	41	Gd_2O_3	7.1 ppm	Gd_2O_3	7.1 ppm	4 ppm	7×10^{-4} µg/l
Tb	65	158.925	1.2 ppm	59	Tb_2O_3	1.38 ppm	Tb_4O_7	1.41 ppm	0.7 ppm	1.4×10^{-4} µg/l
Dy	66	162.500	5.2 ppm	42	Dy_2O_3	6.0 ppm	Dy_2O_3	6.0 ppm	3.8 ppm	9.1×10^{-4} µg/l
Ho	67	164.930	1.3 ppm	56	Ho_2O_3	1.5 ppm	Ho_2O_3	1.5 ppm	0.8 ppm	2.2×10^{-4} µg/l
Er	68	167.259	3.5 ppm	44	Er_2O_3	4.0 ppm	Er_2O_3	4.0 ppm	2.1 ppm	8.7×10^{-4} µg/l
Tm	69	168.934	0.5 ppm	62	Tm_2O_3	0.6 ppm	Tm_2O_3	0.6 ppm	0.3 ppm	1.7×10^{-4} µg/l
Yb	70	173.040	3.2 ppm	45	Yb_2O_3	3.6 ppm	Yb_2O_3	3.6 ppm	2.0 ppm	8.2×10^{-4} µg/l
Lu	71	174.967	0.8 ppm	61	Lu_2O_3	0.9 ppm	Lu_2O_3	0.9 ppm	0.4 ppm	1.5×10^{-4} µg/l
Total lanthanides			187.2 ppm			218.4 ppm		222.6 ppm	144.4 ppm	12.6×10^{-3} µg/l
Total lanthanides+Y			**220.2 ppm**			**260.3 ppm**		**264.5 ppm**	**168.4 ppm**	**25.6×10^{-3} µg/l**

Tableau 12 - Abondance naturelle des Terres Rares dans la croûte terrestre (et dans l'eau de mer), selon CRC Handbook, 2005-2012.

Parmi les 83 éléments significativement présents dans la croûte terrestre[61], le cérium est le 25ème élément le plus abondant, et le thulium le 62ème. À noter toutefois que les 24 éléments les plus abondants (juste avant le cérium) constituent ensemble 99,95% de l'écorce terrestre. La figure 29 compare les abondances des éléments dans la croûte terrestre, avec les numéros atomiques en abscisse et les Clarkes en échelle logarithmique en ordonnée.

[60] ppm = partie par million, équivalent, pour les masses, à gramme par tonne (g/t).

[61] L'écorce terrestre contient les éléments portant les numéros atomiques de 1 à 92, mais neuf d'entre eux sont très instables et n'ont pas d'existence pérenne depuis la formation de la Terre : ils n'existent que de manière fugace dans la chaine de décroissance radioactive du thorium ou de l'uranium : ce sont Tc, Pm, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac, Pa.

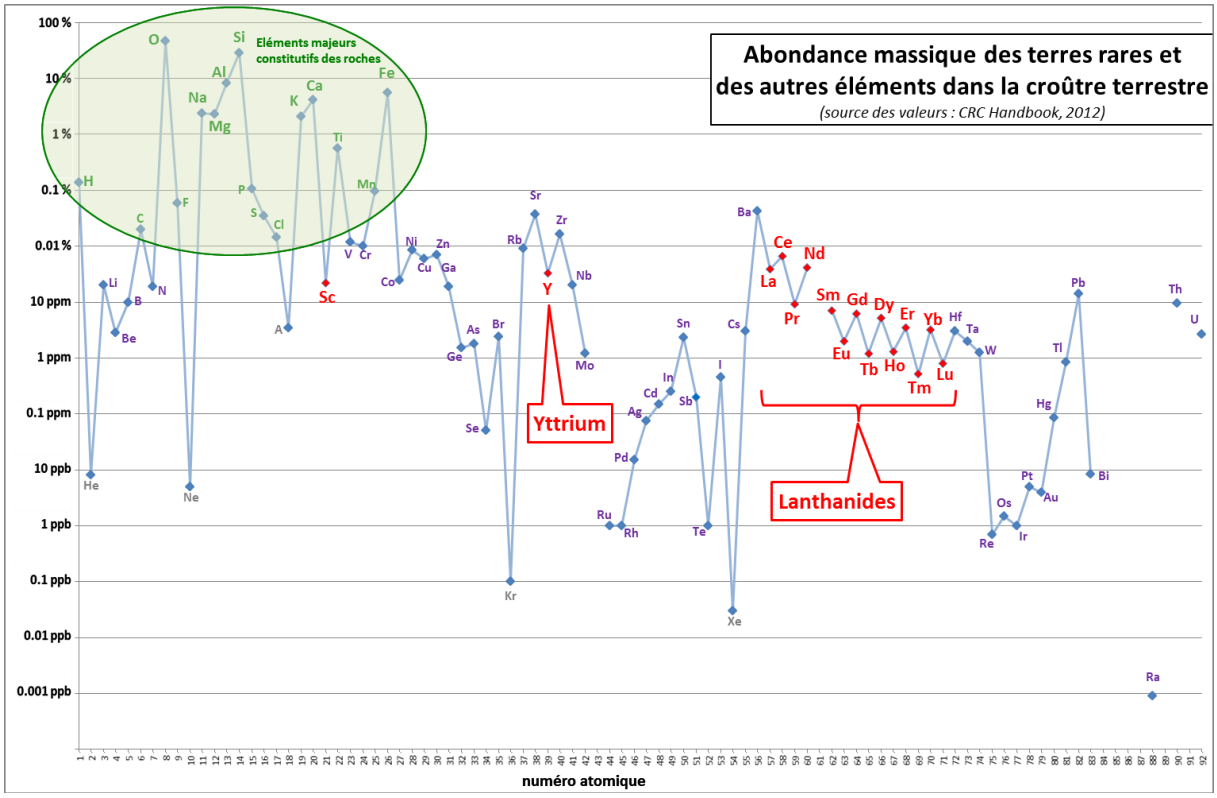


Figure 29 - Abondance comparée des Terres Rares et des autres éléments dans la croûte terrestre.

Le cérium a une abondance comparable à celle du cuivre (60 ppm), le néodyme, le lanthane et l'yttrium sont plus abondants que le cobalt (25 ppm), le dysprosium est deux fois plus abondant que l'étain (2,5 ppm), et le thulium deux fois plus abondant que l'antimoine (0,2 ppm). Cependant, en raison de leur comportement chimique dans les processus métallogéniques, les concentrations naturelles de Terres Rares au sein de gisements sont bien plus rares que les concentrations naturelles de cuivre, par exemple.

Les lanthanides à numéro atomique pair sont toujours plus abondants que les lanthanides à numéros atomiques impairs voisins, ce qui apparait clairement sur la figure 29.

Pour pouvoir comparer les abondances moyennes des Terres Rares aux teneurs annoncées dans les ressources ou réserves des gisements, généralement publiées en teneurs en oxydes (tab.15), le tableau 12 présente aussi les abondances naturelles des Terres Rares comptées sous forme d'oxydes, d'une part sous forme d'oxydes trivalents (Ln_2O_3) qui sont la forme naturelle de ces éléments dans leurs minéraux (monazite, xénotime, bastnaesite, etc., cf. 4.1.2), d'autre part sous forme d'oxydes industriels, qui, pour Ce, Pr et Tb, diffèrent des oxydes naturels les plus fréquents[62] (cf. 2.5).

Dans ses proportions naturelles par rapport aux autres Terres Rares, l'europium a un comportement particulier : il a tendance, par rapport aux autres Terres Rares, à s'enrichir dans les feldspaths plagioclases et en particulier l'anorthite, par substitution au calcium, et dans les séries basiques et ultrabasiques différenciées. Il est à l'inverse appauvri dans les lithologies pauvres en plagioclases. On retrouve ces mêmes ségrégations dans les roches

[62] Il n'y a guère que le cérium qui se trouve aussi dans la nature à l'état tétravalent, comme dans la cérianite ($(Ce,Th)O_2$) (cf. 4.1.2 et tab.12), mais il est alors la seule Terre Rare du minéral, contrairement à la grande majorité des autres minéraux de Terres Rares qui les rassemblent pratiquement toutes, en proportion cependant très disparates.

lunaires, les highlands lunaires à anorthosites présentent une anomalie positive en Eu, tandis que les mers lunaires, plus basaltiques, sont déprimées en cet élément.

Le spectre de répartition des Terres Rares et en particulier de l'europium par rapport à une composition mantellique moyenne avant différentiations dans l'évolution crustale, estimée d'après les spectres de répartition dans les météorites de type "chondrites carbonées CI" (McDonough et al., 1995)", permet de classer et d'analyser le positionnement et l'évolution de certaines lithologies.

Dans les conditions naturelles les Terres Rares sont très peu solubles et très peu abondantes en solution dans l'eau de mer. La teneur moyenne de l'eau de mer en Terres Rares est de l'ordre de 25 ng/l[63], toutes Terres Rares confondues (tab. 12).

4.1.2. Minéraux et minerais

Il existe près de 250 espèces minérales contenant des Terres Rares dans leur formule théorique[64], mais nombre d'entre eux n'existent que sous forme microscopique et en quantités anecdotiques. Seule une vingtaine de minéraux de Terres Rares ont une importance économique avérée ou potentielle significative.

Des Terres Rares peuvent également être présentes en substitution partielle significative dans d'autres minéraux, notamment en substitution du calcium dans l'apatite, la fluorine, le pyrochlore mais aussi en substitution d'autres ions comme par exemple dans le zircon.

Les principaux minéraux à Terres Rares sont indiqués dans le tableau 13.

Les Terres Rares présentent une grande homogénéité de propriétés chimiques. Leurs rayons ioniques voisins impliquent un comportement géochimique analogue, qui permet de nombreuses substitutions dans les mêmes sites des structures cristallines. Ainsi, bien qu'avec des niveaux de teneur variables, un grand nombre de Terres Rares, pour ne pas dire toutes, sont présentes dans chaque minéral qui en contient.

Les Terres Rares légères, proches du cérium, sont les plus abondantes et tendent à se concentrer dans les carbonates et les phosphates (gisements de type carbonatite). Les Terres Rares lourdes, proches de l'yttrium, sont plus rares et se retrouvent plutôt dans des gisements liés à des oxydes et des phosphates. La concentration la plus importante connue à ce jour se situe dans le sud de la Chine (Ganzhou, Jiangxi) dans des argiles ioniques.

Parmi les minéraux du tableau 13, ceux qui sont principalement exploités en majorité pour la production de Terres Rares sont la bastnaesite, la monazite et dans une moindre mesure la loparite, à Terres Rares légères dominantes, le xénotime, à yttrium et autres Terres Rares lourdes dominantes, et les argiles ioniques issues de l'altération superficielle de granites et autres roches ignées acides (pyroclastites) déjà pré-enrichies en Terres Rares.

---

[63] ng/l = nanogramme par litre. 1 ng = 10^{-9} g

[64] La base de données minéralogique en ligne Mindat (www.mindat.org) liste un peu plus de 320 minéraux reconnus par l'International Mineral Association (IMA) contenant des Terres Rares dans leur formule théorique. Mais cette liste distingue comme minéraux distincts, par exemple, la monazite-La (La,Ce,Nd)(PO4) de la monazite-Ce (Ce,La,Nd,Th)(PO4) et de la monazite-Nd (Nd,La,Ce)(PO4) selon que l'un ou l'autre des trois éléments La, Ce, Nd domine, Ces éléments sont toujours associés dans la monazite, , mais en proportion variable, et avec d'autres Terres Rares minoritaires - sachant que c'est le cérium qui domine dans la grande majorité des cas. Une liste simplifiée dans laquelle on considère la monazite comme un seul minéral de composition variable, ainsi que nombre d'autres minéraux subdivisés par Mindat de manière similaire, réduit cette liste à 254.

- la bastnaésite est un fluorocarbonate, (TR)FCO_3, à forte teneur en terres cériques et, relativement, en europium. Ce mineral est exploité en Chine, dans le gisement de Bayan Obo (Mongolie Intérieure) et aux États-Unis, à Mountain Pass (Californie) notamment. La bastnaésite est souvent associée à la synchysite et la parisite, des fluorocarbonates voisins ;
- la monazite est un orthophosphate de Terres Rares cériques et de thorium (TR,Th)PO_4. Elle contient généralement 55 à 60 % d'oxydes de Terres Rares, 3 à 10 % de thorium, un peu d'yttrium et d'uranium. La monazite est un minéral accessoire assez banal des granites et gneiss. Étant très résistante, on la retrouve dans les sables alluvionnaires ou elle se concentre dans les placers à minéraux lourds. La monazite accompagne la bastnaésite dans le gisement de Bayan Obo, en Chine, où elle est exploitée. La monazite est aussi récupérée dans les minéraux lourds des sables de plage exploités pour le titane (ilménite, rutile) et le zircon, en Inde, au Brésil, en Malaisie, et auparavant en Australie.

Nom du minéral	Formule chimique	Type (anion principal)	Teneur maxi en OTR
Principaux minéraux de Terres Rares			
Allanite	$(Ce,Ca,Y)_2(Al,Fe)_3(SiO_4)_3OH$	Silicate	28%
Ancylite	$SrREE(CO_3)_2(OH).H_2O$	Carbonate	46%
Bastnaesite	$(Ce,La,Y)(CO_3)F$	Fluoro-carbonate	75%
Britholite	$(Ce,Ca)_5(SiO_4,PO_4)_3(OH,F)$	Silicate	62%
Cerianite	$(Ce,Th)O_2$	Oxyde	81%
Cerite	$(Ce,La,Ca)_9(Mg,Fe)(SiO_4)\ 6(SiO_3OH)(OH)_3$	Silicate	65%
Euxenite	$(Y,Ca,Ce,U,Th)(Nb,Ta,Ti)_2O_6$	Oxyde	30%
Fergusonite	$(Y,Er,U,Th)(Nb,Ta,Ti)O_4$	Oxyde	46%
Florencite	$CeAl_3(PO_4)_2(OH)_6$	Phosphate	32%
Fluocerite	$(La,Ce)F_3$	Fluorure	70%
Gadolinite	$(La,Nd,Y,Ce)_2\ FeBe_2Si_2O_{10}$	Silicate	52%
Hydroxylbastnaesite	$(Ce,La,Nd)CO_3(OH,F)$	Fluoro-carbonate	75%
Kainosite	$Ca_2(Y,REE)_2\ Si_4O_{12}CO_3.H_2O$	Silicate	38%
Loparite	$(Na,Ca,Ce,Sr,Th)(Nb,Ti)O_3$	Oxyde	34%
Monazite	$(Ce,La,Pr,Nd,Th,Y)PO_4$	Phosphate	71%
Mosandrite	$(Ca,Na,REE)_7(Ti,Zr)_2Si_4O_{14}(OH,F)_4.H_2O$	Silicate	33%
Parisite	$CaREE_2(CO_3)_3F_2$	Fluoro-carbonate	64%
Samarskite	$(Y,Ce,Fe,U,Th,Ca)(Nb,Ta,Ti)O_4$	Oxyde	22%
Steenstrupine	$Na_{14}Ce_6Mn_2Fe_2(Zr,Th)(Si_6O_{18})_2(PO_4)_7.3H_2O$	Phosphosilicate	31%
Synchysite	$Ca(Ce,La,Nd,Gd,Y)(CO_3)_2F$	Fluoro-carbonate	50%
Thalenite	$Y_3Si_3O_{10}(OH)$	Silicate	63%
Xenotime	YPO_4	Phosphate	62%
Autres minéraux pouvant contenir des Terres Rares en substitution partielle			
Apatite	$Ca_5(PO_4\}_3\ (F,Cl,OH)$	Phosphate	12%
Brannerite	$(U,Ca,Y,Ce)(Ti,Fe)_2O_6$	Oxyde	6%
Eudialyte	$Na_{15}Ca_6(Fe,Mn)_3Zr_3(Si,Nb)Si_{25}O_{73}(OH,Cl,H_2O)_5$	Silicate	10%
Lovozerite	$Na_2Ca(Zr,Ti)Si_6O_{14}(OH)_4.H_2O$	Silicate	
Pyrochlore	$(Na,Ca,Ce)_2Nb_2O_6F$	Oxyde	6%
Zircon	$(Zr,Th,Y,Ce)SiO_4$	Silicate	4%
Principaux minéraux argileux pouvant contenir des Terres Rares adsorbées			
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Silicate	0.3%
Halloysite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Silicate	0.3%
Illite	$K_{1-x}Al_{3-x}Si_{3+x}O_{10}(OH)_2$	Silicate	0.3%
Smectite	$\sim (Na,Ca)_{0.33}Al_2Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$	Silicate	0.3%

Tableau 13 - Principaux minéraux à Terres Rares.

La teneur en thorium de la monazite pose un problème majeur, qui a conduit à l'abandon de la plupart des exploitations australiennes. Le thorium est un élément faiblement radioactif mais dont la chaîne de désintégration produit un isotope du radon émetteur alpha facilement inhalable et présentant un risque radiologique important. Les minéraux et résidus de traitement à thorium sont donc considérés comme des déchets radioactifs, avec les problèmes de stockage associés. Le thorium n'a pas aujourd'hui d'utilisation économique significative dans l'industrie nucléaire. Cela pourrait néanmoins changer d'ici quelques décennies avec le développement et la mise en oeuvre de réacteurs utilisant le thorium. L'isotope naturel ^{232}Th est fertile et environ trois fois plus abondant que l'uranium. Soumis à un flux de neutrons il peut muter en ^{233}U, fissile. Divers pays ont effectué des recherches visant à valoriser le thorium dans différents types de combustibles nucléaires[65]. Les grandes puissances nucléaires actuelles ayant d'importants stocks de ^{238}U appauvri, également fertile (transmutable en plutonium ^{239}Pu) et ayant énormément investi dans le développement de leurs filières à ^{235}U sont peu enclines à consentir à court-terme les investissements nécessaires au développement d'une filière industrielle ^{232}Th. Aujourd'hui le pays le plus avancé dans le développement de cette dernière filière est l'Inde, qui dispose d'importantes ressources en thorium, mais de peu d'uranium, et qui a pour objectif de couvrir, d'ici 2050, 30 % de ses besoins en électricité à partir de réacteurs utilisant le thorium.

- la loparite est un niobo-titanate à Terres Rares légères, du groupe de la pérovskite ($CaTiO_3$). Elle n'est exploitée que dans le massif peralcalin de Lovozero, situé dans la péninsule de Kola, en Russie. Le concentré de loparite est traité dans l'usine de séparation de Silmet, située à Sillamäe en Estonie, appartenant à Molycorp, et à l'usine d'Irtysh, au Kazakhstan ;
- le xénotime est un phosphate d'yttrium et d'autres Terres Rares lourdes. C'est, comme la monazite mais bien moins commun, un minéral accessoire des granites et gneiss, que l'on retrouve aussi dans les placers à minéraux lourds. Il est récupéré dans certaines exploitations de sables à minéraux lourds (Malaisie) et est présent dans les minéralisations primaires de quelques projets miniers comme Browns Range (Australie-Occidentale, société Northern Minerals), Lofdal (Namibie, société Namibia Rare Earths Inc.) (cf. 4.2.).

La principale source mondiale de Terres Rares lourdes est constituée par un ensemble de gisements d'argiles latéritiques du sud de la Chine. Ces argiles (principalement kaolinite / halloysite, illite, smectites (Papangelakis *et al.,* 2014) se sont développées par altération superficielle de roches ignées acides (granites, pyroclastites) déjà relativement riches en Terres Rares. Les ions de Terres Tares trivalents, mobilisés par l'altération des minéraux à Terres Rares comme l'apatite ou le xénotime, se sont adsorbés préférentiellement sur ces argiles, souvent qualifiées « d'argiles à adsorption d'ions », ou « argiles ioniques », avec des teneurs comprises entre 0,05 et 3 % d'OTR (Papangelakis et al., 2014). Dans le processus d'altération, le cérium, ailleurs généralement la plus abondante des terres rares, s'est oxydé sous forme tétravalente, moins facilement adsorbable. Les argiles ioniques sont donc généralement très appauvries en cérium, et par différence enrichies en autres Terres Rares et en particulier en Terres Rares lourdes. La répartition des différentes Terres Rares y est cependant assez variable, comme l'illustre le tableau 14. Le gisement de Longnan est particulièrement enrichi en yttrium et lanthanides lourds, et particulièrement pauvre en néodyme. En revanche les autres gisements cités au tableau 14, bien appauvris en cérium, restent très riches en lanthane et néodyme, avec des teneurs en yttrium et lanthanides lourds plus modérées. Par ailleurs, ce type de minéralisation ne présente pas de radioactivité

[65] Pour un aperçu synthétique des travaux de recherche et de développement, voir http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Thorium.

associée. Ces argiles ioniques à Terres Rares sont exploitées jusqu'à présent exclusivement en Chine. Des gisements d'argiles ioniques à Terres Rares ont été récemment identifiés hors Chine, mais non encore exploités, comme Antsirabé, à Madagascar (société Tantalus) et à Serra Verde, au Brésil (société Mineração Serra Verde).

	Bastnaésite			Monazite			Loparite	Xénotime	Argiles à adsorption d'ions			
	Bayan Obo Chine	Mountain Pass Etats-Unis	Sichuan Chine	Mt Weld Australie	Guang dong Chine	Inde	Lovozero Russie	Guang dong Chine	Longnan (Jiangxi) Chine	Xunwu (Jiangxi) Chine	XinFeng Chine	Guang dong Chine
La	23.0%	33.2%	29.2%	25.50%	23.0%	22.50%	28.0%	1.2%	1.8%	43.4%	26.2%	30.4%
Ce	50.0%	49.1%	50.3%	46.74%	42.7%	48.50%	57.5%	3.0%	0.4%	2.4%	1.9%	1.9%
Pr	6.2%	4.3%	4.6%	5.32%	4.1%	5.60%	3.8%	0.6%	0.7%	9.0%	6.0%	6.6%
Nd	18.5%	12.0%	13.0%	18.50%	17.0%	18.50%	8.8%	3.5%	3.0%	31.7%	21.1%	24.4%
Sm	0.8%	0.8%	1.5%	2.27%	3.0%	2.70%	1.0%	2.2%	2.8%	3.9%	4.5%	5.2%
Eu	0.2%	0.1%	0.2%	0.44%	0.1%		0.13%	0.2%	0.1%	0.5%	0.7%	0.7%
Gd	0.7%	0.2%	0.5%	0.75%	2.0%	1.20%	0.2%	5.0%	6.9%	3.0%	4.8%	4.8%
Tb	0.1%	0.02%		0.07%	0.7%		0.07%	1.2%	1.3%		0.77%	0.6%
Dy	0.1%	0.03%		0.12%	0.8%		0.09%	9.1%	6.7%		4.10%	3.6%
Ho							0.03%		1.6%		0.8%	
Er							0.07%		4.9%		2.0%	1.8%
Tm									0.7%			
Yb							0.3%		2.5%	0.3%	1.6%	
Lu							0.05%		0.4%	0.1%	0.2%	
Y		0.1%	0.5%	0.25%	2.4%			59.3%	65.0%	8.0%		20.0%
Total	99.6%	99.86%	99.8%	99.96%	95.8%	99.0%	100.0%	85.3%	98.8%	102.31%	74.68%	100.0%

Tableau 14 - Proportions des différentes Terres Rares dans quelques exemples de minéraux et gisements exploités, d'après Roskill, 2015.

La figure 30 illustre quelques-uns de ces minéraux.

Bastnaésite de Mulla Ghori, Pakistan.
Collection et photo
© Christian Rewitzer, Wikimedia

Monazite de la mine de Siglo Veinte, Llallagua, Bolivie.
Collection et photo
© Rob Lavinsky, Wikimedia

Loparite du Massif de Khibiny, Péninsule de Kola, Russie.
Collection et photo
© Rob Lavinsky, Wikimedia

Xénotime du Mont MLalosa, Zomba District, Malawi.
Collection et photo
© Christian Rewitzer, Wikimedia

Eudialyte du Massif de Khibiny, Péninsule de Kola, Russie.
Collection et photo
© Rob Lavinsky, Wikimedia

Figure 30 - Quelques minéraux porteurs de Terres Rares.

La monazite (Ce,TR légères)PO_4 et le xénotime (Y,TR lourdes)PO_4 ont des chimismes similaires, mais des réseaux cristallins différents. La monazite cristallise dans le système monoclinique, tandis que le xénotime cristallise dans le système quadratique. Les sites cationiques du cristal de monazite sont de dimension optimale pour les rayons ioniques de l'ordre de celui du cérium et des éléments voisins (Terres Rares légères), tandis que les sites cationiques du cristal de xénotime sont de dimension optimale pour les rayons ioniques de l'ordre de celui de l'yttrium et des Terres Rares lourdes (cf. section 2.4 et tab.3). Ainsi la monazite concentre préférentiellement les Terres Rares légères (tout en contenant aussi des Terres Rares lourdes accessoires), et le xénotime concentre préférentiellement les Terres Rares lourdes (tout en contenant aussi des Terres Rares légères en moindres proportions). Ces deux minéraux sont des minéraux accessoires de nombreux granites.

Pour s'affranchir des abondances naturelles absolues des Terres Rares et évaluer leur facteur d'enrichissement dans tel ou tel minéral, on en pondère les teneurs par leurs proportions relatives dans les chondrites, ces météorites rocheuses dont on estime que la composition se rapproche de celle du manteau terrestre avant sa différenciation par les phénomènes géologiques terrestres.

La figure 31, empruntée à Stosch (2000), illustre la concentration relative, par rapport aux chondrites, des différents lanthanides (sans l'yttrium) dans quelques granites, monazites et xénotimes d'Allemagne.

La figure 32, reproduite et adaptée de Tuduri *et al*. (2015), illustre la concentration relative, par rapport aux chondrites, des différentes Terres Rares dans 7 minéraux contenant des Terres Rares dans des gisements exploités ou en projet. Les Terres Rares y ont été placées, en abscisse, par ordre de rayon du trication décroissant, ce qui équivaut à l'ordre croissant des numéros atomiques, à l'exception de l'yttrium qui se retrouve donc placé entre le dysprosium et l'holmium (cf. tab. 3).

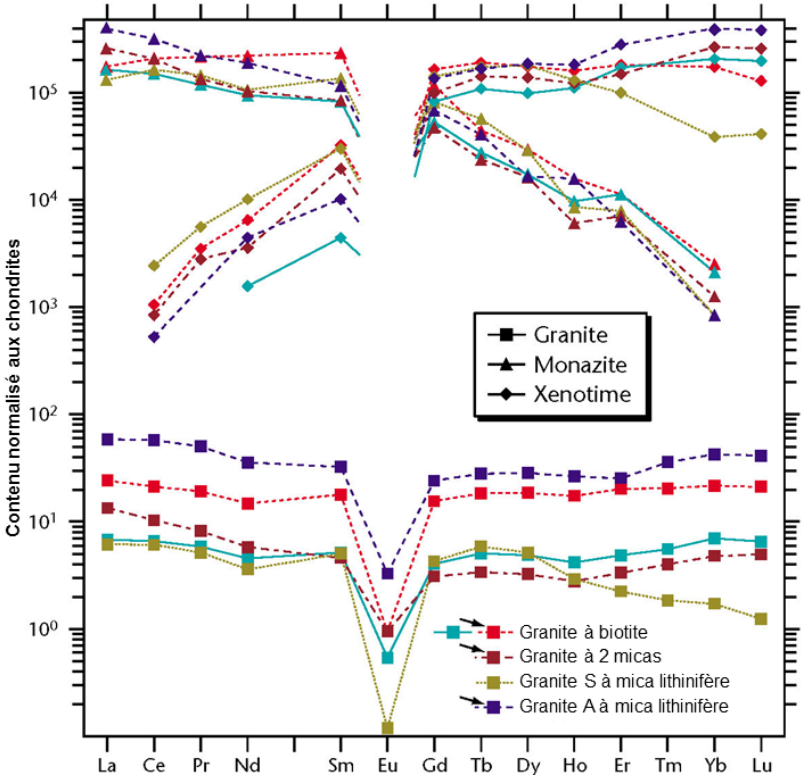


Figure 31 - Spectre des lanthanides dans des granites de l'Erzgebirge et le Fichtelgebirge (Saxe et Bavière, Allemagne) et dans des monazites et xénotimes qu'ils contiennent. Traduit de Stosch, 2000.

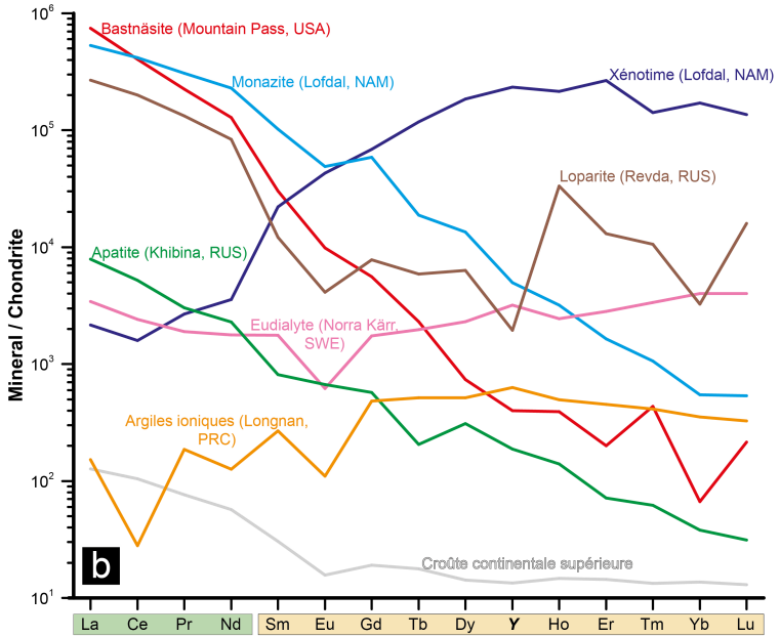


Figure 32 - Spectre des Terres Rares dans divers minéraux à Terres Rares de gisements en exploitation ou en projet. © Tuduri et al, *2015.*

La figure 31 illustre le léger enrichissement de ces granites relativement évolués en lanthanides, assez homogène[66] pour l'ensemble des éléments à l'exception de l'europium, dont le déficit est particulièrement marqué dans ces exemples d'Allemagne[67] cités (cf. 4.1.1). Elle illustre aussi la tendance à ségrégation entre les lanthanides les plus légers et les lanthanides les plus lourds dans la monazite et le xénotime. Chacun de ces deux minéraux sont fortement enrichis dans l'ensemble des lanthanides, en dehors de l'europium, mais avec un facteur d'enrichissement jusqu'à 10 à 100 fois supérieur pour les éléments les plus légers, du lanthane au samarium dans les monazites par rapport aux xénotimes, un facteur d'enrichissement relativement équivalent pour le gadolinium, et un facteur d'enrichissement jusqu'à 10 à 100 fois supérieur pour les éléments les plus lourds, du terbium au lutétium dans les xénotimes par rapport aux monazites.

Dans l'exemple du gisement de carbonatites de Lofdal (Namibie) (fig.32), la monazite et le xénotime ne sont pas déficitaires en europium, lequel est enrichi de manière équivalente, comme le gadolinium, dans ces deux minéraux, mais la ségrégation des lanthanides plus lourds et plus légers est similaire à celle des granites allemands de la figure 31.

On remarque sur la figure 32 un enrichissement préférentiel en Terres Rares légères très marqué dans la bastnaesite (de Mountain Pass, Californie), et un enrichissement seulement légèrement plus marqué en Terres Rares lourdes des argiles ioniques de Longnan (Chine), qui sont surtout caractérisées par un fort déficit en cérium, éliminé par oxydation dans les processus supergènes.

Ainsi sur le critère strictement minéralogique, on peut classer dans les Terres Rares légères les lanthanides les plus légers, La, Ce, Pr, Nd et, de manière moins nette, Sm. On peut clairement classer dans les Terres Rares lourdes l'yttrium et les lanthanides de Tb à Lu. Le classement est moins net pour Eu et Gd, d'où la grande diversité des attributions entre légers, lourds ou intermédiaires (« SEG ») des trois éléments Sm, Eu et Gd selon les auteurs (cf. 2.7).

[66] Noter cependant que l'échelle des ordonnées est logarithmique. Les facteurs d'enrichissements par rapport aux chondrites s'échelonnent entre 2 et 60 environ.

[67] Comme mentionné en 4.1.1, l'europium a un comportement spécifique au cours de l'évolution crustale et a tendance à s'enrichir davantage dans les roches basiques riches en plagioclases calciques..

4.1.3. Principaux types de gisements

La grande majorité des gisements primaires de Terres Rares sont associés à des formations magmatiques plus ou moins fortement différenciées, voire stratifiées, souvent à structure circulaire. Cette famille de gisements comprend les massifs intrusifs alcalins et peralcalins, les carbonatites, et les volcanites et certains systèmes hydrothermaux éventuellement associés. Ces formations sont liées :

- soit à la formation de fossés d'effondrement par processus d'extension tectonique de croûte continentale, avec fusion partielle de cette croûte continentale amincie par ce processus. Les gisements de la région des grands lacs africains ou du sud du Groenland (Kvanefjeld et Kringlerne) en sont de bons exemples ;
- soit à des intrusions post-orogéniques situées en arrière de marges continentales actives. L'exemple de ce type de gisement est Mountain Pass. Les primo-concentrations de Terres Rares dans les roches-mères qui ont donné par altération les gisements à argiles ioniques du sud de la Chine sont également à rattacher à cette famille de concentrations à Terres Rares.

On trouve aussi des concentrations de Terres Rares dans les gisements de type IOCG[68].

Il existe aussi des occurrences de Terres Rares en contexte sédimentaire, dans des shales pyriteux, avec une seule occurrence étudiée jusqu'à présent (Buckton, Canada).

Il existe des gisements secondaires de Terres Rares, les argiles ioniques développés par altération superficielle de granites et autres roches magmatiques acides dans le sud de la Chine, et les placers et concentrations de sables à minéraux lourds à monazite et éventuellement xénotime.

Des Terres Rares sont parfois récupérées en sous-produits de mines d'uranium ou en retraitement de tailings de mines d'uranium (Kazakhstan, Canada).

Enfin, les nodules et encroutements sous-marins sont souvent un peu enrichis en Terres Rares (0,1 à 0,3 % OTR), ainsi que certains sédiments des grands fonds océaniques, dont certains ont commencé à être étudiés, en particulier par le Japon suite à la crise des îles Senkaku en 2010 et l'envolée des prix des Terres Rares en 2011 (cf. 4.6.2 et 5.2)

Ces différents types de gisements sont brièvement passés en revue ci-après.

Les carbonatites

Les carbonatites sont des roches d'origine magmatique très particulières, formées d'au moins 50% de carbonates de calcium (calcite), de calcium et de magnésium (dolomite), de calcium, de magnésium et de fer (ankérite) ou de fer seulement (sidérose), très pauvres en silice. Il peut s'agir de laves volcaniques ou, plus fréquemment d'intrusions liées à des massifs de roches alcalines (syénites néphéliniques, trachytes).

Le gisement géant de Bayan Obo, en Chine, est désormais rattaché à ce type, bien qu'il soit atypique car métamorphisé et altéré par métasomatisme. Les principaux minéraux de Terres Rares sont la bastnaésite (et les fluoro-carbonates associés synchysite et parisite) et la monazite, dans une dolomite stratiforme métamorphisée avec des masses d'oxydes de fer. Le gisement de Bayan Obo est en pratique une mine de fer dont les Terres Rares sont un sous-produit.

[68] IOCG = "Iron Oxyde - Copper - Gold", en français "Oxyde de Fer - cuivre - or"

Le Grand Rift Est-Africain est un fossé d'effondrement intracontinental typique et est jalonné par plusieurs massifs de carbonatites, avec en particulier le seul volcan actif connu émettant des laves carbonatitiques, l'Ol Doyno Lengai, en Tanzanie. Plusieurs de ces massifs de carbonatites sont minéralisés en Terres Rares, avec souvent d'autres éléments associés (Be, F, Fe, Nb, P, Ta, Th, U, Zr, en quantités variables selon les gisements) et sont en cours d'exploration plus ou moins avancée, au Kenya, au Malawi, au Mozambique et en Tanzanie (cf. tableau 15).

Les principaux minéraux porteurs de Terres Rares des carbonatites sont surtout la bastnaesite et la monazite, d'où des teneurs en thorium parfois élevées (cf.4.1.2). Des Terres Rares peuvent aussi être présentes dans du pyrochlore et dans l'apatite.

Les Terres Rares peuvent être enrichies dans la partie superficielle, altérée, de ces carbonatites, et ces altérites peuvent représenter des volumes conséquents. Les Terres Rares peuvent alors aussi se présenter sous forme d'alumino-phosphates de la famille crandallite-florencite. Des exemples d'altérites dérivées de carbonatites sont la zone centrale de Mount Weld (actuellement exploitée, teneur moyenne des ressources : 10,1 % OTR) et le gisement de Ngualla en Tanzanie, où les teneurs en OTR peuvent atteindre 8 % dans les altérites enrichies. Le gisement de Mabounié, au Gabon, présente aussi de tels enrichissements résiduels.

Globalement, les carbonatites sont de loin la première source économique mondiale actuelle de Terres Rares légères.

Les complexes intrusifs alcalins et peralcalins*, hors carbonatite.*

Il s'agit de complexes ignés, éventuellement stratifiés, formés de syénites, trachytes, phonolites, avec aplites et pegmatites associées, contenant des minéraux à Terres Rares et divers autres éléments associés (Be, F, Fe, Nb, P, Ta, Th, U, Zr). L'un des plus beaux exemples de complexe igné alcalin stratifié est le massif d'Ilímaussaq dans le sud du Groenland, âgé de 1,13 Ga, qui comporte deux gisements majeurs de Terres Rares : Kvanefjeld et Kringlerne (cf. 4.2). Ce complexe alcalin stratifié (fig. 33) présente 29 niveaux de kakortokite, des cumulats de plancher de chambre magmatique.

Ces gisements ont des minéralogies souvent complexes (tableau 14). Les porteurs de Terres Rares peuvent être l'eudialyte (fig. 34) à Kringlerne et la steenstrupine à Kvanefjeld, pour lesquels les processus industriels d'extraction et de séparation des Terres Rares sont encore en développement.

Le gisement de Kutessay (Kirghizie) est peut-être à rattacher à cette catégorie. Il s'agit d'une minéralisation à monazite, xénotime et autres minéraux à Terres Rares associées à un granophyre, un type d'encaissant très inhabituel pour des Terres Rares.

Ce type de gisement représente actuellement la deuxième ressource de Terres Rares[69].

[69] et même la première si on exclut la Chine et que l'on ne compte que des gisements pour lesquels les ressources indiquées ou mesurées sont documentées conformément aux codes reconnus par le CRIRSCO

Figure 33 - Gisement de Terres Rares de Kringlerne au Groenland (Tanbreez Mining) avec ses alternances de lits de kakortokite (plus clairs) et de lujavrite (plus sombres). Photo J. Tuduri, BRGM.

Figure 34 - Eudialyte (rose) dans la katokortite du gisement de Kringlerne au Groenland. Photo J. Tuduri, BRGM.

Les volcanites acides

Le gisement de Round Top, au Texas (États-Unis), lié à un laccolite rhyolitique d'âge éocène (36 Ma) appartient à cette famille de gisements. Les Terres Rares y sont associés à des microcristaux d'yttrofluorite, tapissant des vacuoles de la rhyolite, ce qui montre qu'elles étaient associés à des fluides tardifs, concentrant les éléments immiscibles dans le magma rhyolitique, l'yttrium et d'autres Terres Rares (essentiellement lourdes) substituant une partie du calcium de la fluorine. Ce gisement riche en Terres Rares lourdes est également riche en uranium. Le gisement de Brockman, en Australie, pourrait être rattaché à ce type, bien que métamorphisé. Ce type de gisement ne représente cependant qu'une part marginale des ressources identifiées au niveau mondial (0,5 %).

Les gisements hydrothermaux

Il existe quelques gisements de Terres Rares de forme filonienne d'origine hydrothermale, généralement dans des secteurs affectés par un magmatisme alcalin. Le gisement filonien à monazite de Steenkampskraal, dans le nord-ouest de l'Afrique du Sud est, en termes de teneurs, le plus riche gisement de Terres Rares connu à ce jour, avec 14,9 % d'OTR contenu dans ses ressources indiquées et mesurées. Cependant le tonnage connu à ce jour reste limité (83 kt d'OTR), bien loin des millions de tonnes connus dans les plus grands gisements. Le gisement de Browns Range (Australie) est également décrit comme une brèche hydrothermale, probablement liée à une intrusion profonde. Il s'agit de l'un des plus importants gisements connus de xénotime.

Les IOCG *(Iron Oxyde - copper - gold / oxydes de fer, cuivre, or).*

Il s'agit de gisements de fer, avec des quantités variables de cuivre et d'or associées. Ces gisements peuvent contenir des apatites enrichies en Terres Rares. Ils sont rencontrés en contexte tardiorogénique à postorogénique (craton ou marge continentale). Leur âge s'échelonne du Protérozoïque à l'Holocène. L'association spatiale avec des intrusions magmatiques n'est pas démontrée. De nombreux districts de ce type présentent des évidences de dépôts d'évaporites marines ou lacustres. Ces gisements sont caractérisés par une grande abondance d'oxydes de fer, des éléments mineurs comme U, Ag, Mo, Co, As et Zn, en plus des Terres Rares.

Parmi les exemples de gisements IOCG, on pourra citer :

- Olympic Dam (Australie méridionale), un gisement exploité pour le cuivre, l'uranium, l'or et l'argent. Il contient aussi des Terres Rares (2 Gt à 0,5 % OTR), mais ces dernières ne sont pas récupérées ;
- Kiruna (Suède), exploité pour le fer (magnétite) qui contient des Terres Rares dans le minerai de fer (500 Mt à 0,2-0,7 % OTR). Les Terres Rares ne sont pas récupérées jusqu'à présent.

En cas de forte augmentation des cours des Terres Rares, cette classe de gisements pourrait représenter une ressource importante.

Les shales noirs pyriteux

Il existe jusqu'à présent un seul exemple de shales noirs sédimentaires pyriteux qui a été suffisamment étudié pour son contenu en Terres Rares. Il s'agit du gisement de Buckton (Alberta, Canada). Les schistes noirs de la White Spreckled Formation, contiennent jusqu'à 20 % de sulfures de fer ainsi que de nombreux autres éléments (Ni, Mo, U, V, Zn, Cu, Co, Li, Th, Sc et 0,03 % d'OTR). Bien que cette teneur soit très faible, à peine supérieure au Clarke (Clarke cumulé des oxydes de Terres Rares : 0,026 %, cf. tab.11), la société DNI Metals Inc étudie la possibilité de traiter ces shales noirs par biolixiviation en tas pour en récupérer les Terres Rares. Les ressources de ce type de gisements sont cependant marginales au niveau mondial, elles ne représentent que 68 kt d'OTR contenues, soit 0,1 % de l'ensemble des ressources traçables. Mais il peut exister d'autres gisements de ce type, les minéralisations métallifères associées à la matière organique de bassins sédimentaires étant souvent mal connues.

Les gisements détritiques à minéraux lourds

Les concentrations de sables à minéraux lourds, alluvionnaires (placers) ou dans les sables de plage contiennent souvent de la monazite et/ou du xénotime en minéraux accessoires avec les minéraux de fer (magnétite), de titane (ilménite et rutile), de zirconium (zircon) ou d'étain (cassitérite).

Les gisements économiquement importants pour les Terres Rares sont principalement les sables de plage à minéraux lourds (sables noirs) exploités principalement pour ilménite, rutile et zircon.

La formation des cordons de sable noir, enrichis en minéraux lourds, nécessite une source primaire de minéraux lourds en roche proche (littorale). L'érosion libère ces minéraux à forte résistance mécanique et la houle va les classer en fonction de leur densité. La partie siliceuse du sable, moins dense, est entraînée au large, et des minéraux lourds, de couleur généralement sombre, se concentrent sous forme de placers, sur la plage et/ ou dans la zone d'estran. Ce phénomène peut entraîner la formation de gisements de grande importance économique, notamment pour le titane et le zircon.

Le principal minéral à Terres Rares de ces sables de plage est la monazite, généralement thorifère et radioactive. Elle avait été exploitée en Australie, mais cette exploitation a été arrêtée en raison de cette radioactivité. Elle est désormais surtout exploitée en Inde, où elle alimente aussi le besoin en thorium de la recherche nucléaire.

Les sables de plage des districts de Cuttak et Ganjam (État de l'Orissa) comportent un niveau d'environ 30 cm d'épaisseur concentré à une teneur en monazite de 2,5 %[70]. De tels placers sont également connus le long des côtes de l'Etat d'Andhra Pradesh, près de Vishakhapatnam et de Bhimunipatnam, ainsi que par endroits le long des côtes des Etats du Kerala et de Tamil Nadu.

Les argiles ioniques

Les argiles à adsorption d'ions minéralisés en Terres Rares, ou « argiles ioniques » sont des argiles résiduelles formées par altération météorique en milieu tropical humide (latéritisation) d'un substrat de roches ignées acides (granite, pyroclastites) à apatite et xénotime, déjà pré-enrichi en Terres Rares.

Les argiles sont principalement de la kaolinite, de l'illite et des argiles du groupe des smectites. Au cours de l'altération, les argiles adsorbent sélectivement les Terres Rares trivalentes, d'où un appauvrissement en cérium qui passe, en milieu oxydant, sous forme tétravalente, et donc par différence un enrichissement dans les autres Terres Rares et en particulier les terres yttriques. Aujourd'hui les argiles ioniques des environs de la ville de Ganzhou dans la province de Jiangxi (sud de la Chine) sont la plus importante source mondiale de terres yttriques, assurant environ 95 % de leur production. Début 2013 le Bureau de la Géologie et de l'Exploration Minière de la Province de Jiangxi annonçait des réserves de 15,6 Mt d'OTR dans la province, dont 2,13 Mt d'OTR yttriques. Ces argiles ioniques ont exploitées à grande échelle à des teneurs comprises entre 0,05 et 0,33 % OTR par une multitude d'exploitations de petite taille utilisant une technologie de lixiviation *in situ* des terres rares souvent dévastatrice du point de vue environnemental, des faits de la déforestation nécessaire pour accéder à la ressource et de la pollution des eaux de surface par les lixiviants (fig. 35).

[70] Source des données : http://www.angelfire.com/sc3/faroogs/notes/b8-3-4.htm

Deux gisements de type comparable, encore inexploités, sont connus hors Chine : dans la région d'Antsirabé à Madagascar (société Tantalus, voir 4.2) et Serra Verde au Brésil. Mais leurs ressources de respectivement 280 kt et 180 kt d'OTR sont modestes par rapport aux ressources chinoises.

Figure 35 - Vue satellite d'exploitations d'argiles ioniques de la région de Ganzhou, province du Jiangxi (Chine). La vue couvre une zone d'environ 500 m. de large. © Google Maps.

Enfin, en plus des éventuels enrichissements en Terres Rares dans les parties supérieures de certaines carbonatites, par altération supergène, déjà mentionnés plus haut, certaines bauxites présentent aussi de légers enrichissements en Terres Rares. Certains ont cherché à étudier la possibilité de récupérer des Terres Rares dans les boues rouges résiduelles du raffinage de la bauxite en alumine, mais les teneurs sont très faibles et il est très peu probable que cela soit économiquement faisable dans l'état actuel du marché et des prix.

Les ressources des fonds marins

Les nodules polymétalliques à manganèse qui parsèment quelques régions des fonds océaniques sont connues pour contenir localement des ressources significatives en cobalt (0,2 à 0,6 %), cuivre (0,2 à 1,5 %) et nickel (0,3 à 2 %). La zone à nodule de Clarion-Clipperton, dans le Pacifique oriental, contiendrait, dans ses parties enrichies, de l'ordre de 211 Mt de nodules à 0,1 % OTR (Wall, 2014), soit 0,2 Mt OTR contenues, ce qui est assez modeste. Jébrak et Marcoux (2008) citent un potentiel mondial des nodules à manganèse de 38 Gt. Dans l'hypothèse d'une teneur de 0,1 % OTR, cela représenterait 38 Mt d'OTR contenues, bien inférieures aux réserves terrestres évaluées par l'USGS (130 Mt).

Les contenus en Terres Rares seraient donc très loin de pouvoir justifier des mises en valeur. Seule une exploitation pour d'autres métaux, et en particulier le cobalt, pourrait permettre d'envisager une récupération des Terres Rares en sous-produit. Mais toutes les tentatives d'évaluations économiques préliminaires qui se sont échelonnées depuis les années 1970 ont toujours montré jusqu'à présent une rentabilité décourageante aux cours

actuels des métaux comparativement aux coûts d'exploitation et d'extraction des gisements terrestres.

Les encroûtements à manganèse cobaltifères, quant à eux, qui se forment sur certains reliefs des fonds océaniques, entre 400 et 4 000 m de fond, contiennent aussi des ressources significatives en cobalt (0,7 à 1,7 %) et en divers autres métaux, dont des Terres Rares. L'International Seabed Authority (ISA) cite une teneur moyenne de 0,16 % Ce (ISA, 2003). L'ISA ne publie pas le spectre des Terres Rares contenues ni d'autres teneurs que le cérium, mais Wall (2014) cite une teneur de 0,3 % OTR et un ratio de Terres Rares lourdes élevé, de 6,45 à 10 %. L'ISA cite une estimation (hypothétique) de 1,7 % de la surface du plancher océanique, soit 6,35 Mkm², qui serait couverte par de tels encroûtements, ce qui représenterait un potentiel total de 145 Gt. Dans l'hypothèse d'une teneur moyenne de 0,3 % OTR, cela représenterait un potentiel de 435 Mt OTR, soit 3 fois les réserves terrestres publiées par l'USGS. Comme pour les nodules, il est peu probable que l'exploitation minière des encroûtements cobaltifères sous-marins devienne économique avant plusieurs décennies.

Après la crise sino-japonaise des îles Senkaku de 2010 (cf. 4.6.2) et l'envolée fulgurante du prix des Terres Rares qui s'en est suivie (cf. 5.2.) le Japon a relancé l'exploration des ressources sous-marines. Le JOGMEC a d'une part demandé un permis en zone internationale à l'ISA au large de l'îlot de Miniami Tori Shima pour l'exploration des encroutements cobaltifères polymétalliques, permis obtenu en janvier 2014.

Par ailleurs, le Japon a mis en évidence des teneurs significatives en Terres Rares dans les quelques mètres superficiels des boues sédimentaires marines du Pacifique, en analysant les prélèvements de 51 forages du programme international Deep See Drilling Project / Ocean Drilling Program (DSDP/ODP, 1983-2007) : divers sites surtout concentrés dans les secteurs Sud-Est et du Centre-Nord de l'Océan Pacifique ont fourni des teneurs en Terres Rares de 0,1 à 0,22 %, dont 200 à 430 ppm de Terres Rares lourdes (Kato *et al*., 2011). Des essais de traitement ont montré une lixiviation acide aisée, et ces boues pourraient être envisagées, à long terme (plusieurs décennies). Des journaux ont mentionné un potentiel à 6,8 Mt d'OTR contenues, soit 220 fois la consommation japonaise annuelle de Terres Rares (Hays, 2012, citant Yomiuri Shimbum, 2012).

La chute des prix des Terres Rares de 2012-2015 rend peu probable le développement de telles ressources dans un avenir prévisible.

Les Terres Rares en sous-produits de l'uranium

Au Kazakhstan, des Terres Rares sont récupérées d'une part dans le retraitement des tailings de la mine d'uranium d'Aktau, d'autre part dans les solutions de l'exploitation d'uranium par lixiviation *in situ* à Ulba depuis fin 2014.

Au Canada, de l'yttrium était produit comme sous-produit des mines d'uranium d'Elliot Lake avant leur fermeture en 1996.

La mine d'uranium de Khiagda, en Bouriatie (Fédération de Russie), qui exploite l'uranium par lixiviation *in situ* (ARMZ[71]) prévoit de récupérer des Terres Rares en sous-produit.

[71] www.armz.ru/en/

4.2. RESSOURCES ET RESERVES

4.2.1. Évaluation globale des ressources et réserves en Terres Rares

Il n'existe pas d'estimation exhaustive, suffisamment fiable et homogène des ressources en Terres Rares au niveau mondial.

À l'échelle d'un gisement, il existe désormais des normes précises sur ce que l'on peut qualifier de « ressources » et « réserves », calculées selon des données de terrain fiables et traçables (cf. 1.1), selon l'un des codes reconnus par le Comité pour des Standards Internationaux de Rapportage des Réserves Minérales (CRIRSCO, "Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards", www.crirsco.com). Parmi ces codes, le code australien JORC et les normes canadiennes NI43-101, relativement équivalents du point de vue fiabilité, sont les plus largement utilisées, en particulier par les sociétés minières cotées dans les bourses australiennes ou canadiennes, qui exigent cette transparence.

Mais, si ces normes sont utiles et sont même devenues indispensables pour évaluer la crédibilité d'un gisement donné et en assurer la transparence vis-à-vis des investisseurs boursiers, elles sont loin d'être exhaustives et de donner une idée des ressources et réserves disponibles au niveau mondial et susceptibles d'alimenter effectivement la production minière des prochaines années. En effet, il n'y a pas de publication des ressources et réserves chinoises, ni indiennes, par exemple, selon de telles normes. Pourtant, en pratique, une bonne part des ressources chinoises, non reconnues comme telles par le CRIRSCO, ont une probabilité bien plus grande d'être exploitées dans les prochaines années et d'alimenter l'approvisionnement en Terres Rares que nombre de ressources et réserves inventoriées selon les normes par des sociétés juniors australiennes ou canadiennes. On ne peut donc pas évaluer la criticité de la disponibilité mondiale en Terres Rares sur les seules ressources déclarées par les sociétés occidentales cotées en bourse.

Les sociétés minières qui déclarent leurs réserves et ressources conformément aux normes les publient en général dans leur rapport annuel et/ou sur leur site Internet, d'où ils peuvent être compilés. Divers organismes compilent ces données, en particulier la société étatsunienne SNL (www.snl.com), qui rend ses compilations disponibles sur abonnement payant via son site Internet. D'autres compilations, comme celle de Technology Metals Research (TMR, www.techmetalsresearch.com), intègrent aussi des évaluations de ressources publiées par certaines sociétés non cotées ("private equity") qui ne sont pas conformes aux normes de transparence et de traçabilité (cas par exemple de la société Tanbreez, qui déclare que les ressources de son projet groenlandais Kringlerne seraient parmi les plus importantes du Monde, mais sans publier la moindre donnée factuelle pour étayer cette affirmation).

Même les réserves, voire même les ressources, déclarées selon les nomes CRIRSCO à un moment donné peuvent ne plus l'être quelques mois ou quelques années plus tard : des « réserves » doivent être rentables à exploiter, et un projet peut facilement passer de « économiquement faisable » à « économiquement non-faisable » en quelques mois ou quelques années, du fait de l'amplitude des évolutions des prix des Terres Rares, qui ont encore été divisés par 2 à 4 selon les éléments au cours des deux dernières années (cf. chap.5). À titre d'illustration, le tableau 15 présente les projets Terres Rares les plus avancés détenus ou développés par des sociétés occidentales (hors projets en Chine, Russie, Kazakhstan, …) tels que suivis par TMR, avec leurs ressources en OTR et un calcul de la valeur des OTR contenus par tonne de minerai, qui dépend donc :

- de la teneur du minerai en OTR totaux ;

- de la composition du « panier » de Terres Rares, c'est-à-dire la proportion de chacun des éléments des Terres Rares et en particulier leur teneurs en Terres Rares lourdes les plus chères et ;
- du prix des Terres Rares.

Sur ce tableau ont été reportées les valeurs des OTR contenues dans une tonne de minerai calculé en décembre 2014 et en août 2015. On voit (dernière colonne du tableau) que les minerais ont perdu entre 35 et 45 % de leur valeur en quelque mois. Ils avaient déjà perdu de la valeur au cours des deux années précédentes. Ainsi nombre de ces projets n'ont plus d'intérêt économique à court terme et ne pourront en retrouver qu'avec une nouvelle hausse significative des prix. On constate aussi dans le tableau 15, classé par valeur à la tonne de minerai décroissante, que les projets en bas de tableau, avec de très faibles valeurs à la tonne, ont une probabilité infime d'être développés et de produire dans un futur prévisible, sauf éventuellement si les Terres Rares sont un sous-produit d'une substance principale qui rend le projet rentable.

Le tableau 16 compare différentes estimations des ressources et réserves en Terres Rares, et en propose une synthèse des fourchettes d'évaluations des ressources, les hypothèses basses et hautes étant représentées visuellement en fig. 36.

L'USGS publie chaque année une synthèse des réserves mondiales par pays. Ces réserves intègrent une estimation des réserves chinoises, qui ne sont pas conformes aux normes CRIRSCO. L'USGS a aussi fait passer les réserves estimées aux États-Unis de 13 Mt d'OTR contenus en février 2014 à 1,8 Mt d'OTR en février 2015, en précisant que cette dernière évaluation avait été ajustée pour ne tenir compte que des réserves déclarées selon les normes CRIRSCO, mais en précisant aussi que les évaluations pour les autres pays restaient à ajuster selon les mêmes normes, ce qui laisse supposer que ces évaluations pourraient être révisées dans des proportions similaires.

En fait, une bonne partie des « réserves » états-uniennes désormais retirées du comptage étaient des sables à minéraux lourds et monazite. Mais une partie des réserves brésiliennes et indiennes retenues par l'USGS sont de ce type.

Projets Terres Rares avancés répertoriés par TMR (Technology Metals Research)**, mise à jour du 7/08/2015**

Classés par valeur des terres rares contenues à la tonne de minerai décroissantes (sauf projets satellites adjoints à leur projet principal)

Source : www.techmetalsresearch.com/metrics-indices/tmr-advanced-rare-earth-projects-index/

Projet	Pays	Société(s)	Bourse(s)	Ressources totales de minerai	Teneur en OTR	OTR contenus (kt)	Valeur des TREO in-situ par tonne de minerai		Prix du panier de TR (US$/kg)		Perte de valeur entre 12/14 & 08/15
							août 2015	déc. 2014	08/15	12/14	
Steenkampskraal	Afrique du Su	Great Western Minerals Group Ltd	TSX.V:GWG, OT	0.7 Mt	14.0%	93 kt	2 387 US$/t	3 758 US$/t	17	27	-36.5%
Mount Weld CLD	Australie	Lynas Corporation Ltd	ASX:LYC, OTCQ	14.9 Mt	9.73%	1 454 kt	1 498 US$/t	2 567 US$/t	15	26	-41.6%
Mount Weld Duncan				9.0 Mt	4.84%	435 kt	930 US$/t	1 582 US$/t	19	33	-41.2%
Mrima Hill High Grade	Kenya	Pacific Wildcat Resources Corp	TSX.V:PAW	26.9 Mt	7.04%	1 893 kt	1 025 US$/t	1 760 US$/t	15	25	-41.8%
Mrima Hill Main				132.5 Mt	3.21%	4 252 kt	541 US$/t	926 US$/t	17	29	-41.6%
Mountain Pass	Etats-Unis	Molycorp Inc	NYSE:MCP	31.6 Mt	6.57%	2 072 kt	692 US$/t	1 160 US$/t	11	18	-40.3%
Ngualla	Tanzanie	Peak Resources Ltd	ASX:PEK	41.7 Mt	4.19%	1 748 kt	572 US$/t	969 US$/t	14	23	-41.0%
Araxá	Brésil	MBAC Fertilizer Corp	TSX:MBC, OTC	28.3 Mt	4.21%	1 190 kt	536 US$/t	917 US$/t	13	22	-41.5%
Kangankunde	Malawi	Lynas Corporation Ltd	ASX:LYC, OTCQ	2.5 Mt	4.24%	107 kt	507 US$/t	851 US$/t	12	20	-40.4%
Wigu Hill Twiga	Tanzanie	Montero Mining and Exploration Ltd	TSX.V:MON	0.5 Mt	5.27%	25 kt	442 US$/t	773 US$/t	8	15	-42.8%
Nolans	Australie	Arafura Resources Ltd	ASX:ARU, PK:A	47.2 Mt	2.62%	1 236 kt	438 US$/t	727 US$/t	17	28	-39.8%
Bear Lodge	Etats-Unis	Rare Element Resources Ltd	TSX:RES, MKT:F	57.9 Mt	2.68%	1 553 kt	436 US$/t	749 US$/t	16	28	-41.8%
Glenover	Afrique du Su	JV Galileo Resources / Fer-Mine-Ore	AIM:GLR / n.a.	10.4 Mt	2.13%	221 kt	433 US$/t	743 US$/t	20	35	-41.7%
Hoidas Lake	Canada	Great Western Minerals Group Ltd	TSX.V:GWG, OT	2.8 Mt	2.40%	68 kt	416 US$/t	703 US$/t	17	29	-40.8%
Strange Lake Enriched	Canada	Quest Rare Minerals Ltd	TSX:QRM, MKT:QRM	20.0 Mt	1.44%	288 kt	347 US$/t	531 US$/t	24	37	-34.7%
Strange Lake Granite				472.5 Mt	0.87%	4 118 kt	193 US$/t	297 US$/t	22	34	-35.0%
Nechalacho Basal	Canada	Avalon Rare Metals Inc	TSX:AVL, MKT:AVL	125.7 Mt	1.43%	1 799 kt	336 US$/t	535 US$/t	23	37	-37.2%
Nechalacho Upper				177.7 Mt	1.32%	2 353 kt	257 US$/t	417 US$/t	19	32	-38.4%
Xiluvo	Mozambique	Promac Lda.	N/A	1.1 Mt	2.03%	23 kt	331 US$/t	562 US$/t	16	28	-41.1%
Ashram MHREO	Canada	Commerce Resources Corp	TSX.V:CCE, OTCQX:CMRZ F, F:D7H	9.4 Mt	1.61%	151 kt	300 US$/t	513 US$/t	19	32	-41.5%
Ashram Main				239.7 Mt	1.90%	4 549 kt	281 US$/t	479 US$/t	15	25	-41.3%
Zandkopsdrift (JV)	Afr. du Sud	JV Frontier Rare Earths / Korea Resour	TSX:FRO, PK:FR	46.8 Mt	1.89%	886 kt	298 US$/t	617 US$/t	16	28	-51.7%
Niobec	Canada	Magris Resources Inc (ex-Iamgold Corp	N/A	1 058.6 Mt	1.73%	18 363 kt	267 US$/t	450 US$/t	15	26	-40.7%
Sarfartoq	Groenland	Hudson Resources Inc	TSX.V:HUD, OT	8.3 Mt	1.72%	143 kt	267 US$/t	451 US$/t	16	26	-40.8%
Yangibana (JV)	Australie	JV Hastings Rare Metals Ltd / Rare Eart	ASX:HAS / AIM:	6.8 Mt	1.52%	103 kt	258 US$/t	-	17	-	
Cummins Range	Australie	Navigator Resources Ltd	ASX:NAV	4.9 Mt	1.74%	85 kt	243 US$/t	414 US$/t	14	24	-41.3%
Songwe Hill	Malawi	Mkango Resources Ltd	TSX.V:MKA	31.8 Mt	1.48%	469 kt	241 US$/t	411 US$/t	16	28	-41.4%
Browns Range	Australie	Northern Minerals Ltd	ASX:NTU	9.0 Mt	0.63%	57 kt	218 US$/t	396 US$/t	35	53	-44.9%
Montviel	Canada	Geomega Resources Inc	TSX.V:GMA	266.6 Mt	1.45%	3 878 kt	204 US$/t	339 US$/t	14	23	-39.8%
Lofdal	Namibie	Namibia Rare Earths Inc	TSX:NRE	1.7 Mt	0.59%	10 kt	199 US$/t	317 US$/t	34	54	-37.2%
Foxtrot	Canada	Search Minerals Inc	TSX.V:SMY	14.4 Mt	1.01%	146 kt	198 US$/t	310 US$/t	20	31	-36.1%
Two Tom	Canada	Canada Rare Earth Corp	TSX.V:LL	40.6 Mt	1.18%	480 kt	180 US$/t	296 US$/t	15	25	-39.2%
Lavergne-Springer	Canada	Canada Rare Earth Corp	TSX.V:LL	16.9 Mt	1.16%	197 kt	170 US$/t	290 US$/t	15	25	-41.4%
Dubbo Zirconia	Australie	Alkane Resources Ltd	ASX:ALK, OTCQ	73.2 Mt	0.89%	651 kt	162 US$/t	254 US$/t	18	29	-36.2%
Kvanefjeld	Groenland	Greenland Minerals and Energy Ltd	ASX:GGG, PK:GDLNF	673.0 Mt	1.09%	7 369 kt	159 US$/t	247 US$/t	15	23	-35.6%
Zone 3				95.3 Mt	1.16%	1 106 kt	154 US$/t	252 US$/t	13	22	-38.9%
Sørensen				242.0 Mt	1.10%	2 667 kt	149 US$/t	244 US$/t	14	22	-38.9%
Bokan	Etats-Unis	Ucore Rare Metals Inc	TSX.V:UCU, OT	5.8 Mt	0.60%	35 kt	155 US$/t	246 US$/t	26	40	-37.0%
Norra Kärr	Suède	Tasman Metals Ltd	TSX.V:TSM, MK	31.1 Mt	0.61%	188 kt	154 US$/t	230 US$/t	25	39	-33.0%
Olserum	Suède	Tasman Metals Ltd	TSX.V:TSM, MK	7.8 Mt	0.62%	48 kt	148 US$/t	228 US$/t	24	37	-35.1%
Kringlerne	Groenland	Tanbreez (Rimbal Pty Ltd)	N/A	4 300.0 Mt	0.65%	28 058 kt	132 US$/t	208 US$/t	20	32	-36.5%
Clay-Howells	Canada	Canada Rare Earth Corp	TSX.V:LL	8.5 Mt	0.73%	62 kt	131 US$/t	216 US$/t	18	30	-39.4%
Kipawa	Canada	Matamec Explorations Inc	TSX.V:MAT, OT	27.1 Mt	0.39%	107 kt	92 US$/t	145 US$/t	23	37	-36.6%
Kutessay II	Kirghizstan	Stans Energy Corp	TSX.V:HRE, OT	18.0 Mt	0.26%	47 kt	86 US$/t	128 US$/t	33	50	-32.8%
Brockmans	Australie	Hastings Rare Metals Ltd	ASX:HAS	36.2 Mt	0.21%	76 kt	71 US$/t	106 US$/t	34	51	-33.0%
Storkwitz	Allemagne	Seltenerden Storkwitz AG	N/A	4.5 Mt	0.45%	20 kt	60 US$/t	102 US$/t	13	23	-41.2%
Serra Verde	Brésil	Mining Ventures Brasil Ltda.	N/A	909.0 Mt	0.16%	1 454 kt	30 US$/t	46 US$/t	19	29	-34.8%
Elliott Lake Teasdale	Canada	Appia Energy Corp	N/A	51.6 Mt	0.19%	98 kt	28 US$/t	45 US$/t	15	24	-37.8%
Eco Ridge	Canada	Pele Mountain Resources Inc	TSX.V:GEM, OT	59.3 Mt	0.16%	93 kt	25 US$/t	39 US$/t	16	25	-35.9%
Round Top	Etats-Unis	Texas Rare Earth Resources Corp	OTCQX:TRER	905.9 Mt	0.06%	573 kt	15 US$/t	23 US$/t	24	36	-34.8%
Tantalus	Madagascar	Tantalus Rare Earths AG	F:TAE:GR	627.7 Mt	0.08%	562 kt	15 US$/t	25 US$/t	19	30	-40.0%
Aksu Diamas	Turquie	AMR Mineral Metal Inc	N/A	494.0 Mt	0.07%	345 kt	11 US$/t	19 US$/t	16	27	-42.1%
Milo	Australie	GBM Resources Ltd	ASX:GBZ	187.0 Mt	0.06%	115 kt	10 US$/t	18 US$/t	17	29	-44.4%
Grande-Vallée	Canada	Orbite Aluminae Inc	TSX:ORT, OTCQ	1 209.6 Mt	0.05%	606 kt	9 US$/t	14 US$/t	17	27	-35.7%
La Paz	Etats-Unis	Formerly AusROC Metals Ltd	ASX:ARK	128.2 Mt	0.04%	56 kt	9 US$/t	16 US$/t	21	36	-43.8%
Charley Creek	Australie	JV Crossland Strategic Metals / Pancon	ASX:CUX / TSX.	805.3 Mt	0.03%	235 kt	6 US$/t	10 US$/t	20	33	-40.0%
Buckton + Buckton Sou	Canada	DNI Metals Inc	TSX.V:DNI, F:D	3 930.2 Mt	0.03%	1 002 kt	5 US$/t	9 US$/t	21	35	-44.4%
				TOTAL		**100 018 kt**					

Tableau 15 - Projets Terres Rares avancés détenus ou développés par des sociétés occidentales répertoriés par TMR (Technology Metals Research) au 7/08/2015.

Evaluation des ressources et réserves de Terres Rares selon les sources, en milliers de tonnes (kt) d'oxydes de Terres Rares (OTR).

		Evaluation des réserves						Evaluation des ressources					
Pays		selon USGS fév.2015	selon Wall, 2014	Compila-tion SNL 2015	d'après Roskill 2015	Synthèse BRGM hypthèse basse	Synthèse BRGM hypthèse haute	selon TMR août 2015	Compila-tion SNL 2015	d'après Roskill 2015	Synthèse BRGM hypthèse basse	Synthèse BRGM hypthèse haute	Remarques
Afrique du Sud	Steenkampskraal, Zandkopsdrift, Glenover			64 kt		64 kt	64 kt	1 200 kt	1 457 kt	10 030 kt	1 457 kt	1 457 kt	
	Palabora			978 kt					978 kt	978 kt			TR non valorisées
	Total Afrique du Sud			**1 042 kt**		**64 kt**	**64 kt**	**1 200 kt**	**2 435 kt**	**11 008 kt**	**1 457 kt**	**1 457 kt**	
Allemagne							**18 kt**	**20 kt**	**18 kt**			**18 kt**	
Arabie Saoudite							**489 kt**		**489 kt**			**489 kt**	
Australie	Mount Weld			1 135 kt	1 891 kt	1 895 kt	1 891 kt	1 889 kt	1 895 kt	1 135 kt	1 895 kt	1 895 kt	
	Autres (Nolans Bore, Browns Range, etc.)			672 kt	324 kt	324 kt	672 kt	2 558 kt	1 784 kt	1 932 kt	1 784 kt	2 558 kt	
	Monazite sables de plage									3 660 kt		3 660 kt	
	Total Australie	**3 300 kt**	**1 600 kt**	**1 807 kt**	**2 215 kt**	**2 219 kt**	**2 563 kt**	**4 447 kt**	**3 679 kt**	**6 727 kt**	**3 679 kt**	**8 113 kt**	
Brésil	Araxa, Serra Verde			151 kt	7 460 kt	151 kt	7 460 kt	2 644 kt	2 003 kt	8 119 kt	2 003 kt	8 119 kt	
	Monazite sables de plage							n.c.		1 902 kt		1 902 kt	
	Total Brésil	**22 002 kt**	**48 kt**	**151 kt**	**7 460 kt**	**151 kt**	**7 460 kt**	**2 644 kt**	**2 003 kt**	**10 021 kt**	**2 003 kt**	**10 021 kt**	
Canada		**900 kt***		**805 kt**	**329 kt**	**8 565 kt**	**8 565 kt**	**38 358 kt**	**36 361 kt**	**8 565 kt**	**8 565 kt**	**8 565 kt**	
Chine	Bayan Obo (Mongolie-Int.)			56 940 kt	43 500 kt	43 500 kt	56 940 kt		56 940 kt	178 500 kt	56 940 kt	178 500 kt	
	7 provinces Sud-Chine				1 600 kt	1 600 kt	1 600 kt		1 000 kt	51 600 kt	1 000 kt	51 600 kt	Les données Roskill 2015 citent le "Baotou RE High Tech Industrial Development Zone Administration Committee", Sept.2014
	Liangshan** (Sichuan)			1 800 kt	1 500 kt	1 500 kt	1 800 kt		4 030 kt	2 000 kt	4 030 kt	2 000 kt	
	Weishan (Shandong)				4 000 kt	4 000 kt	4 000 kt		2 550 kt	5 300 kt	2 550 kt	5 300 kt	
	Zhijin (Guizhou)									150 kt		150 kt	
	Autres				1 500 kt	1 500 kt	1 500 kt		15 kt	225 kt	15 kt	225 kt	
	Total Chine	**55 220 kt**	**55 000 kt**	**58 740 kt**	**52 100 kt**	**52 100 kt**	**65 840 kt**	**n.c.**	**64 535 kt**	**237 775 kt**	**64 535 kt**	**237 775 kt**	
Etats-Unis	Mountain Pass			1 334 kt	1 470 kt	1 334 kt	1 470 kt	2 072 kt	1 334 kt	2 070 kt	1 334 kt	2 070 kt	
	Autres (Round Top, Bear Lodge, Bokan, etc.)			183 kt	224 kt	183 kt	224 kt	2 217 kt	4 713 kt	539 kt	4 713 kt	4 713 kt	
		1 920 kt	**13 000 kt**	**1 517 kt**	**1 694 kt**	**1 517 kt**	**1 694 kt**	**4 289 kt**	**6 047 kt**	**2 609 kt**	**6 047 kt**	**6 783 kt**	
Finlande									**12 kt**			12 kt	
Groenland				**1 528 kt**			**1 528 kt**	**39 343 kt**	**11 256 kt**	**10 330 kt**	**11 256 kt**	**39 343 kt**	TMR inclut les ressources spéculatives de Tanbreez
Inde	Monazite sables de plage	**3 172 kt**	**3 100 kt**					**n.c.**	**3 150 kt**	**5 900 kt**		**3 150 kt**	Estimation de Roskill 2015 citant AMD
Kenya								**6 145 kt**	**6 139 kt**		**6 139 kt**	**6 139 kt**	
Kirghizstan								**47 kt**	**47 kt**	**43 kt**	**47 kt**	**47 kt**	
Madagascar								**562 kt**	**562 kt**		**562 kt**	**562 kt**	
Malaisie		**43 kt**					**43 kt**	n.c.				43 kt	
Malawi				**136 kt**			**136 kt**	**576 kt**	**584 kt**	**107 kt**	**584 kt**	**584 kt**	
Mongolie									**1 100 kt**			1 100 kt	
Mozambique								**23 kt**	**23 kt**		**23 kt**	**23 kt**	
Namibie								**10 kt**	**18 kt**		**18 kt**	**18 kt**	
Russie		**19 000 kt***	**19 000 kt**		**153 kt**		**153 kt**	**n.c.**	**23 611 kt**	**7 544 kt**	**23 611 kt**	**23 611 kt**	
Kazakhstan													
Sri Lanka		**0.2 kt**						n.c.					
Suède				**140 kt**			**140 kt**	**236 kt**	**258 kt**	**343 kt**	**258 kt**	**343 kt**	
Tanzanie				**941 kt**			**940 kt**	**1 773 kt**	**1 055 kt**	**4 407 kt**	**1 055 kt**	**4 407 kt**	
Turquie								**345 kt**				345 kt	
Vietnam									**7 064 kt**	**21 948 kt**	**7 064 kt**	**21 948 kt**	
Autres		**21 117 kt**	**22 030 kt**										
TOTAL		**126 674 kt**	**113 778 kt**	**66 807 kt**	**63 951 kt**	**64 617 kt**	**89 634 kt**	**100 018 kt**	**170 447 kt**	**327 328 kt**	**136 904 kt**	**374 896 kt**	

** Dans son document de 2015, l'USGS a accumulé dans "Autres" (totalisé à 41 017 kt) les 900 kt de réserves attribuées au Canada en 2011 et les 19 000 kt attribuées à la CEI (Russie + Kazakhstan) en 2012*

*** Préfecture dans laquelle se trouvent les mines en production de Maoniuping et de Dalucao*

Tableau 16 - Récapitulatif des réserves et ressources mondiales en Terres Rares par pays, en kt de TR contenues, selon différentes sources.

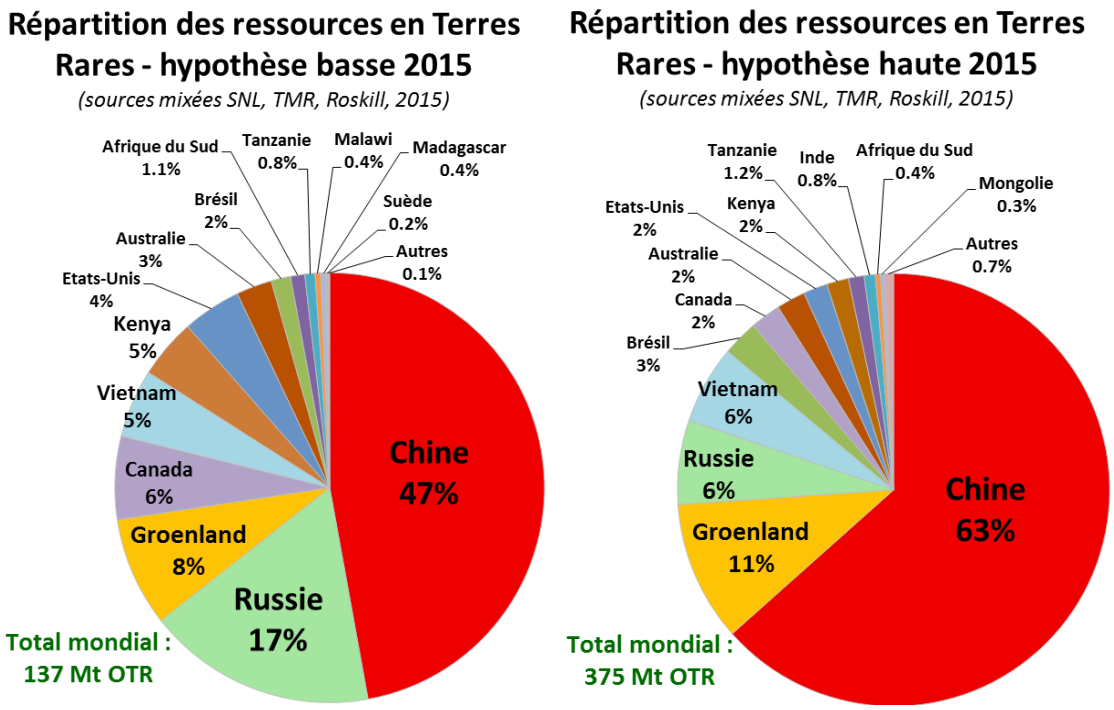


Figure 36 - Répartition par pays des ressources identifiées en Terres Rares, à des degrés divers de fiabilité. Hypothèses basses et hautes selon les sources (cf. tab. 16).

En ce qui concerne les réserves, (colonnes de gauche du tableau 16), il est difficile de certifier la validité des chiffres publiés, déjà globalement, puisque d'une part la Chine ne publie pas d'état des réserves de ses gisements selon les normes internationalement reconnues, et d'autre part les calculs de réserve réalisés sur les plus avancés des projets menés par des sociétés occidentales ont été fait sur la base de prix qui étaient bien supérieurs aux prix présents, et ne sont donc plus valides aujourd'hui. Ces évaluations seraient encore plus douteuses et approximatives si on en voulait le détail pour chacune des Terres Rares.

Ces évaluations de réserves, même imprécises et douteuses, sont néanmoins des indicateurs intéressants : les réserves chinoises, évaluées *a minima* à 52,1 Mt OTR, correspondent, en tonnage global d'oxydes de Terres Rares, à 413 ans de production au niveau de 2014 (126 kt OTR), et les réserves mondiales, évaluées *a minima* à 56,4 Mt OTR, correspondent à 447 ans de production au niveau de 2014 (Tab.17).

Quant aux ressources, même leur évaluation la plus basse (136,9 Mt) correspond à plus de 900 ans d'exploitation au rythme actuel.

Dans l'hypothèse d'une croissance de la demande et de la production de 6 % par an, ces réserves et ressources seraient encore suffisantes pour assurer 54 à 86 ans d'approvisionnement (tab.17).

	Production 2014	Réserves	Durée équivalente à prod. constante équiv.à 2014	Durée de vie à production croissante à 6%/an	Ressources	Durée équivalente à prod. constante équiv.à 2014	Durée de vie à prod. croissante à 6%/an
Chine	126 kt	52.1 à 65.8 Mt	413 à 523 ans	55 à 59 ans	64.5 à 237.8 Mt	512 à 1887 ans	59 à 81 ans
Monde	145 kt	64.6 à 89.6 Mt	447 à 620 ans	56 à 72 ans	136.9 à 374.9 Mt	947 à 2593 ans	69 à 86 ans

Tableau 17 - Équivalence des réserves et ressources en Terres Rares en années de production (fourchettes correspondant aux hypothèses basses et hautes du tableau 15).

Ces évaluations sont cependant purement indicatives. D'une part de nouvelles explorations pourront identifier de nouvelles ressources et certifier de nouvelles réserves. D'autre part, ces évaluations globales ne tiennent pas compte de la distribution des différents éléments des Terres Rares dans les différents gisements. Les Terres Rares lourdes ne sont significativement présentes que dans une minorité des gisements. Les données précises sur les ressources et réserves chinoises par élément sont cependant insuffisantes pour permettre de décliner ces calculs pour chaque élément.

Il est toutefois vraisemblable que, même pour les Terres Rares lourdes, les réserves et ressources en terre soient suffisantes pour permettre les approvisionnements à court et moyen terme.

4.2.2. Les gisements de Terres Rares dans le monde

La figure 37 montre la répartition mondiale des principaux gisements de Terres Rares identifiés.

Les principaux gisements connus et exploités se trouvent en Chine, répartis dans plusieurs provinces. Le plus important est le gisement de Bayan Obo, en Mongolie Intérieure, dont les réserves sont estimées à 43,5 Mt OTR, soit plus de 80 % des réserves chinoises et plus de 60 % des réserves mondiales (Roskill, 2015). La mine extrait de la bastnaesite et de la monazite comme sous-produit d'une mine de fer, à des teneurs de 5,2 à 5,4 % OTR, principalement légères (cf. tab.14 et 4.1.3). Elle produit de l'ordre de 55 kt/an d'OTR.

Parmi les autres gisements importants exploités en Chine, citons :

- le gisement de Weishan (ou Huishan), dans le Shandong, qui produit de la bastnaésite. Sa teneur serait de l'ordre de 1,6 % OTR (Roskill, 2015) ;
- les gisements de bastnaésite de Maoniuping et Dalucao, dans le Sichuan, ;Les argiles ioniques du sud-est de la Chine (Longnan, Ganzhou, Xunwu dans le Jiangxi, Hezhou dans le Guangxi, Caowu dans le Guangdong, Jianghua dans le Hunan), avec des teneurs globales assez faibles (<0,1 % OTR), mais caractérisées par un très net appauvrissement en cérium, qui est partout ailleurs la Terre Rare dominante, et donc un enrichissement dans les autres Terres Rares et souvent en Terres Rares lourdes, comme à Longnan (cf. tab.14) ;

Dans le reste du monde, les principaux gisements exploités sont Mount Weld, en Australie, Mountain Pass (Californie, États-Unis), Lovozero (Russie), des sables de plage à monazite en Inde (Odisha, Andhra Pradesh).

Le tableau 18 récapitule les principaux gisements en exploitation dans le monde hors de Chine et les principaux nouveaux projets d'exploitation minière qui ont fait l'objet d'études avancées.

Jusqu'à 2012-2013, nombre de ces projets étaient effectivement actifs dans leur développement. La poursuite de la chute des prix des Terres Rares en 2014 a conduit nombre d'entre eux à se mettre en sommeil. D'autres peinent à trouver des financements suffisants, d'autant que les estimations d'investissements nécessaires (colonne « Capex » du tableau 18) sont généralement de plusieurs centaines de millions de dollars US, voir plus d'un milliard de dollars US.

Ces recherches de nouveaux gisements de Terres Rares sur divers continents et hors de Chine, et les travaux qui ont y ont été mené pour en définir les ressources pendant les années 2010-2012 alors que les prix élevés des Terres Rares les motivaient, ont au moins eu le mérite d'identifier de nombreuses cibles à Terres Rares. Même si elles sont souvent devenues non-économiques, au moins la connaissance existe et ces gisements pourront être re-développés en cas de nouveau déficit de l'offre et remontée des prix.

Les projets les plus avancés ont fait l'objet de montages de partenariats, souvent avec des entreprises asiatiques (Chine, Japon, Corée), au moins pour des contrats d'off-take[72]. La Chine reste active dans la recherche de prise de position dans certains projets.

[72] Ou contrat d'enlèvement. Signé entre un producteur et un fournisseur donnés, ce type de contrat consiste à vendre à l'avance tout ou partie de la production à un prix fixé lui aussi à l'avance. Il permet aux deux parties de limiter les risques liés à la spéculation sur les prix (limitant à la fois les pertes et les profits potentiels), tout en garantissant l'écoulement de la production d'une part et l'approvisionnement d'autre part.

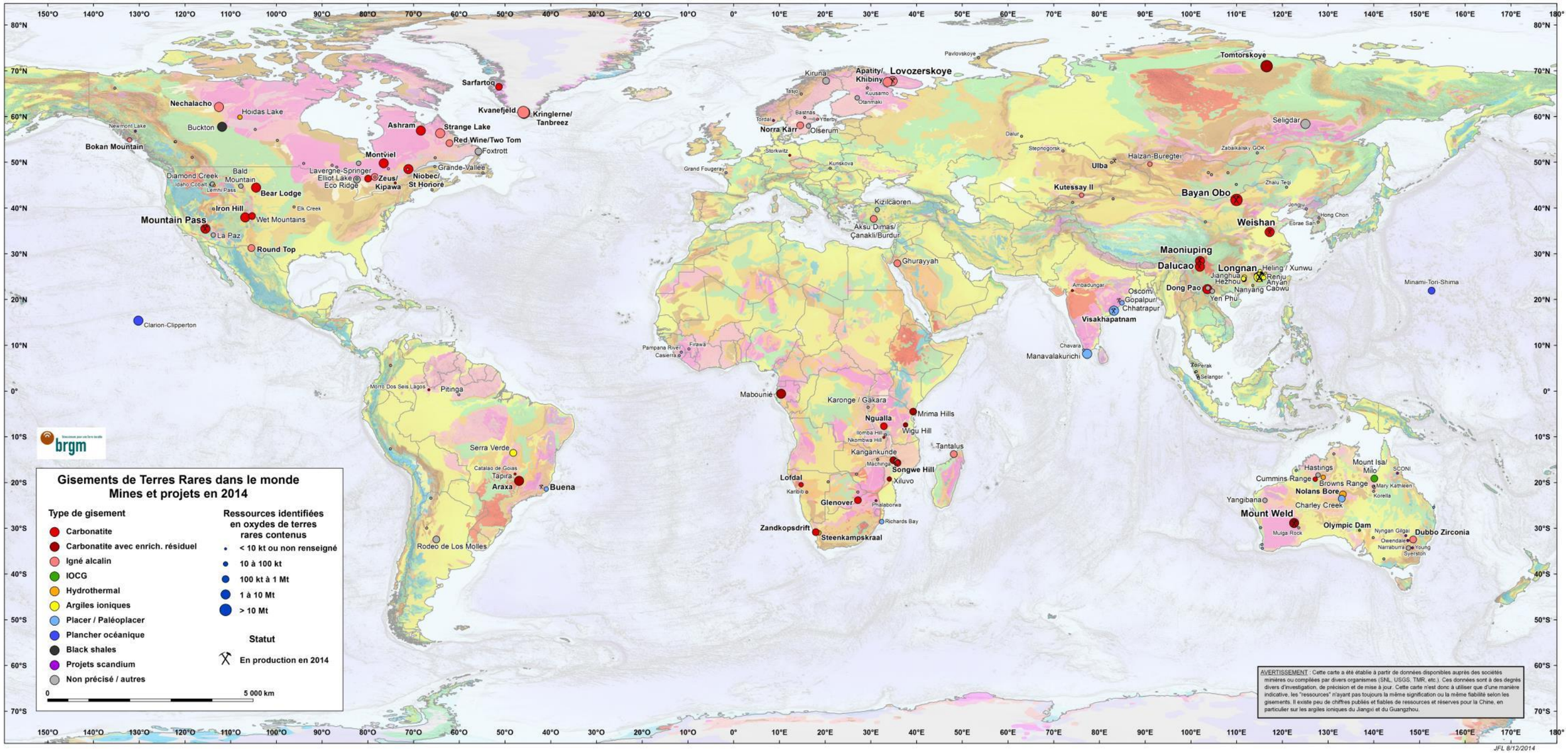


Figure 37 - Localisation des principales mines et principaux gisements mondiaux de Terres Rares (BRGM, 2014).

Principaux nouveaux projets de Terres Rares en développement en 2015 hors Chine

Pays	Projet	Société	Production 2014 (kt OTR)	Capacité ciblée (kt OTR)	Teneur OTR	Type de gisement	Date de démar-rage	Ratio TR lourdes	Capex	Site web de l'opérateur
En production										
Australie	**Mt Weld**	**Lynas Corp**	**7.19 kt**	**11 kt/a**	**11.70%**	Carbonatite + enrich.résiduel	**2013**	3.5%	676 MUS$	www.lynascorp.com
Russie	**Karnasurt - Umbozero**	**Solikamsk Magnedium Works**	**2.13 kt**	**4 kt/a**		Igné alcalin	**1951**	0.4%		www.smw.ru
En production suspendue mi-2015 ("care and maintenance")										
USA	**Mountain Pass**	**Molycorp**	**4.77 kt**	**19 kt/a**	**9.50%**	Carbonatite	**2011**	0.6%	**1 300 MUS$**	www.molycorp.com
En préproduction										
Kazakhstan	**Ulba tailings**	SARECO (Kazatomprom 51% / Sumitomo 49%)		**1.5 kt/a**	n.c.		**2014**	**27.7%**	200 MUS$	www.kazatomprom.kz
Vietnam	**Dong Pao**	Toyota Tsusho Corp 24.5%, Sojitz Corp.24.5%, Vietnam Govt 51%		**3 kt/a**	**4.50%**	Carbonatite	**2014**	2.5%		www.vinacomin.vn
Projets avec date de démarrage annoncée par la société										
Australie	**Browns Range**	Northern Minerals 84%, Australia Conglin Intl Invest. Ltd		**3.25 kt/a**	**0.63%**	Hydrothermal	**2017 ?**	**86.3%**	314 MUS$	http://northernminerals.com.au
Australie	**Dubbo**	Alkane Resources		**4.9 kt/a**	**0.89%**	Igné alcalin	**2016 ?**	**21.4%**	nc	www.alkane.com.au
Australie	**Nolans Bore**	Arafura Resources		**20 kt/a**	**2.78%**	Hydrothermal	**<2020**	3.2%	1 437 MUS$	www.arultd.com
Afrique du Sud	**Glenover**	Galileo Resources 81.35%; Galagen Ltd 6.83%		n.c.	**1.33%**	Carbonatite		6.6%	233 MUS$	www.glenover.com
Afrique du Sud	**Steenkampskraal**	Great Western Minerals Group 74%;		**5 kt/a**	**14.93%**	Hydrothermal		0.7%	119 MUS$	www.gwmg.ca
Afrique du Sud	**Zandkopfsdrift**	Frontier Rare Earths 50% ; KORES 50%		**20 kt/a**	**2.17%**	Carbonatite + enrich.résiduel	**2016 ?**	7.4%	910 MUS$	www.frontierrareearths.com
Brésil	**Araxa**	MBAC Fertilizer Group		**9 kt/a**	**4.21%**	Carbonatite	**2016 ?**	2.5%	406 MUS$	www.mbacfert.com
Brésil	**Serra Verde**	Serra Verde Mineracao Ltda 100%		**5 kt/a**	**0.16%**	Xénotime colluvionnaire	**2017 ?**	**23.0%**		
Canada	**Ashram**	Commerce Resources Corp		**16.9 kt/a**	**1.88%**	Carbonatite	**2017 ?**	3.9%	759 MUS$	www.commerceresources.com
Canada	**Nechalacho / Thor Lake**	Avalon Rare Metals		**9.3 kt/a**	**1.44%**	Igné alcalin	**2016 ?**	**14.8%**	1 510 MUS$	www.avalonrarematals.com
Canada	**Kipawa / Zeus**	Matamec Exploration		**3.7 kt/a**	**0.41%**	Igné alcalin	**2016 ?**	**33.0%**	313 MUS$	www.matamec.com
Canada	**Montviel**	GeoMega Resources		n.c.	**1.45%**	Carbonatite		1.7%		http://ressourcesgeomega.ca
Canada	**Strange Lake**	Quest Rares Minerals		**10.4 kt/a**	**1.16%**	Igné alcalin	**2017 ?**	**49.7%**	2 565 MUS$	www.questraminerals.com
Groenland	**Kvanefjeld**	Greenland Minerals and Energy		**22.9 kt/a**	**1.08%**	Igné alcalin	**2016 ?**	10.5%	1 361 MUS$	www.ggg.gl
Inde	**Gopalpur/ Chhatra-pur/ Visakhapatnam**	IREL ; Toyota Tsusho Rare Earth India ; Shin Etsu		**4.0 kt/a**	**3.00%**	Placer	**2020**	1.3%		
Tanzanie	**Ngualla**	Peak Resources		**10.1 kt/a**	**4.55%**	Carbonatite	**2016 ?**	2.0%	400 MUS$	www.peakresources.com.au
USA	**Bear Lodge**	Rare Element Resources		**6.8 kt/a**	**2.61%**	Carbonatite	**2017 ?**	4.2%	88 MUS$	www.rareelementresources.com
USA	**Bokan Mountain**	Ucore Rare Metals		**2.3 kt/a**	**0.61%**	Igné alcalin	**2017 ?**	**37.5%**	221 MUS$	http://ucore.com
USA	**Round Top**	Texas Rare Earth Resources		**10.8 kt/a**	**0.033%**	Igné alcalin	**2018 ?**	**73.0%**	292 MUS$	www.trer.com
Projets sans date de démarrage annoncée par la société										
Canada	**Hoidas Lake**	Star Minerals 51%; Great Western Minerals Group 49%		n.c.	**2.40%**	Hydrothermal	n.c.	3.5%		www.starminerals.ca
Groenland	**Sarfatoq**	Hudson Resources		**6.5 kt/a**	**1.72%**	Carbonatite	n.c.	2.5%	339 MUS$	www.hudsonresources.ca
Malawi	**Songwe Hill**	Mkango Resources		**2.8 kt/a**	**1.60%**	Carbonatite	n.c.	7.3%	217 MUS$	www.mkango.ca
Namibie	**Lofdal**	Namibia Rare Earths		**1.5 kt/a**	**0.59%**	Carbonatite	n.c.	**83.5%**	93 MUS$	www.namibiararearths.com
Suède	**Norra Kärr**	Tasman Metals		**5.1 kt/a**	**0.59%**	Igné alcalin	n.c.	**50.3%**	378 MUS$	www.tasmanmetals.com
Projets en suspens / en sommeil										
Canada	**Niobec / St Honoré**	Niobec (Magris Resources)		n.c.	**1.74%**	Carbonatite	projet TR suspendu	1.7%		http://niobec.com
Kirghizstan	**Kutessay II**	Anciennement Stans Energy, litige juridique avec le gouvt Kirghize		n.c.	**0.26%**	Igné alcalin	projet suspendu	**85.8%**		www.stansenergy.com
Mada-gascar	**Tantalus**	Tantalus Rare Earths AG		n.c.	**0.08%**	Igné alcalin	projet différé	**19.5%**		www.tre-ag.com
Malawi	**Kangankunde**	Lynas Corp		n.c.	**4.24%**	Carbonatite + enrich.résiduel	projet différé	0.8%		www.lynascorp.com
TOTAL				**203 kt/a**						
Chine	**Bayan Obo**	China Northern Rare Earths Group	n.c.	**55 kt/a**	**3.90%**	Carbonatite	**1957**	2.0%		www.reht.com

Tableau 18 - Les principaux projets miniers de Terres Rares en développement en 2015 (hors Chine).

4.2.3. Les indices de Terres Rares en France

France métropolitaine

J. Melleton, J. Gouin et E. Gloaguen, géologues du BRGM, avaient rédigé en novembre 2012 une note sur les indices de Terres Rares en France, largement reprise ci-dessous.

Les seuls gîtes de Terres Rares relativement documentés en France métropolitaine sont les schistes d'origine détritique à nodules de monazite grises de Bretagne, et en particulier dans les schistes ordoviciens des environs du Grand-Fougeray (Ille-et-Vilaine), mais aussi de Corlay (Côtes d'Armor) et de Châteauneuf-du-Faou (Finistère), et surtout les placers associés, dans lesquels ces nodules de monazite se retrouvent concentrés (Fig. 38 et 39). Le plus important et le mieux documenté est celui du Grand-Fougeray.

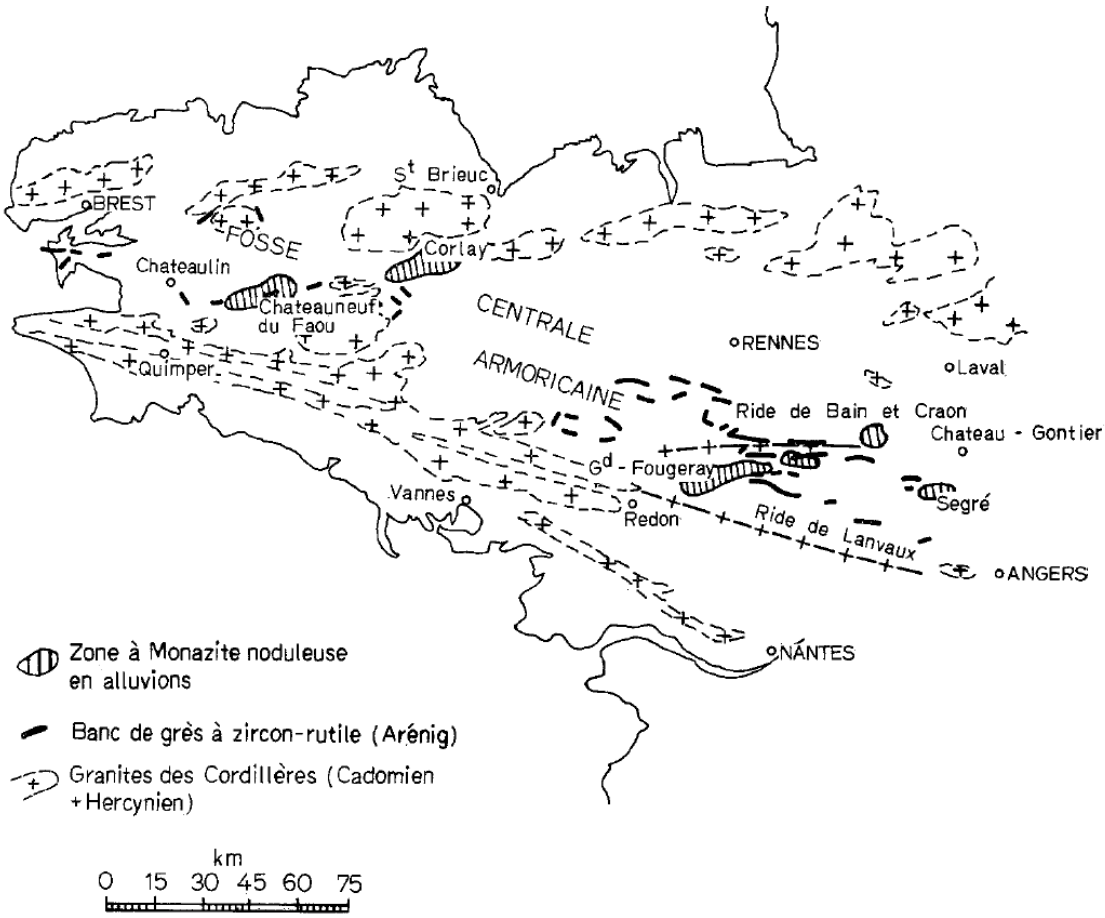


Figure 38 - Les principaux placers à monazite grise de Bretagne (extrait de Donnot et al. *1973).*

Des tonnages dans les placers avaient été estimés en 1969 dans les alluvions des rivières de l'Aron et du Gras (secteur du Grand Fougeray). Ils sont relativement modestes : 1 900 t de monazite contenues dans des graviers argileux, à des teneurs de 2 à 2,6 kg de monazite par tonne, à la teneur de coupure de 1 kg/t. Mais cette monazite est exceptionnellement riche en europium (0,2 % à 1 % Eu_2O_3), qui était, dans les années 1970-1980, la Terre Rare la plus recherchée (application comme luminophore dans les écrans cathodiques couleur). Ces monazites contiennent également 13 à 14 % Nd_2O_3., et sont avantagées par des teneurs particulièrement pauvres en thorium (<1% ThO_2).

Des essais d'exploitation ont eu lieu durant l'hiver 1967-1968 sur le site de la Monnerie dans la rivière de l'Aron, au cours desquels 78 tonnes de monazite ont été extraites et commercialisées.

Figure 39 - Concentré de monazite grise nodulaire à europium du Grand Fougeray (Photo S. Colin, BRGM).

Les études sont cependant anciennes (travaux entre 1968 et 1969, rapportés par Donnot et al, BRGM, 1973), avec des études très ponctuelles et limitées depuis lors. De nouvelles analyses ont indiqué des teneurs intéressantes en dysprosium (0,25 % Dy) et terbium (0,1 % Tb). Ces gisements sont de taille extrêmement modeste par rapport aux gisements étudiés et évalués ces dernières années dans le monde, et ils n'ont pas d'intérêt économique avec les cours récents des Terres Rares. Toutefois, en cas de nouvelle envolée des prix des Terres Rares comme en 2011, leur potentiel économique pourrait être réévalué, en prenant en compte l'ensemble des Terres Rares lourdes. De plus, une exploitation de placer peut se faire à échelle modeste, de type gravière, avec des investissements limités.

Les schistes eux-mêmes peuvent contenir de 50 à 200 g/t de nodules de monazite authigéniques[73], et leur inventaire et leur délimitation resteraient à réaliser.

Des niveaux similaires de schistes à nodules de monazite et placers associés sont connus aussi en Mayenne, dans le sud du Massif Central, dans les Ardennes et dans les Pyrénées (Massif de l'Arize, Pyrénées ariégeoises) (Lacomme *et al*., BRGM, 1993).

Il existe quelques autres indices de Terres Rares en France, mais ce sont davantage des curiosités minéralogiques que des gisements potentiels (Massif Central, Massif Armoricain, Estérel, Pyrénées). On pourra mentionner le gisement de talc de Trimouns, à Luzenac, en Ariège, l'une des plus grosses exploitations de talc mondiales (Imerys), dans lesquels de la bastnaesite et de nombreux autres minéraux de Terres Rares ont été décrits, mais sans qu'un intérêt économique en ait été soulevé ou étudié jusqu'à présent. Des minéraux à Terres Rares sont connus dans diverses formations intrusives (syénites de la baie de Morlaix, granites hyperalcalins de la région d'Evisa en Corse, diverses pegmatites) ou volcaniques (Cantal). Elles sont généralement disséminées, mais les éventuels niveaux d'altération supergènes associés mériteraient d'être examinés. Des occurrences sont aussi connues dans les formations cambriennes des Cévennes (niveaux phosphatés puissants

[73] ayant cristallisé au sein des schistes.

mais discontinus à 0,1-0,22 % U, 0,1-0,18 % Th et 0,17-0,25 % REE) et de la Montagne Noire (niveaux de 2-3 m de shales noires à clastes et nodules phosphatés 5-20 ppm Th, 10-40 ppm U et 0,03 à 0,21 % REE) (Laval *et al*., BRGM, 1990).

Ces divers indices de Terres Rares sont localisés sur la figure 40.

Parmi d'autres sujets plus atypiques, on pourrait regarder les boues rouges résiduelles du raffinage des bauxites à Gardanne (RioTinto-Alcan, ex-Péchiney).

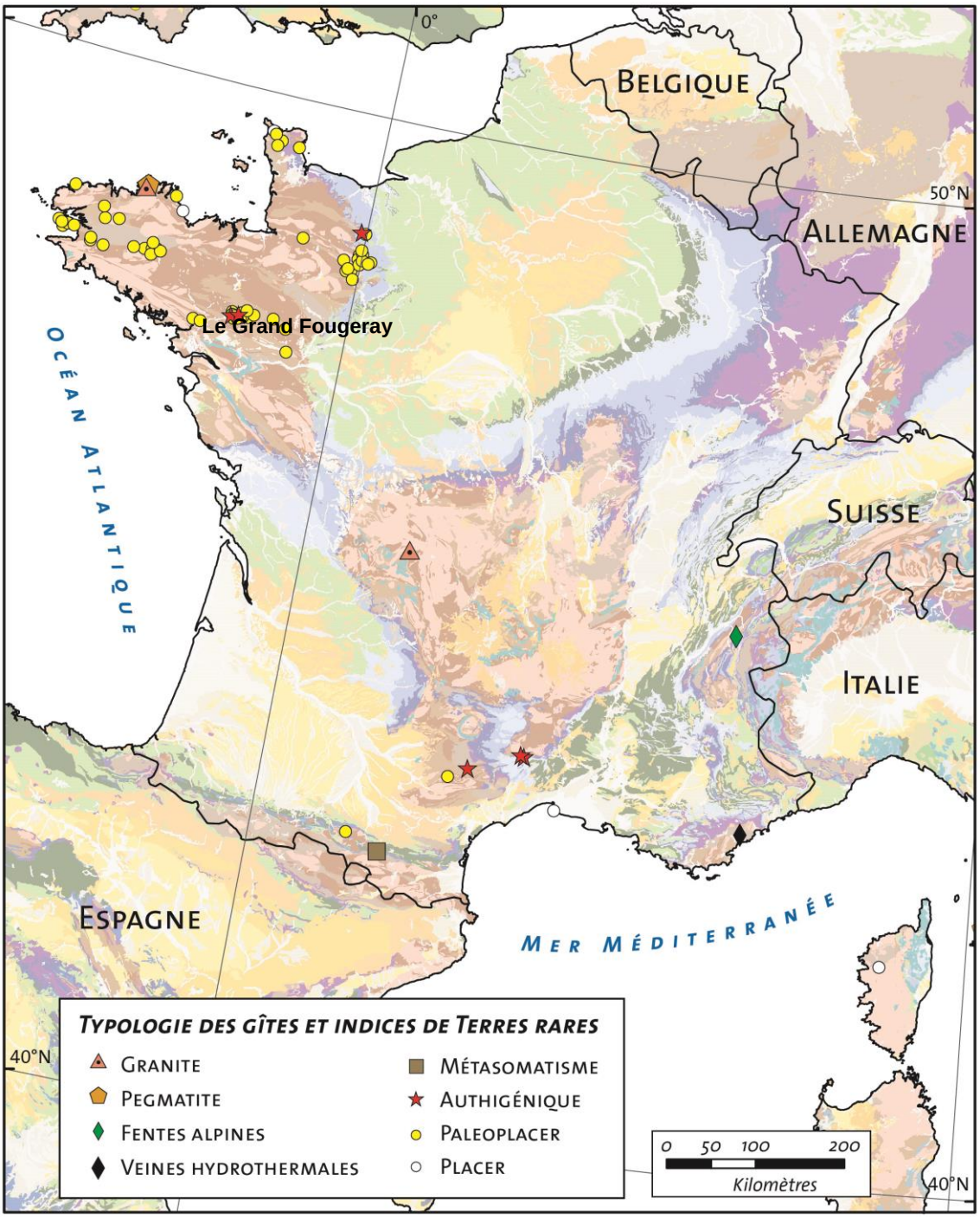


Figure 40 - Gîtes et indices de Terres Rares en France métropolitaine (source : BRGM, 2015).

Guyane

Il existe quelques gîtes enrichis en minéraux lourds (ilménite, zircon, monazite et parfois rutile) dans les sables littoraux de la Guyane. Une étude du BRGM (Marchesseau, 1978) avait identifié 4 sites principaux, Awara (38,7 kt à 1,4 % de monazite), Organabo (25,7 kt à 4,75 % de monazite), Sinnamary-Ouest (2,7 Mt à 1,14 % de monazite) et Sinnamary-Est (575 kt à 1,3 % de monazite).

Ces gites de sables de plage sont minuscules par rapport aux grands gisements exploités dans le monde, dont les ressources se chiffrent toutes à plusieurs centaines de millions de tonnes, voire quelques milliards de tonnes.

De plus, les teneurs en thorium, pénalisantes, des monazites de ces sites guyanais sont particulièrement élevées (11,7 à 13,7 % ThO_2).

En ce qui concerne l'intérieur de la Guyane, le potentiel en Terres Rares n'est pas documenté à ce jour. L'inventaire minier de la Guyane avait été réalisé à une époque où les Terres Rares n'étaient guère une cible de recherche. Seules de nouvelles recherches pourraient en déterminer les potentialités. Il est toutefois vraisemblable que ces potentialités seraient modestes, voire marginales.

Polynésie française

L'île de Tahaa est une île sous-le-vent de l'Archipel de la Société, de 88 km², située à 230 km à l'ouest de Tahiti. Tahaa est une île volcanique, et les vestiges de l'ancien volcan s'élèvent au centre de l'île avec le mont Ohiri (590 m) et le mont Puurauti (550 m). Tahaa présente un volcanisme de composition très remarquable. Les laves d'un cône adventif, le Mont Oohai, sont particulièrement enrichies en Terres Rares, en particulier en Terres Rares lourdes, avec des teneurs pouvant atteindre 0,5 % en Terres Rares totales et un rapport La/Yb de 0,5 à 3. Étudiées dans les années 1990, l'origine et la localisation de ces enrichissements restent mal connues. La minéralisation serait due à une percolation de fluides hydrothermaux. Les minéraux porteurs des Terres Rares dans ces laves sont des silicates de Ce et d'Y (steenstrupine et allanite) et des phosphates de Terres Rares (xénotime et churchite).

Des ressources avaient été estimées par Gisbert (1989), qui citait 45 000 t de Terres Rares contenues, à une teneur moyenne de 0,2 %. Mais il s'agissait de travaux très amont, à vocation académique, réalisés dans le cadre d'une thèse, et non de calculs de ressources selon les normes actuelles. Ces travaux décrivaient très en détails cette minéralisation atypique. Des tests ponctuels de traitement par lixiviation acide sur minerai concassé ont été également été rapportés, avec un rendement de 40 à 70 % (Gisbert, 1989).

Avec la flambée des prix des Terres Rares en 2010-2011, il avait été envisagé de réétudier le sujet, mais la chute des prix qui a suivi rend peu probable un quelconque intérêt économique de ce sujet à court terme.

D'autres occurrences ont été signalées sur d'autres îles de la Polynésie française (Marquises).

4.3. PRODUCTION

4.3.1. Statistiques de production courante

S'il y a bien des chiffres ponctuels et récents de production de Terres Rares par élément, les données historiques sur plusieurs années sont très parcellaires. Les données de production d'oxydes Terres Rares (OTR) sans distinction sont plus largement publiées et plus accessibles. Le tableau 19 présente les productions minières mondiales de Terres rares, prises dans leur ensemble, selon diverses sources. On observe qu'il reste des écarts significatifs entre les différentes sources, et leur précision est donc très incertaine. Il était souvent estimé que la production illégale de Terres Rares en Chine était très importante, pouvant représenter, selon les périodes, entre 15 % et plus de 40 % de la production chinoise totale. Roskill (2015) a intégré ces estimations dans son rapport "Rare Earths, Market Outlook to 2020".

La figure 41 présente la répartition de la production en 2014, toujours largement dominée par la Chine, dont la part dans la production mondiale est estimée à 88 % en 2014 (Roskill, 2015), un peu inférieure aux années précédentes (supérieure à 90 % entre 2005 et 2013).

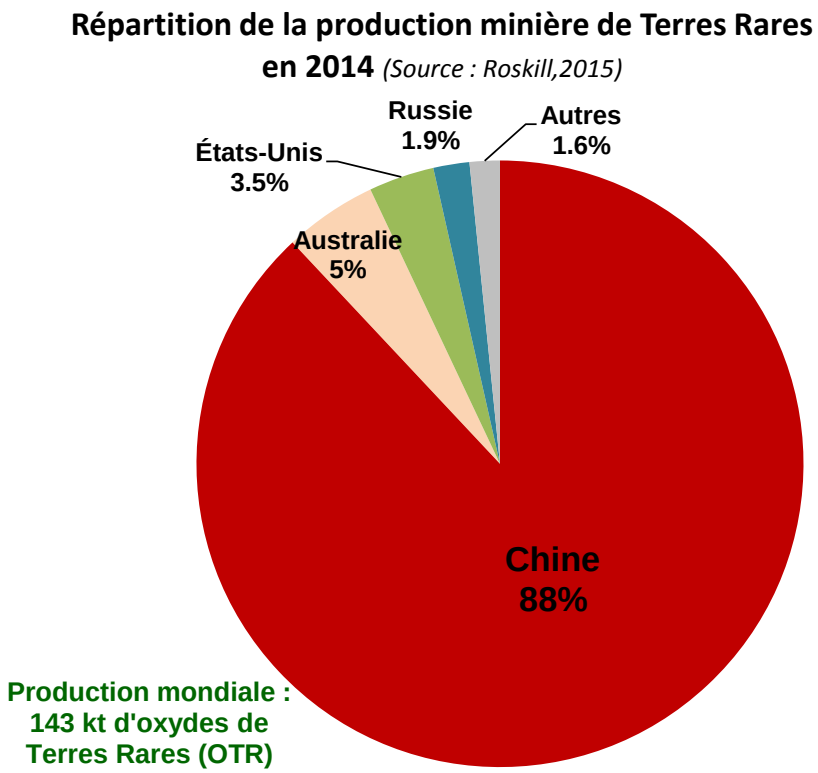


Figure 41 - Répartition de la production minière de Terres Rares par pays en 2014.

	Production minière mondiale de Terres Rares (en équivalent OTR contenus)					
	Selon USGS (mcs a+2*)	Selon USGS (myb 2012**)	Selon Roskill 2015***	Selon WMD 2015 (et antérieurs)	Selon IMCOA (2014)	Estimation combinée ****
1994	65.2 kt	60.6 kt				56.7 kt
1995	81.4 kt	75.7 kt				75.7 kt
1996	86.4 kt	80.6 kt				80.6 kt
1997	82.1 kt	68.3 kt				78.3 kt
1998	79.0 kt	77.1 kt				82.6 kt
1999	84.4 kt	86.6 kt				85.6 kt
2000	85.9 kt	90.9 kt				90.1 kt
2001	85.9 kt	94.5 kt				91.2 kt
2002	100.7 kt	98.2 kt				93.8 kt
2003	101.5 kt	97.1 kt		85.5 kt		98.0 kt
2004	104.4 kt	102.0 kt		101.4 kt		102.2 kt
2005	129.1 kt	122.0 kt	146.4 kt	103.7 kt		145.4 kt
2006	131.9 kt	137.0 kt	160.1 kt	125.1 kt	125.5 kt	159.4 kt
2007	132.9 kt	124.0 kt	147.5 kt	125.4 kt	125.5 kt	147.5 kt
2008	132.9 kt	132.0 kt	151.5 kt	128.1 kt	129.0 kt	150.4 kt
2009	140.9 kt	134.0 kt	143.5 kt	132.2 kt	125.0 kt	141.2 kt
2010	141.9 kt	126.0 kt	159.0 kt	121.3 kt	114.5 kt	156.3 kt
2011	119.9 kt	113.0 kt	133.6 kt	101.4 kt	104.5 kt	130.8 kt
2012	117.1 kt	112.0 kt	122.1 kt	103.6 kt	106.5 kt	121.0 kt
2013	110.0 kt		128.4 kt	102.8 kt		130.1 kt
2014	110.0 kt		143.2 kt			144.6 kt
2015	*(prévision)*		*157.2 kt*			
2016	*(prévision)*		*166.9 kt*			
2017	*(prévision)*		*178.8 kt*			
2018	*(prévision)*		*184.5 kt*			
2019	*(prévision)*		*189.8 kt*			
2020	*(prévision)*		*198.3 kt*			

** L'USGS publie chaque année un "Mineral Commodity Summary" (MCS) pour les "Terres Rares" considérées comme les seuls lanthanides et un pour l'yttrium. Ils publient les productions des deux années précédentes. Le chiffre publié l'année a+2 est souvent révisé et plus fiable. A partir de 2013, la production d'yttrium est explicitement intégrée dans celles des Terres Rares, mais il y a ambiguité pour les années précédentes. Les chiffres fournis sont la somme des chiffres "Terres Rares" et "Yttrium"*

*** Mineral Yearbook 2012 , révisé en février 2015, et antérieurs*

**** Prenant en compte la production chinoise illégale estimée*

***** Calcul combiné à partir des données par pays des autres sources ajustées avec les éventuelles publications directes de certains pays*

Tableau 19 - Comparaison des productions minières de Terres Rares selon différentes sources.

En 2014, les quatre principaux pays ayant une production minière de Terres Rares étaient la Chine (88 % de la production), l'Australie, les États-Unis et la Russie. Au-delà de ces 4 pays, d'autres productions sont répertoriées en fonction des sources, avec des informations souvent partielles et/ou contradictoires.

Au Brésil, deux acteurs sont liés à l'industrie des Terres Rares. Le premier est INB (Industrias Nucleares do Brasil), sous contrôle étatique, dont la production minière est officiellement arrêtée depuis 2010, mais dont les stocks de concentrés de monazite continuent d'être vendus, exclusivement à la Chine (cf. 6.1.2). Le second est la compagnie minière CBMM, premier producteur de niobium au monde, possédant le gisement d'Araxá qui est enrichi en Terres Rares. Des Terres Rares sont donc extraites en sous-produit du niobium et concentrées sur place. Officiellement, CBMM ne dispose pas de licence d'exportation et ces concentrés de Terres Rares seraient donc exclusivement stockés sur place (Roskill, 2015).

En Inde, l'unique acteur est une compagnie étatique : Indian Rare Earths Ltd (IREL) via plusieurs filiales (cf. 6.1.2). L'exploitation des sables de plage donne lieu à la production de concentrés de monazite, transformés sur place en chlorures de Terres Rares. Néanmoins, aucun chiffre de production n'est publié et les estimations de l'USGS et de Roskill sont divergentes. Pour l'USGS, la production en 2014 serait de 3 000 t OTR (Gambogi, MCS 2015). Selon Roskill, seules 500 t OTR et 750 t OTR auraient été produites respectivement en 2011 et 2012, et les exportations de Terres Rares indiennes seraient inférieures à 100 t d'OTR depuis 2013 (Roskill, 2015). Ces informations indiqueraient donc qu'une production modeste a toujours lieu, vraisemblablement stockée en partie. Un accord de coopération économique entre l'Inde et le Japon (piloté par le JOGMEC, cf. 6.2.2) a permis le lancement de la construction d'une nouvelle usine de traitement des Terres Rares dans l'état d'Odisha. Dès l'achèvement de cette construction, l'accord prévoit qu'une partie de la production (2 500 t OTR/an) sera destinée à alimenter directement plusieurs industriels japonais (Toyota Tsusho Corp. et Shin-Etsu principalement).

Enfin, l'USGS fait état dans son Mineral Commodity Summaries 2015 de productions marginales en Malaisie (200 t OTR), au Vietnam (200 t OTR) et en Thaïlande (1 100 t OTR) qui restent difficilement traçables et non reprises par d'autres sources. Si elles étaient avérées, ces productions seraient non-officielles et les Terres Rares pourraient être extraites en tant que sous-produit de l'étain par exemple.

La Russie a été un important producteur historique. Dans les massifs alcalins de Lovozero et Khibiny, dans la péninsule de Kola, les exploitations d'apatite ont démarré dans les années 1930, avec des teneurs en Terres Rares comprise entre 0,25 et 0,45 %. Les mines d'Umbozero et Karnasurt ont démarré en 1951 pour exploiter la loparite et l'eudialyte, des minéraux à Terres Rares (cf. 4.1.2). De plus, une quantité de concentrés de monazite a été produite lors de la guerre froide, puis a été stockée. Ces stocks restent à ce jour contrôlés par l'entreprise d'Etat Uralmonatsit dans des entrepôts situés dans la région de Sverdlovsk, dans l'Oural. En septembre 2013, le milliardaire Alexander Nesis a annoncé ses intentions de réexploiter ces stocks pour en extraire les Terres Rares. La société TriArk Mining (cf. 6.1.2) a été créée en JV avec l'entreprise Rostec, et a obtenu le droit de travailler sur ces concentrés de monazite, évaluées à 83 000 t[74].

4.3.2. Production française

La France n'a jamais été un pays producteur minier de Terres Rares (excepté les 78 t de monazite grise extraites du Grand Fougeray en 1967-68, cf.4.2.3). En revanche elle s'est distinguée très tôt dans la maîtrise du traitement chimique et de la séparation des éléments de Terres Rares, grâce notamment aux travaux de Georges Urbain (1872-1938), En 1919 il fonda la « Société Française des Terres Rares » avec une usine située à Serquigny dans l'Eure, où fut traitée de la monazite pour l'extraction du mischmétal nécessaire à la

[74] Voir www.reuters.com, « Russia to invest $1 bln in rare earths », article du 10/09/2013.

production des manchons à gaz et de pierres à briquet. La production de Terres Rares fut transférée en 1948 à une nouvelle usine située à la Rochelle (Charente-Maritime), qui a rejoint le groupe Rhône-Poulenc, dont la branche chimie est devenue Rhodia en 1998, laquelle a été absorbée par le groupe belge Solvay en 2011.

L'usine Solvay-Rhodia de La Rochelle était l'une des plus importantes usines de séparation des Terres Rares au monde dans les années 1960-1970 et pouvait traiter jusqu'à 15 000 t de concentrés de Terres Rares par an. L'usine a dû cesser le traitement de la monazite en 1994, du fait de son contenu radioactif et de l'absence de débouchés pour le thorium fatal. Aujourd'hui, l'usine de La Rochelle achète des concentrés de Terres Rares partiellement séparés et s'approvisionne d'environ 3 000 t d'OTR/an, provenant majoritairement de Chine, mais également de Lynas. Elle reste la plus grande usine mondiale de séparation des Terres Rares hors Chine.

4.3.3. Évolution historique de la production globale

La figure 42 illustre l'évolution de la production minière de Terres Rares par pays.

Avant 1965, la production mondiale de Terres Rares[75], était inférieure à 10 kt/an d'OTR. Le développement technologique a ensuite conduit à un accroissement progressif de la production mondiale, qui a atteint 53 kt en 1990 puis 90 kt en 2000, avant d'atteindre un pic à 141.9 kt (USGS, 2012[76]) à 159 kt (Roskill, 2015) en 2010, puis 110 kt (USGS, 2015) à 143 ou 144 kt (Roskill, 2015 et sociétés) (cf. Tab.19).

[75] Les données relatives à la production mondiale de Terres Rares sont ici toujours exprimées en tonnes d'oxydes de Terres Rares (OTR).

[76] L'USGS a publié pour l'année 2010 une production de lanthanides de 133 kt et d'yttrium de 8,9 kt.

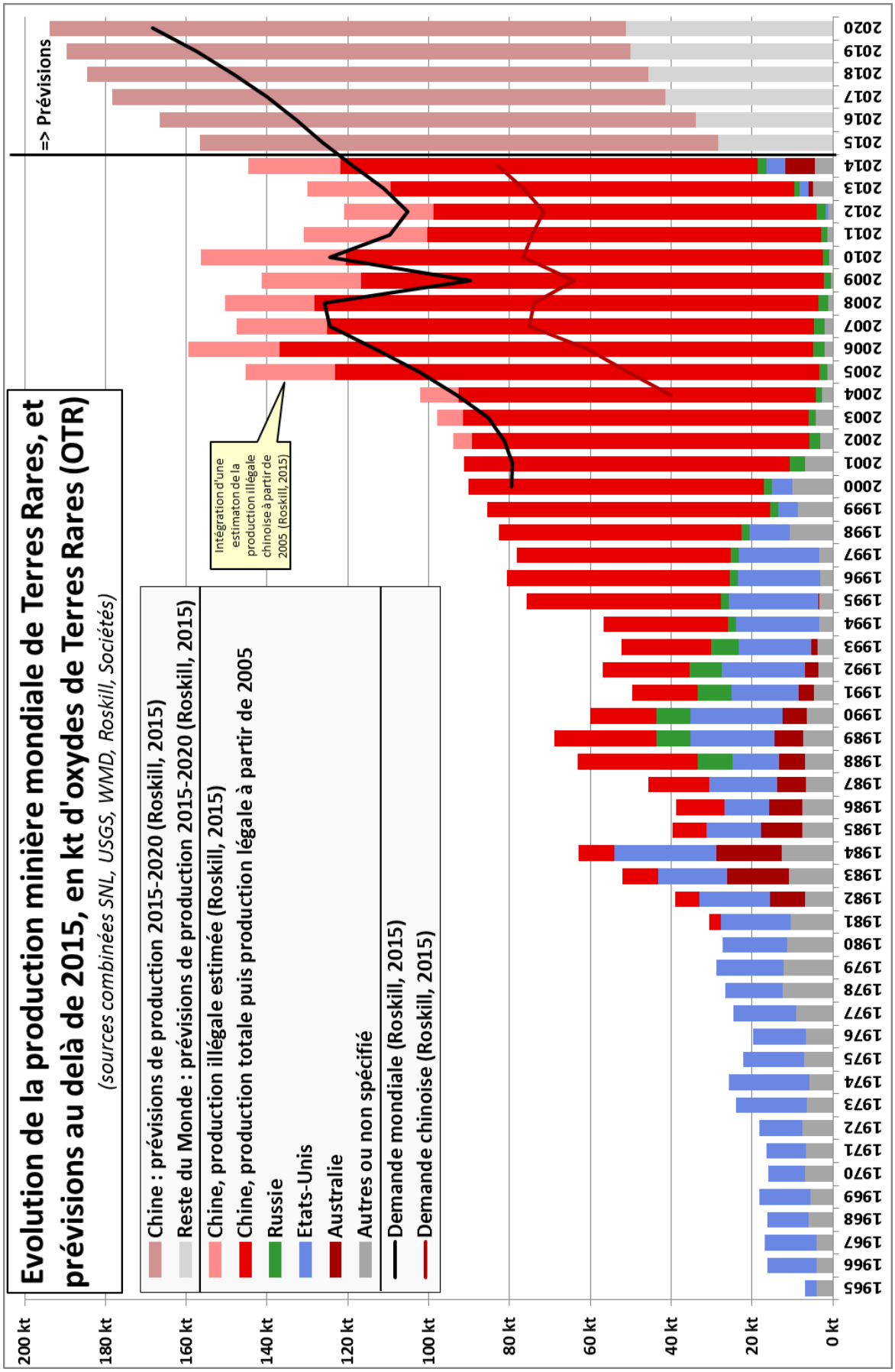


Figure 42 - Production mondiale de Terres Rares 1965-2014, et prévisions 2015-2020.

Au cours de la période 1966-1984, le premier pays producteur de Terres Rares était les États-Unis, avec plus de 60 % de la production mondiale. La production étatsunienne provenait de la mine de Mountain Pass (Californie), exploitée par la société Molycorp, et dont l'exploitation avait commencé en 1954. Le pic de production à Mountain Pass a été atteint en 1974 avec 19,9 kt d'OTR (78 % de la production mondiale cette année-là).

À partir de 1985, la part de la production étatsunienne dans la production mondiale a diminué progressivement, ne comptant plus que pour un tiers en moyenne sur la période 1985-1992. Les unités de séparation et de raffinage de Molycorp ont fermé en 1998, entre autres en raison de problèmes environnementaux. La production des États-Unis s'est alors réduite de 75 %, ne représentant plus que 5 % de la production mondiale en 2002, date de l'arrêt de la production minière à Mountain Pass.

La chute de ce producteur s'était expliquée principalement par la baisse de compétitivité des États-Unis vis-à-vis de la Chine. En effet, sur la même période, le gouvernement chinois a encouragé les exportations de Terres Rares avec une politique de remboursement de taxes et de l'octroi de prêts à taux bonifiés pour l'industrie des Terres Rares (Pecht *et al*., 2011). C'est aussi le moment où de nombreux sites de productions illégaux, de taille modeste et exploités de manière rudimentaire, se sont développés.

Entre 1985 et 1995, la part de la Chine dans la production mondiale est ainsi passée de 21 % à 60 %. Entre 1995 et 2012, cette part était en moyenne de 88 %. Puis entre 2005 et 2010, elle est passée à 97 %. Elle est revenue à 88 % en 2014.

4.3.4. Production par élément

Il n'y a pas de publication précise par les producteurs de leur production de Terres Rares ou d'oxydes de Terres Rares par élément. Par ailleurs les nomenclatures douanières de commerce international ne distinguent que les produits dans lesquels le cérium est identifié. Toutes les autres Terres Rares sont regroupées. L'analyse des données de commerce international ne permettent donc pas d'en extraire des informations sur les quantités de tel ou tel élément particulier des Terres Rares, comme par exemple le néodyme ou le dysprosium.

Seule des estimations sont publiées, extrapolées à partir d'informations partielles (répartition des teneurs dans les gisements exploités, consommation, etc.).

Ainsi le rapport sur les matières premières critiques du Groupe de Travail ad-hoc de la Commission Européenne de mai 2014 a publié le tableau ci-dessous (Tab. 20), estimé à +/- 15 %, des productions d'oxydes de Terres Rares par élément, citant comme sources Roskill et IMCOA, 2013 hors Australie, et ajoutant les données de l'l'USGS pour l'Australie[77].

[77] La comparaison entre le tableau 19, qui indique une production australienne de 4 000 t d'OTR pour l'année 2012, et le graphique de la figure 43, qui ne mentionne pas de production australienne pour l'année 2012, illustre bien la difficulté de comparer des données de sources différentes, qui ne donnent pas la même signification à leurs données. En Australie, ces dernières années, le seul producteur minier de Terres Rares a été la société Lynas Corp, à partir de son gisement de Mount Weld. Elle extrait et concentre son minerai de Terres Rares sur place, puis exporte son concentré vers son usine de traitement en Malaisie, ou elle produit séparément des composés de La, de Ce, de Nd-Pr, et un mélange des Terres Rares intermédiaires et lourdes. En réalité, si Lynas a bien commencé son extraction minière en 2011, elle s'est d'abord contentée de stocker ses concentrés sur place avant d'obtenir toutes les autorisations nécessaires à opérer son usine en Malaisie. Celle-ci n'a commencé à produire qu'en 2013. Il y a un décalage significatif, en temps comme en quantité, entre ce que déclare Lynas comme Terres Rares contenues dans les concentrés extraits une année donnée, et stockés sur place, et les composés de Terres Rares effectivement commercialisés et mis sur le marché à la sortie de l'usine de Malaisie. Lynas a ainsi déclaré avoir extrait 19,2 kt d'OTR contenues dans ses concentrés au cours de l'année calendaire 2012, et encore 23,8 kt d'OTR en 2013, alors qu'elle n'a déclaré avoir produit

Du et Graedel (2011) ont cherché à estimer l'évolution des approvisionnements en Terres Rares par élément entre 1995 et 2007. Les graphiques de leur publication sont reproduits ci-après (fig. 43), à titre indicatif. Leurs résultats indiquent une croissance supérieure de la production des Terres Rares lourdes à partir de 1998, vraisemblablement liée au développement des exploitations d'argiles ioniques dans le sud de la Chine.

OTR	Chine	Etats-Unis	Inde	Russie	Australie	Total	%
La_2O_3	29.32 kt	2.66 kt	0.17 kt	0.70 kt	1.04 kt	33.89 kt	25.9%
CeO_2	41.88 kt	3.93 kt	0.36 kt	1.44 kt	2.04 kt	49.65 kt	37.9%
Pr_6O_{11}	5.70 kt	0.35 kt	0.04 kt	0.10 kt	0.16 kt	6.34 kt	4.8%
Nd_2O_3	19.75 kt	0.96 kt	0.14 kt	0.22 kt	0.60 kt	21.67 kt	16.5%
Sm_2O_3	2.47 kt	0.064 kt	0.020 kt	0.024 kt	0.072 kt	2.65 kt	2.0%
Eu_2O_3	0.34 kt	0.008 kt		0.003 kt	0.016 kt	0.37 kt	0.3%
Gd_2O_3	2.22 kt	0.014 kt	0.009 kt	0.005 kt	0.040 kt	2.28 kt	1.7%
Tb_4O_7	0.34 kt	0.002 kt		0.002 kt	0.004 kt	0.35 kt	0.3%
Dy_2O_3	1.35 kt	0.002 kt		0.002 kt	0.008 kt	1.36 kt	1.0%
Er_2O_3	0.86 kt			0.002 kt	0.008 kt	0.87 kt	0.7%
Ho_2O_3, Tm_2O_3, Yb_2O_3, Lu_2O_3	1.72 kt		0.008 kt	0.011 kt	0.010 kt	1.74 kt	1.3%
Y_2O_3	9.92 kt	0.008 kt			0.002 kt	9.93 kt	7.6%
Total	**115.85 kt**	**8.00 kt**	**0.75 kt**	**2.50 kt**	**4.00 kt**	**131.10 kt**	

Tableau 20 - Production minière par oxyde de Terres Rares estimée pour 2012, à +/-15% publiée par l'Ad-Hoc Working Group sur les métaux critiques de la Commission Européenne en mai 2014, citant (Roskill et IMCOA, 2013) et USGS pour l'Australie.

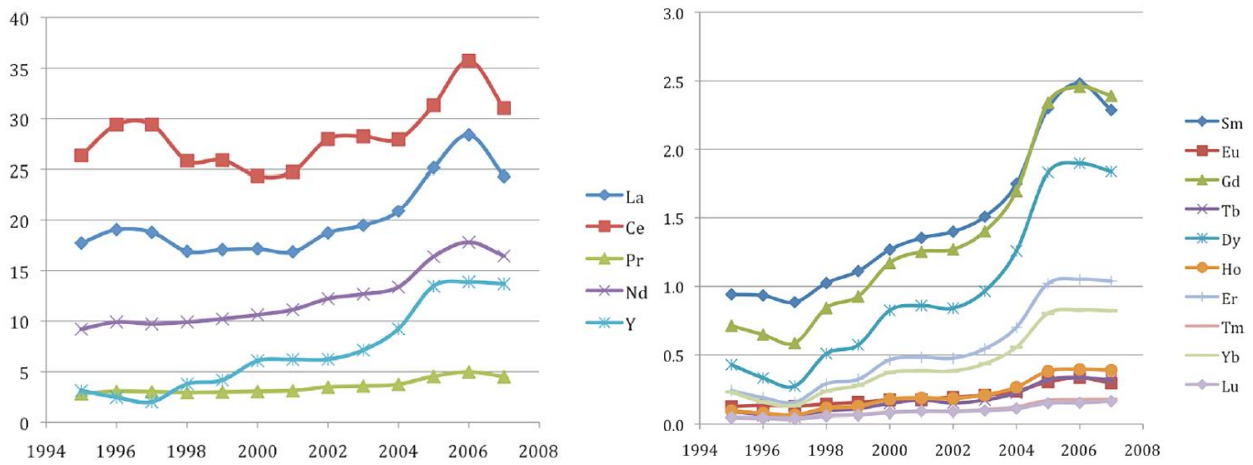


Figure 43 - Évolution estimée de la production de Terres Rares par élément, en kt de métal contenu, selon (Du & Graedel, 2011).

Du & Graedel ont aussi essayé d'estimer les stocks de Terres Rares en cours d'usage à fin 2007, récapitulés dans le tableau 21 ci-après. Ces quantités sont à prendre à titre indicatif et non comme des données réelles et certifiées. La production totale de Terres Rares

que 1,25 kt d'OTR en 2013 et 5,2 kt d'OTR en 2014 (et 0 kt en 2012) sous forme de composés commercialisables sortis de son usine malaisienne (source : Rapports trimestriels de Lynas, cf. 6.1.2). Ainsi les 4 kt de production australienne publiées par l'USGS pour 2012 et repris par l'Ad-Hoc Working Group ne correspondent pas à une réalité, mais à une estimation anticipée avant publication des rapports de Lynas.

élémentaires selon cette publication aurait été de 89,8 kt, soit 107,9 kt d'OTR (après conversion en oxydes). À comparer avec les 124 à 147 kt d'OTR qui auraient été produites en 2007 selon les sources citées au Tableau 19.

Elément	Flux entrant (approvision-nement)	Flux équivalent en oxyde	Stock en cours d'usage
La	21.9 kt	25.7 kt	86.0 kt
Ce	27.9 kt	34.3 kt	144.0 kt
Pr	4.1 kt	5.0 kt	50.0 kt
Nd	14.8 kt	17.3 kt	137.0 kt
Sm	2.1 kt	2.4 kt	3.3 kt
Eu	0.3 kt	0.3 kt	0.4 kt
Gd	2.2 kt	2.5 kt	3.6 kt
Tb	0.3 kt	0.4 kt	7.0 kt
Dy	1.7 kt	2.0 kt	8.6 kt
Ho	0.3 kt	0.3 kt	2.1 kt
Er	0.9 kt	1.0 kt	3.9 kt
Tm	0.2 kt	0.2 kt	0.2 kt
Yb	0.7 kt	0.8 kt	0.7 kt
Lu	0.1 kt	0.1 kt	0.6 kt
Y	12.3 kt	15.6 kt	6.9 kt
Total	**89.8 kt**	**107.9 kt**	**454.3 kt**

Tableau 21 - Flux et stocks de Terres Rares en 2007, selon Du & Graedel, 2011.

4.4. PROCEDES DE PRODUCTION

La production des Terres Rares passe par une série d'étapes, schématisées en figure 44.

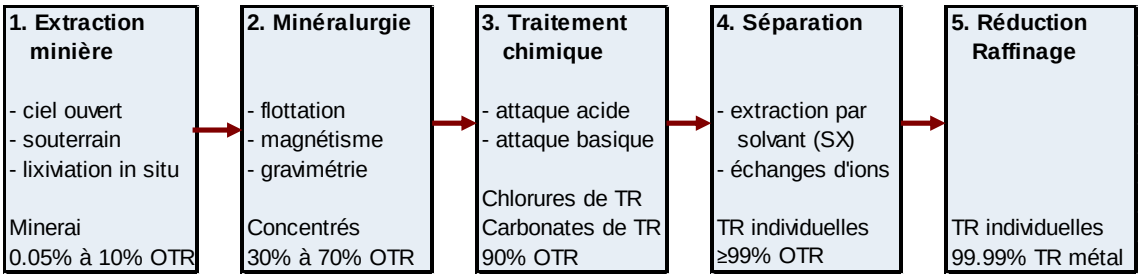


Figure 44 - Les étapes de production et de séparation des terres rares.

Les deux premières étapes concernent l'extraction du minerai et sa concentration, laquelle se fait sur le site de la mine. Elles aboutissent à la production de concentrés minéraux contenant de 30 % à 70 % d'oxydes de terres rares (OTR), qui peuvent être transportés ailleurs en l'état pour transformation.

Les étapes suivantes correspondent au traitement chimique, à la séparation puis à l'éventuelle réduction des Terres Rares sous forme métal à plus de 99,99 %. Elles sont réalisées dans des sites spécialisés, qui peuvent être géographiquement indépendants des sites miniers.

Séparer les Terres Rares est un processus difficile et coûteux. Selon les applications, les Terres Rares peuvent être utilisées, partiellement ou totalement séparées sous forme d'oxyde, sous forme de métal, ou sous forme d'autres composés (cf. chap. 3).

4.4.1. Extraction minière

Les techniques d'extraction minière employées pour l'exploitation des Terres Rares sont les mêmes que celles utilisées pour la plupart des autres minerais ; elles dépendent de la géologie et de la forme du gisement : exploitation à ciel ouvert (open-pit) pour les gisements de Mountain Pass, Mount Weld ou Bayan Obo, exploitation à ciel ouvert et en partie souterraine à Lovozero, exploitation de sables à minéraux lourds en surface (Buena au Brésil, Odisha en Inde), lixiviation in-situ pour les argiles ioniques du sud de la Chine.

4.4.2. Minéralurgie et obtention de concentrés

Les minerais rocheux[78] sont concassés, broyés et criblés, puis les minéraux porteurs de Terres Rares sont concentrés par flottation.

Les étapes et les réactifs utilisés lors de cette flottation varient en fonction de la composition du minerai. Jordens *et al.* (2013) propose un état des lieux des connaissances à ce sujet. Les opérations de Bayan Obo et de Mountain Pass sont des exemples de l'utilisation de cette technique, présentés sur les figures suivantes (fig. 45 et 46).

À Bayan Obo (Mongolie Intérieure, Chine), les Terres Rares, essentiellement légères, sont extraites comme sous-produit du minerai de fer. Une première flottation permet de séparer les minéraux ferrifères (magnétite et hématite) et silicatés d'où seront extraits fer et niobium. Le résidu est traité par une deuxième flottation plus sélective.

Les réactifs utilisés pour cette flottation sont l'acide hydroxamique et le silicate de sodium, qui joue le rôle de dispersant. Des étapes complémentaires de séparation gravimétrique et magnétique améliorent la séparation sélective de la bastnaésite. Deux concentrés sont obtenus : l'un de bastnaésite à 68 % d'OTR, l'autre de monazite à 36 % d'OTR. Ces concentrés sont expédiés en l'état aux unités de traitement et de séparation des Terres Rares. Dans le cas de Bayan Obo, celles-ci ont pour la plupart été intégrées au sein du conglomérat China Northern Rare Earth Group (cf. 6.1.1).

[78] C'est-à-dire à l'exclusion des argiles ioniques et des sables à minéraux lourds.

Premières étapes du procédé de traitement des Terres Rares à Bayan Obo (Chine)
traduit et adapté d'après Navarro & Zhao (2014)

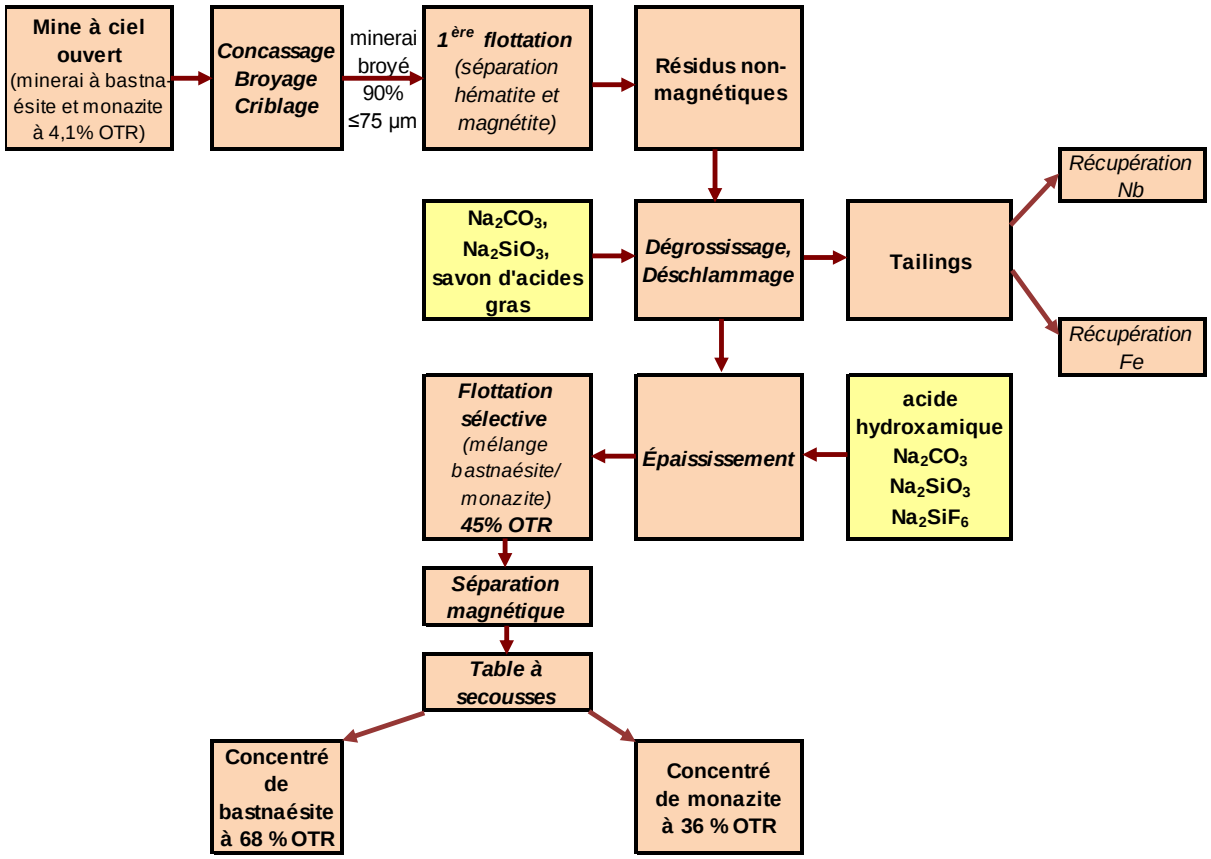


Figure 45 - Premières étapes du traitement des Terres Rares à Bayan Obo (Chine).Traduit et adapté d'après Navarro & Zhao (2014).

À Mountain Pass (Californie, États-Unis), le collecteur utilisé pour la flottation est également l'acide hydroxamique, qui forme des chélates avec les trications de Terres Rares de manière sélective par rapport aux ions calcium (Ca^{2+}) et baryum (Ba^{2+}). Il permet ainsi de séparer la bastnaésite qui est ensuite épaissie, filtrée et séchée. Un concentré brut de bastnaésite à 60 % d'OTR est produit.

L'étape du traitement chimique y est réalisée directement sur place. Une digestion à l'acide chlorhydrique et une lixiviation acide, permettent d'obtenir un concentré marchand à 70 % d'OTR. Un autre concentré à 90 % d'OTR peut également être obtenu après une étape supplémentaire de calcination. La lixiviation acide a pour but d'éliminer Ba, Sr et Ca sous forme de chlorures, la calcination rejette le dioxyde de carbone.

Premières étapes du procédé de traitement des Terres Rares à Mountain
traduit et adapté d'après Navarro&Zhao(2014)

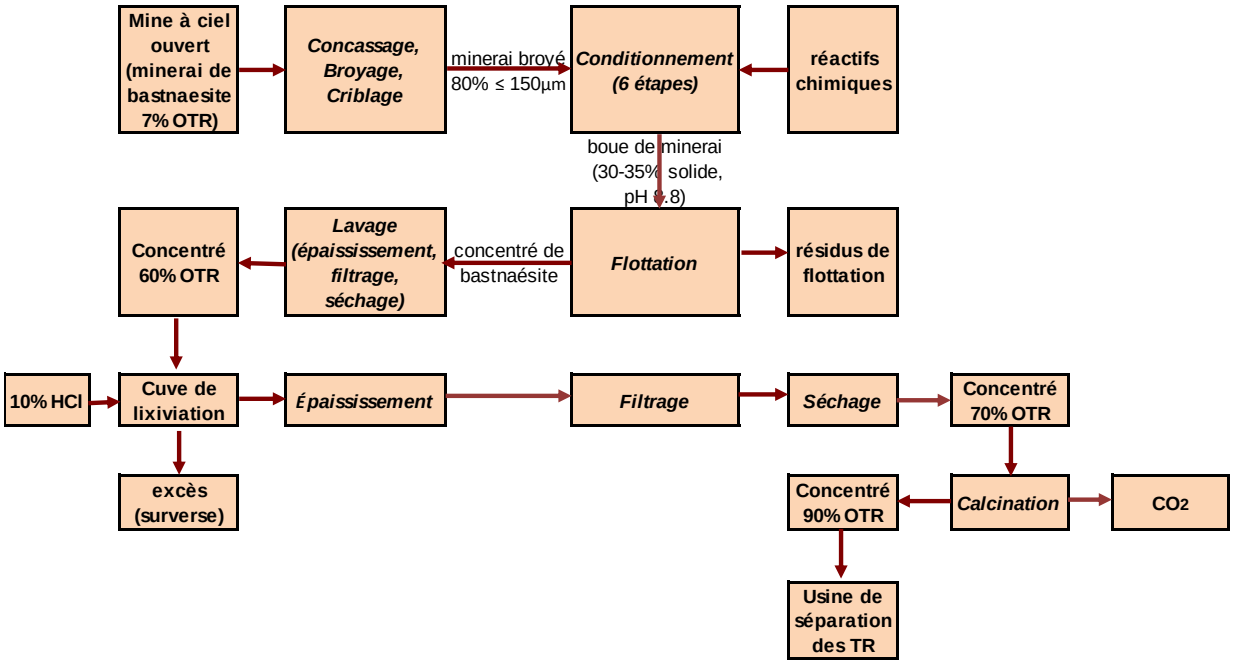


Figure 46 - Premières étapes du procédé de traitement des Terres Rares à Mountain Pass (USA) traduit et adapté d'après Navarro & Zhao (2014).

À Mount Weld (Australie Occidentale), le minerai riche en monazite est concassé, broyé, flotté et filtré sous pression jusqu'à l'obtention d'un concentré à 35 % à 40 % d'OTR qui est expédié à l'usine LAMP (Lynas Advanced Materials Plant) installée à Gebeng, en Malaisie, pour les étapes suivantes du traitement.

À Lovozero, le minerai contenant essentiellement de la loparite (cf.4.1.2) est traité par une combinaison de séparations gravimétriques et électrostatiques qui aboutit à des concentrés à 30 % OTR, traités ensuite à l'usine Molycorp Silmet, en Estonie.

Le traitement des sables à minéraux lourds (placers fluviatiles ou sables de plage) peut être initié sur les barges d'extraction puis poursuivi à terre. Les minerais sont soumis, après tamisage, à une série de traitements par voie humide (séparation gravimétrique à l'aide de tables à secousses, de spirales, de cyclones). Des enrichissements par voie sèche (séparations magnétique, électrostatique) permettent à la suite d'isoler successivement la monazite des autres constituants (ilménite, rutile, leucoxène, zircon). De la même manière, lorsqu'il est présent, le xénotime (cf. 4.1.2) peut être séparé des sables de plages ou de placers par séparation magnétique. Les concentrés de monazite issus des sables de plage contiennent 55 % à 65 % d'OTR.

Le traitement des argiles ioniques chinoises, principales sources de Terres Rares lourdes se fait par lixiviation *in situ*. Une solution de sulfate d'ammonium est injectée par forage dans les formations porteuses. Cette solution est ensuite récupérée avec sa charge minéralisée, par un réseau de forages drainants. Elles sont ensuite traitées avec du carbonate d'ammonium, ce qui permet la formation d'un précipité et laisse les Terres Rares en solution. L'ajout d'acide oxalique permet la précipitation des Terres Tares sous forme d'oxalates. Après filtration et calcination, les oxalates sont transformés en OTR, ce qui aboutit à la production de concentrés pouvant contenir jusqu'à 90 % d'OTR, directement commercialisables. Les dommages environnementaux de telles pratiques sont néanmoins considérables.

4.4.3. Traitement chimique

Les concentrés obtenus lors du stade de valorisation sont des produits marchands. Mais, pour de nombreuses applications, l'isolation des lanthanides doit être poursuivie. C'est à ce stade qu'intervient la chimie extractive qui fait appel, dans un premier temps, à des attaques acides (chlorhydrique, sulfurique, nitrique) ou basiques (soude). On obtient au cours de cette étape des hydroxydes, carbonates, et chlorures de Terres Rares.

Ce sont néanmoins des produits intermédiaires qui doivent subir une étape de séparation supplémentaire afin d'arriver à des formes de Terres Rares individuelles (oxyde ou métal).

4.4.4. Séparation

La gamme de produits finaux proposés aux utilisateurs de Terres Rares individuelles ont une pureté variant de 99,9 % à 99,9999 %. Les puretés de la Terre Rare séparée sont, le plus souvent, exprimées en masse par rapport aux autres Terres Rares, sans tenir compte des autres impuretés éventuellement présentes. Les procédés utilisés pour obtenir ces produits purifiés comprennent :

- la cristallisation fractionnée et la réduction ;
- l'extraction par solvant ;
- l'extraction par échange d'ions.

Extraction par réduction - Cristallisation fractionnée

L'oxydation ou la réduction sélective de certaines Terres Rares ont été utilisées dans le passé.

Ces techniques sont basées sur la stabilité des états de valence. En effet, à l'exception du cérium (tri- ou quadrivalent) et de l'europium (tri- ou bivalent), les lanthanides se trouvent naturellement à l'état de cations trivalents et atteignent difficilement le degré d'oxydation +IV. La technique implique une précipitation à partir d'une solution trivalente, de l'hydroxyde de cérium tétravalent, puis la réduction de l'europium à son état bivalent par du zinc ou par électrolyse. Cette méthode peut être couplée avec la cristallisation fractionnée pour extraire les autres éléments. Elle est basée sur les différences de basicité dues à la décroissance du rayon ionique du lanthane au lutécium. En modifiant les paramètres (évaporation, température, agent de précipitation), on peut éliminer sélectivement un métal de la solution.

Ces procédés ont néanmoins été abandonnés depuis plusieurs décennies au profit d'autres procédés plus efficaces : la méthode d'extraction par solvants (liquide-liquide) est la méthode la plus largement répandue à échelle industrielle pour la séparation et la purification des Terres Rares. Les techniques d'extraction par échanges d'ions permettent d'atteindre un degré de pureté encore supérieur.

Extraction par solvant (SX)

La technique d'extraction par solvant est facile à mettre en œuvre et à automatiser. La mise en série de plusieurs étages de séparation permet d'obtenir des tonnages élevés de Terres Rares avec un niveau de pureté qui peut atteindre 99,999% (5N).

L'extraction par solvant (appelée SX, pour *Solvent Extraction*), ou liquide-liquide, permet d'isoler les lanthanides en solution aqueuse acide à l'aide d'un agent d'extraction organique (ligand aliphatique ou aromatique) non miscible à l'eau. Elle repose sur la distribution différentielle des Terres Rares entre les phases aqueuse et organique.

L'agent d'extraction est responsable du transfert des ions de Terres Rares de la phase aqueuse à la phase organique. Pour une meilleure efficacité, il est généralement dissous dans un solvant ; d'autres additifs permettent d'améliorer la dynamique du système.

Quatre types d'agents d'extraction sont les plus couramment employés :

- le tri-nitryl phosphate (TBP), neutre ;
- les composés quaternaires de l'ammoniaque, basiques ;
- l'acide carboxylique tertiaire ;
- l'acide DI-2-ethyl hexyl phosphorique (DHPA).

Les différents flux organiques sont ensuite nettoyés par un courant aqueux. L'extraction n'est cependant jamais complète et il faut réitérer l'opération à travers une batterie de cellules SX (parfois plus d'une cinquantaine, cf. fig. 47).

Figure 47 - Cellules SX en Australie (Alkane Resources demonstration plant, Dubbo project) source : www.techmetalsresearch.com

Le processus est extrêmement complexe avec des reprises successives de différents mélanges plus ou moins riches en terres cériques ou yttriques. Successivement sont isolés le lanthane, le cérium, le didyme (alliage Nd-Pr), le samarium/europium, le gadolinium / terbium, et l'ensemble des autres Terres Rares ; l'yttrium est obtenu en fin d'extraction.

Les mélanges peuvent être repris pour en isoler les constituants. La composition et la pureté des produits obtenus dépendent des applications recherchées. L'avantage de cette méthode tient au fait qu'elle peut être utilisée en continu et convient très bien à une production industrielle. Elle est toutefois moins appropriée à la séparation des Terres Rares lourdes.

Des travaux de recherche et développement sont en cours pour développer des procédés industriels viables pour remplacer ou améliorer ces techniques de SX[79].

[79] Un des acteurs de ce domaine est par exemple l'entreprise canadienne Orbite Aluminae

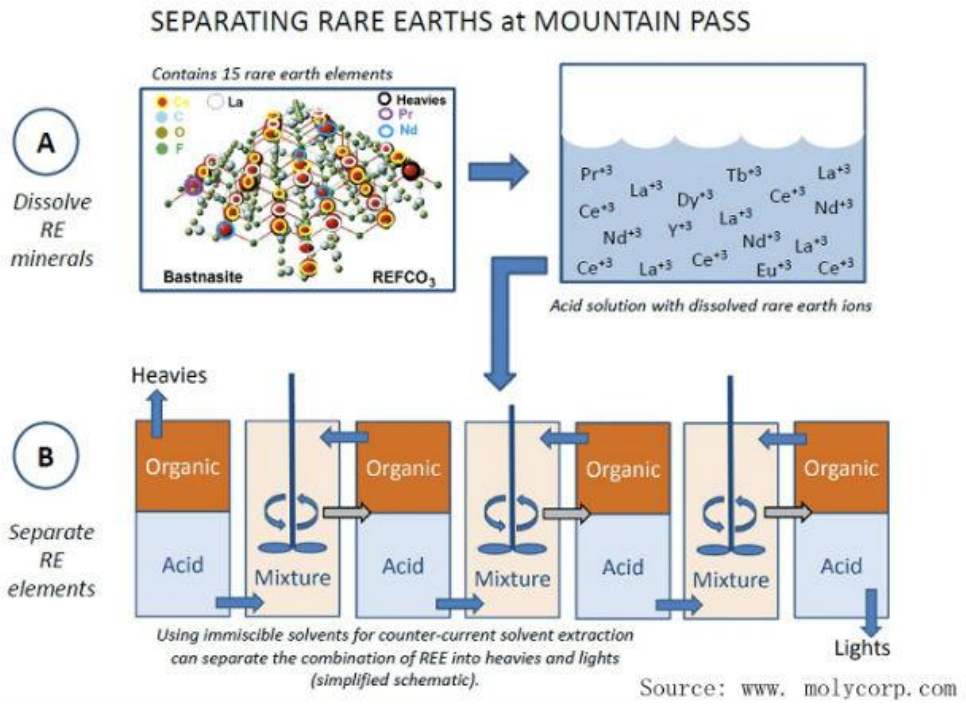


Figure 48 - Présentation de la technique d'extraction par solvant utilisé à Mountain Pass par Molycorp.

Extraction par échange d'ions

L'échange d'ions est un procédé dans lequel les ions d'une solution de Terres Rares sont adsorbés sur un solide (généralement une résine synthétique). Les cations, fixés sur la résine, sont ensuite récupérés à l'aide d'un agent complexant. Chaque lanthanide ayant une affinité différente pour cet agent, il est ainsi possible d'effectuer la séparation. Ce procédé permet d'obtenir des Terres Rares très pures (99,9999 %) mais il est long et n'est utilisé que pour de petites quantités ; il ne concerne que quelques lanthanides lourds et des applications de pointe, notamment la conception des lasers.

4.4.5. Réduction, raffinage, purification

L'obtention de Terres Rares sous forme de métaux est une étape à part. La séparation des Terres Rares lourdes est obtenue par une réduction métallothermique (à haute température) par le calcium, le lithium, le magnésium ou le baryum. Au cours de cette séparation, l'adjonction de bore, de fer ou de cobalt aux métaux isolés permet d'obtenir directement des alliages, utilisés pour la fabrication d'aimants permanents par exemple. Les métaux sont ensuite purifiés sous vide à haute température. Les techniques diffèrent selon les producteurs mais les processus exacts ne sont souvent pas divulgués.

Des travaux de recherche et développement sont menés pour trouver des procédés efficaces permettant de traiter les nouveaux minéraux de Terres Rares (eudyalite, xénotime) présents dans les gisements identifiés en Europe, aux États-Unis ou au Canada. En effet, s'il y a des similitudes dans les réactifs efficaces aux différentes étapes, il est nécessaire d'optimiser les processus de traitement pour les adapter à chaque gisement. Cela représente une difficulté supplémentaire pour les investisseurs impliqués dans le développement de ces gisements hors Chine, étant donné les délais nécessaires à la mise au point d'une nouvelle technologie, et cela indépendamment de l'évolution de la demande mondiale et des prix des Terres Rares individuelles. C'est pourquoi le modèle de contrat d'enlèvement (off-take) est préféré, assurant des débouchés à la production future et limitant les risques de non-viabilité économique.

La figure 50 illustre la complexité des procédés d'extraction et de purification des Terres Rares sur l'exemple de la mine de Bayan Obo, maintenant contrôlée par le conglomérat China Northern Rare Earth Group (cf. 6.1.1).

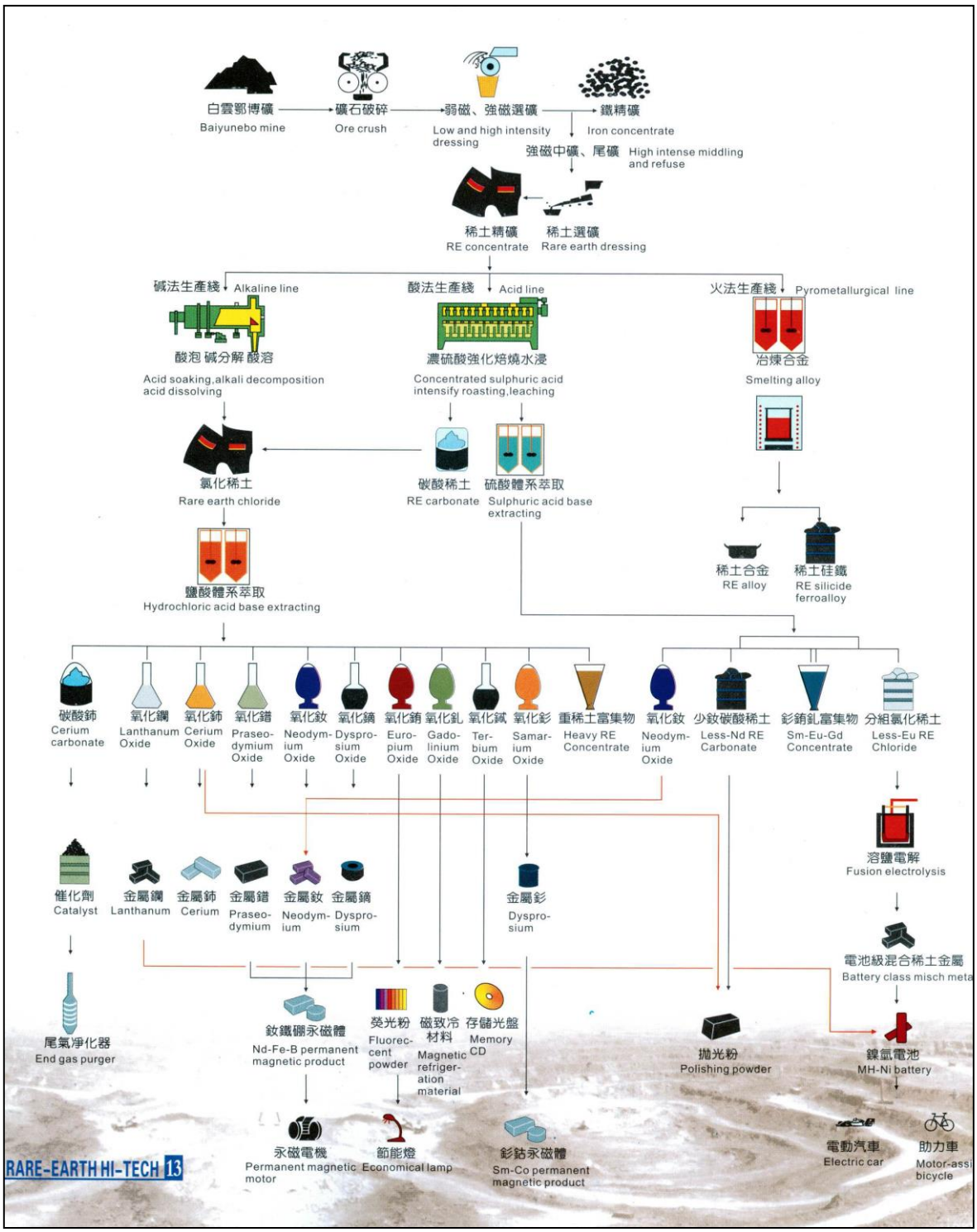


Figure 49 - Organigramme du raffinage sélectif complet des Terres Rares mis en oeuvre à Bayan Obo (Chine).

4.5. RECYCLAGE

Le recyclage des Terres Rares n'est pas facile à réaliser. Les quantités sont souvent très faibles dans les produits finaux ou bien liées à de nombreuses impuretés difficilement isolables (ou de manière coûteuse) quand les Terres Rares sont sous formes d'alliages ou d'assemblages complexes (aimants dans des micromoteurs électriques, par exemple).

Certains équipements ont de fortes teneurs en Terres Rares, par exemple les générateurs des éoliennes off-shore qui peuvent contenir environ 155 kg de néodyme, 27,5 kg de praséodyme et 2,8 à 24 kg de dysprosium par MW de puissance (cf. 3.1.1 et fig. 10), ce qui justifie la mise en place de filières de recyclage des installations lorsqu'elles arriveront en fin de vie. Toutefois, ces installations majeures ne constituent pas encore un "gisement secondaire" susceptible d'alimenter le marché : elles sont relativement récentes et leur durée de vie est espérée supérieure à 25 ans. Envisager, lorsqu'on a besoin de Terres Rares pour construire une nouvelle éolienne off-shore, d'en démanteler une autre que l'on viendrait juste de construire et qui ne serait pas encore arrivée en fin de vie pour récupérer lesdites Terres Rares, n'est pas une solution, ce serait une idée totalement contraire à tout concept de développement durable.

Ainsi le recyclage des Terres Rares est actuellement relativement limité. En effet, l'UNEP estimait en 2011 que moins de 1 % des Terres Rares étaient recyclées, ce recyclage concernant essentiellement les déchets de production.

Néanmoins, de nombreuses recherches sont en cours dans ce domaine et certains procédés existent déjà. La France a mis en place depuis 2012 une éco-industrie de recyclage des lampes fluorescentes compactes (cf. 4.5.1 et 6.2.5).

Les études de recherches et développement sur le recyclage des Terres Rares contenues dans les produits en fin de vie, nombreuses, sont surtout destinées à anticiper l'arrivée prévisible en fin de vie, à terme, d'équipements contenant ces Terres Rares. Ces études sont notamment financées par des programmes de recherche européens tels que le 7ème PCRD ou Horizon 2020. Il existe également de nombreux réseaux et plateformes de recherche sur le sujet, intégrant notamment des acteurs industriels. À titre d'exemple, on peut citer ERECON (European Rare Earths Competency Network), EREAN (réseau européen pour le recyclage)[80], EURARE (programme de recherche collaborative européenne visant notamment à développer de nouveaux procédés de séparation)[81] et RARE^3 (Research Platform for the Advanced Recycling and Reuse of Rare Earths)[82].

De son côté, le Japon est globalement en pointe dans la recherche dans le secteur du recyclage.

Cependant, la mise en œuvre de procédés à l'échelle industrielle est encore très limitée.

La production de Terres Rares à partir de ressources secondaires présenterait divers avantages comparés à la production à partir de ressources primaires, à savoir :

- un impact environnemental plus faible, notamment en raison d'une consommation énergétique souvent moindre, d'une réduction significative des effluents et des déchets produits et de l'absence d'éléments radioactifs dans les gisements secondaires ;

[80] http://erean.eu

[81] www.eurare.eu

[82] www.kuleuven.rare3.eu

- une diversité des Terres Rares contenues dans les ressources secondaires moindre que dans les ressources primaires ;
- la production concernant principalement celles des Terres Rares les plus utilisées ;
- pour l'Europe et en particulier la France, les ressources secondaires sont des ressources nationales.

Mais, en plus du fait que les équipements contenant des Terres Rares n'arrivent pas en encore aussi massivement en fin de vie que la demande de ces substances pour de nouveaux équipements, le recyclage des Terres Rares est confronté à plusieurs difficultés (ERECON, 2014) :

- 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. Dans les déchets d'équipements électriques et électroniques, par exemple, les circuits de recyclage sont davantage optimisés, pour des raisons de rentabilité, pour la récupération de métaux comme le cuivre ou les métaux précieux ;
- 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 ;
- 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 « gisements » recyclables existants sont actuellement les poudres luminophores, en particulier celles des ampoules fluo-compactes usagées, les aimants permanents de certains équipements en contenant et arrivant en fin de vie (il s'agit jusqu'à présent surtout de moteurs de petite taille comme ceux de disques durs d'ordinateurs, sachant que les équipements de grande taille ne sont en général pas encore arrivés en fin de vie), les batteries NiMH et les catalyseurs.

4.5.1. Recyclage des Terres Rares contenues dans des produits usagés

Les procédés de recyclage sont généralement formés de trois grandes étapes :

1. tri et collecte des produits usagés ciblés ;
2. extraction des composants riches en Terres Rares ;
3. extraction et séparation des Terres Rares.

Les lampes fluo-compactes

Le recyclage des Terres Rares contenues dans les lampes fluo-compactes est réalisé depuis 2012 par Solvay (division Rhodia Rare Earth Systems) en France avec le soutien de Recylum pour la collecte des lampes usagées. Les poudres subissent des attaques chimiques acides puis le concentré de Terres Rares est soumis à différents traitements afin de mettre en solution l'ensemble des Terres Rares. Celles-ci sont ensuite séparées sélectivement via l'utilisation d'une série d'équipements d'extraction par solvant. Avec les recyclages issus des aimants permanents et des batteries NiMH (voir ci-après), Solvay

envisage une production par recyclage de 5 000 t de Terres Rares par an et espère ainsi récupérer de 5 à 50 % de ses besoins en Terres Rares. Toutefois, avec le remplacement attendu des lampes fluo-compactes par des LED, qui contiennent nettement moins de Terres Rares et sont annoncée avec une très longue durée de vie (40 ans), les flux de poudres luminophores en fin de vie destinés au recyclage pourraient être appelé à diminuer de manière significative à moyen terme.

OSRAM a également développé un procédé permettant de récupérer les Terres Rares contenues dans les poudres de luminophores usagées. Le procédé a été breveté en 2007 en Allemagne et en 2011 aux États-Unis.

Les batteries NiMH

Solvay (division Rhodia Rare Earth Systems) recycle depuis 2011 les Terres Rares des batteries NiMH en partenariat avec le métallurgiste belge Umicore. Les batteries sont collectées par Umicore, qui les traite ensuite à très hautes températures afin de récupérer le ferro-nickel. Cette étape concentre les Terres Rares dans les scories qui sont alors envoyées sur le site de Solvay en France. Le procédé utilisé est relativement semblable au traitement des poudres de luminophores. Après mise en solution, les Terres Rares sont séparées individuellement par plusieurs étapes d'extraction par solvant.

Au Japon, le groupe Honda a signé en 2012 un accord avec Japan Metals and Chemicals pour le développement d'un procédé à haute température permettant la récupération des Terres Rares des batteries NiMH et leur réutilisation dans des véhicules hybrides. Toyota travaille aussi sur le recyclage des composés des batteries qu'il produit lui-même, via des partenariats, pour les réintroduire dans ses propres chaînes de production.

D'autres industriels ambitionnent de réaliser la récupération des Terres Rares contenues dans les batteries NiMH, comme par exemple Retriev Technologies (anciennement Toxco) dont l'usine est en construction dans l'Ohio.

À noter que les recycleurs et les fabricants de véhicules s'organisent au niveau français et européen pour la collecte des batteries usagées.

Les aimants permanents

Le recyclage des Terres Rares contenues dans les aimants permanents fait l'objet d'un grand nombre d'initiatives de la part des industriels. Il s'agit notamment de :

- Solvay (division Rhodia Rare Earth Systems). Le procédé développé pour récupérer les Terres Rares (Pr, Nd, Dy) est très semblable à celui utilisé pour le recyclage des luminophores ;
- Santoku Corporation réalise depuis 2012 au Japon (Tsuruga) le recyclage du néodyme et du dysprosium contenus dans les aimants de moteurs (tels que les systèmes d'air conditionné) et dans les déchets de production. La récupération des Terres Rares est réalisée par dissolution sélective à l'acide chlorhydrique suivie d'extractions par solvant ;
- Hitachi a mis au point avec l'Université de Tokyo une méthode dite « à sec » dans laquelle l'extraction du néodyme et du dysprosium est réalisée par évaporation. Contrairement aux procédés d'extraction par solvant (tels que celui développé par Solvay), cette méthode présente l'avantage de générer moins d'effluents liquides nécessitant un traitement par la suite ;
- Shin-Etsu Chemical Co., qui est le deuxième producteur d'aimants permanents à Terres Rares, dispose déjà d'une installation pour récupérer les Terres Rares à partir de ses

chutes de production. Il envisage d'étendre ses activités au recyclage des aimants permanents des équipements en fin de vie. Il a annoncé la construction d'une usine au Vietnam destinée à recycler les Terres Rares des aimants présents dans les véhicules hybrides, les disques durs d'ordinateurs, les compresseurs de climatiseurs, etc. ;

- Showa Denko Rare-Earth Vietnam Co., Ltd., une filiale de Showa Denko K.K. (SDK), a finalisé en 2010 la construction au Vietnam d'une usine de recyclage du dysprosium et du didyme, qui est un mélange de néodyme et de praséodyme ;
- Mitsubishi Materials Corp. en partenariat avec Panasonic Corp. et Sharp Corp a des projets pour la récupération du néodyme et du dysprosium contenus dans divers produits tels que des machines à laver et des systèmes d'air conditionné.

Le recyclage des Terres Rares des aimants permanents est néanmoins confronté à des difficultés spécifiques :

- contamination due à la présence de colles, plastiques et autres ;
- composition très variables des aimants : leur mélange peut provoquer la perte des propriétés recherchées des matériaux ;
- la corrosion, nécessitant des procédés supplémentaires de raffinage (Goodier, 2005).

Renault a par exemple réalisé un inventaire détaillé des pièces à aimants permanents au Nd et/ou Dy présents dans ses véhicules (cf. fig. 9). En raison de la miniaturisation et du temps (coût) de démontage, il apparaît que seuls les moteurs de direction et les hauts parleurs justifient d'envisager leur recyclage, mais le procédé n'est pas encore économiquement rentable.

4.5.2. Potentiel du recyclage des Terres Rares à l'horizon 2020

Le tableau 22 donne une estimation de la contribution du recyclage des Terres Rares pour la production des luminophores, et des aimants permanents en 2020 (d'après Binnemans et al., 2013), selon des scénarios de récupération optimistes et pessimistes[83].

Usage	Terres rares dans les produits en fin de vie en 2020	Terres rares recyclées en 2020 (scénario pessimiste)	Terres rares recyclées en 2020 (scénario optimiste)	Demande en 2020 (selon AHWG-CE, mai 2014)	Contribution du recyclage à la demande (scénario pessimiste)	Contribution du recyclage à la demande (scénario optimiste)
Luminophores	4 167 t	1 333 t	2 333 t	7 000 t	19.0%	33.3%
Aimants permanents	20 000 t	3 300 t	6 600 t	39 500 t	8.4%	16.7%
Batteries NiMH	5 000 t	1 000 t	1 750 t	?		
Autres				183 000 t		

Tableau 22 - Estimation d'une fourchette de contribution possible du recyclage des Terres Rares pour la production des luminophores, des batteries NiMH et des aimants permanents en 2020, selon Binnemans et al. (2013).

Cette contribution est variable en fonction de l'élément concerné. Le tableau 23 présente une estimation des fourchettes possibles pour certains de ces éléments.

[83] Les scénarios pessimistes et optimistes correspondent à des taux de collecte différents mais à un taux de récupération des Terres Rares fixe via les procédés mis en œuvre. Pour les luminophores, les taux de collecte considérés sont de 40% (pessimiste) et 70% (optimiste) avec une efficacité des procédés de recyclage de 80%. Pour les batteries NiMH, les taux de collecte considérés sont de 40% (pessimiste) et 70% (optimiste) avec une efficacité des procédés de recyclage de 50%. Pour les aimants permanents, les taux de collecte considérés sont de 30% (pessimiste) et 60% (optimiste) avec une efficacité des procédés de recyclage de 55%.

Dans tous les cas, par élément, la contribution du recyclage à l'approvisionnement sera inférieure à 25 %. Il est donc illusoire de penser que le recyclage est la solution définitive au problème d'approvisionnement. Ce n'en est qu'une contribution minoritaire, même si cette contribution est hautement souhaitable et même indispensable. Un complément primaire restera donc indispensable. Cette limite de la contribution du recyclage à l'approvisionnement est due à de multiples facteurs, d'une part à des taux de collecte et des taux de récupération imparfaits, mais aussi au seul fait que la demande est croissante : si chaque année la demande augmente, et est donc supérieure à la consommation des années précédentes, les quantités contenues dans les équipements en fin de vie, même s'ils étaient intégralement recyclés, resteront inférieures à la demande courante.

Elément (oxyde)	Terres rares recyclées en 2020 (scénario pessimiste)	Terres rares recyclées en 2020 (scénario optimiste)	Demande en 2020 (selon AHWG-CE, mai 2014)	Contribution du recyclage à la demande (scénario pessimiste)	Contribution du recyclage à la demande (scénario optimiste)
Nd_2O_3	2 390 t	4 755 t	34 235 t	7.0%	13.9%
Pr_6O_{11}	805 t	1 600 t	7 882 t	10.2%	20.3%
La_2O_3	610 t	1 070 t	48 335 t	1.3%	2.2%
CeO_2	480 t	840 t	72 560 t	0.7%	1.2%
Dy_2O_3	165 t	330 t	1 684 t	9.8%	19.6%
Tb_4O_7	68 t	121 t	537 t	12.7%	22.5%
Eu_2O_3	65 t	115 t	787 t	8.3%	14.6%

Tableau 23 - Évaluation de la contribution du recyclage des Terres Rares dans la demande mondiale en Terres Rares en 2020, selon Binnemans et al. (2013).

Au prix actuels, ces estimations de production de Terres Rares à partir de ressources secondaires représentent une valeur de plusieurs centaines de millions d'euros par an. Par exemple la valeur totale des Terres Rares qui seraient recyclées en 2020 dans le scénario optimiste (3ème colonne du tableau 23) serait de 751 MUS$ aux prix moyens des oxydes du premier trimestre 2015.

Mais de son côté, la construction d'installations pour le recyclage à l'échelle industrielle nécessite des investissements très importants. Par exemple, le coût associé à la mise en place d'une filière en Europe pour la collecte et le recyclage des aimants NdFeB a été estimé à environ 1 G€ (TNO, 2012, dans Tsamis & Coyne, 2015[84]). De plus, la volatilité des prix des Terres Rares rend les industriels quelque peu frileux à investir dans de nouvelles installations. Tsamis & Coyne (2015) soulignent en particulier que, si les recherches et développements sur les procédés de recyclage des Terres Rares se sont intensifiés en 2010-2011 avec l'envolée momentanée des prix de ces substances (cf. chap. 5), les prix actuels des Terres Rares, qui ont fortement chuté depuis 2012, ne permettent pas de rendre le recyclage des Terres Rares économiquement supportable industriellement dans la plupart des cas.

[84] Tsamis & Coyne : Recovery of Rare Earths from Electronic Waste, an opportunity for high-tech SMEs, Rapport au Parlement Européen, février 2015

4.6. LIMITES SOCIO-POLITIQUES ET TECHNICO-ÉCONOMIQUES DE L'OFFRE

4.6.1. Les quotas chinois

Pour favoriser la valorisation de sa production minière de Terres Rares et le développement des filières aval sur place, la Chine avait mis en place à partir de 2005 des quotas d'exportation de Terres Rares brutes (métaux, oxydes et autres composés). Ces quotas ont été pratiquement divisés par deux entre 2007 (de l'ordre de 60 kt d'OTR et 2010 (de l'ordre de 30 t d'OTR) (tab.24). Sur une production annuelle de l'ordre de 120 kt, la Chine est donc passée d'une autorisation d'exportation équivalente à environ la moitié de sa production en 2007 à une autorisation équivalente au quart en 2010.

	Quotas d'exportation						
	1er semestre		2ème semestre		Total année		
Année	Sociétés chinoises	JV chinois / non-chinois	Sociétés chinoises	JV chinois / non-chinois	Sociétés chinoises	JV chinois / non-chinois	**Total année**
2005							**65 680 t**
2006							**61 070 t**
2007							**59 643 t**
2008							**56 939 t**
2009	15 043 t	6 685 t	18 257 t	10 160 t	33 300 t	16 845 t	**50 145 t**
2010	16 304 t	5 978 t	6 208 t	1 768 t	22 512 t	7 746 t	**30 258 t**
2011	10 762 t	3 746 t	12 221 t	3 517 t	22 983 t	7 263 t	**30 246 t**
2012	16 066 t	5 160 t	6 340 t	3 430 t	22 406 t	8 590 t	**30 996 t**
2013	11 136 t	4 363 t	11 163 t	4 337 t	22 299 t	8 700 t	**30 999 t**
2014	10 756 t	4 354 t	12 036 t	3 465 t	22 792 t	7 819 t	**30 611 t**
2015			*Plus de quotas*				

Tableau 24 - Évolution des quotas chinois à l'exportation entre 2005 et 2015
(Sources : Roskill (2011) ; G.Hatch, TMR (2014), d'après le Ministère chinois du Commerce).

Parallèlement, la Chine avait mis en place des taxes à l'exportation, comprises entre 0 et 25 % selon les éléments et les composés, passés en 2011 à 15 à 25 %.

Ces contraintes et restrictions à l'exportation, à un moment où la demande mondiale en Terres Rares s'accroissait (élargissement des filières utilisatrices d'aimants permanents performants, généralisation des ampoules d'éclairage fluo-compactes, etc.) avaient conduit à de vives tensions sur le marché et à une envolée des prix (cf. chap.5).

En 2012, l'Union Européenne, les États-Unis et le Japon ont déposé plainte auprès de l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) sur ces pratiques. Les plaignants ont eu gain de cause en mars 2014, et la Chine a supprimé ses quotas à partir de janvier 2015, et supprimé ses taxes à l'exportation à partir du 2 mai 2015.

Dans les faits, du temps des quotas, une partie de la production était exportée en contrebande. Par ailleurs, l'assouplissement de la position officielle chinoise est aussi une réaction aux excédents du marché et à la baisse conséquente des prix.

La Chine a désormais prévu de réguler ses exportations de Terres Rares par la délivrance de Licences d'Exportation à un nombre limité de compagnies, et elle gardera donc vraisemblablement un niveau de contrôle significatif sur la part officielle de ses exportations.

Parallèlement, la Chine a supprimé ses taxes à l'exportation des Terres Rares, ainsi que du tungstène et de l'antimoine, au 1er mai 2015, suppression assortie de la mise en place de redevances à la production (taxes *ad valorem*) (Metal-Pages, SNL, avril 2015 ; Ecomine, mai 2015).

Ces redevances sont calculées sur la base de la valeur de vente de la substance (non pas sur le tonnage). La taxe *ad valorem* pour les TR légères a été fixée à 11,5 % en Mongolie intérieure, 9,5 % dans la province du Sichuan et 7,5 % dans la province de Shandong, et celle pour les TR moyennes et lourdes à 27 % dans tout le pays. Les taxes locales sont supprimées, ce qui représente un pas supplémentaire de contrôle du gouvernement central dans ce domaine.

Auparavant, il existait des redevances sur les concentrés de TR lourdes provenant des argiles ioniques, fixées par les gouvernements provinciaux, qui différaient d'une province à l'autre. La nouvelle redevance est plus élevée, et elle pourrait à terme se répercuter sur les prix, bien que cette répercussion ne se soit pas fait sentir en novembre 2015 (cf. chapitre 5).

4.6.2. La situation géopolitique et économique des principaux producteurs

En sus des mesures chinoises de préservation de ses ressources (quotas et taxes à l'exportation), un évènement géopolitique a affecté le marché des Terres Rares et contribué aux tensions sur le marché et à la flambée des prix de 2010-2011 : en septembre 2010, l'arraisonnement par la marine japonaise d'un bateau de pêche chinois à proximité des îles Senkaku, que le Japon considère comme japonaise mais que la Chine revendique sous le nom d'îles Diaoyu, conduit à un incident diplomatique entre ces deux pays, et la Chine décide en octobre un embargo sur ses livraisons de Terres Rares au Japon. Cet embargo a donné une impulsion supplémentaire à la montée des prix des Terres Rares et à la prise de conscience par les pays industriels de leur dépendance vis-à-vis de la Chine pour ces substances. Les craintes sur les approvisionnements avaient conduit les industriels et des négociants à faire des achats préventifs (stockages), ce qui avait encore accéléré la montée des prix.

Même si la tension est ensuite retombée, la situation diplomatique entre la Chine et le Japon, ainsi que Taïwan, au sujet de ces îles reste instable. Cela a poussé le Japon à intensifier ses recherches de sources d'approvisionnement alternatives (négociations avec l'Inde, recherche dans les fonds océaniques du Pacifique, etc.).

De leur côté, les nouveaux producteurs de l'OCDE tels que Molycorp aux États-Unis ou Lynas en Australie, qui avaient investi dans les années 2010-2012 pour mettre leurs mines en production, se trouvent en difficulté financière du fait de la chute des prix de 2012-2013, et les multiples autres projets miniers qui étaient annoncés dans le monde en 2011-2012 peinent à trouver des financements pour leur développement, et beaucoup sont mis en sommeil (cf. 4.2.2).

La situation de quasi-monopole de la Chine (toujours 85 à 90 % de la production mondiale) lui permet un certain contrôle sur les prix et elle peut donc influer sur la faisabilité économique ou non des nouveaux projets. Une décision chinoise de réduire les restrictions de production et d'exportation pourrait conduire à une inondation du marché et des effondrements supplémentaires des prix, contraignant les opérations extérieures à la fermeture. À l'inverse, des décisions chinoises de resserrage des contraintes à l'exportation, des mesures énergiques pour faire cesser les exportations illégales ou faire cesser les

exploitations trop agressives pour l'environnement, pourraient relancer les craintes sur les approvisionnements et la disponibilité physique, et pourraient conduire à de nouvelles hausses significatives des prix.

Parallèlement, la Chine cherche activement à investir et prendre des parts directes ou indirectes dans certains des projets hors Chine les plus prometteurs (Kvanefjeld au Groenland, Browns Range et Nolans Bore en Australie, Steenkampskraal en Afrique du Sud, Tantalus à Madagascar par exemple).

Pour les nouveaux projets, sachant que les sociétés juniors qui les développent n'auront généralement pas l'envergure nécessaire pour développer une filière de traitement jusqu'à la séparation des Terres Rares, elles ne pourront se concrétiser qu'avec des partenariats ou des contrats d'enlèvement ("off-take") avec des industriels spécialisés (tels que Solvay/Rhodia pour certains d'entre eux, cf. chap.6).

4.6.3. Les paramètres sociaux et environnementaux

Les sociétés non-chinoises cherchant à exploiter et produire des Terres Rares peuvent être confrontées à des campagnes d'opposition socio-environnementales qui peuvent conduire à retarder leurs prévisions de production (oppositions par exemple à l'usine de traitement de Lynas en Malaisie) et à les rendre plus coûteuses, voire non-économiques, et conduire à leur abandon. Elles peuvent aussi se voir refuser ou retarder des autorisations administratives d'opérer.

À l'inverse, les faibles contraintes environnementales sur les exploitations en partie illégales du sud de la Chine, associées à des coûts de main d'œuvre peu élevés, avaient largement contribué à un maintien des prix à un niveau faible avant la crise des prix des Terres Rares en 2010-2011. Elles ont aussi conduit à une distorsion des rentabilités économiques comparatives des opérations en Chine et hors Chine. Les autorités chinoises tentent désormais de mettre un terme aux exploitations illégales et de restructurer leurs opérateurs miniers sur les Terres Rares, en vue notamment d'une meilleure prise en compte du respect de l'environnement et de la minimisation des impacts.

4.7. STOCKAGES STRATÉGIQUES ET DESTOCKAGES

4.7.1. Stockages nationaux

Il y a peu d'information sur d'éventuels stocks de Terres Rares mis en place par les États.

Aux États-Unis, l'USGS, dans son édition 2014 du « Mineral Commodity Summaries », indique qu'il n'y a aucun stock gouvernemental de Terres Rares.

En Chine le Bureau d'État des Réserves Matérielles chinois (State Bureau of Material Reserves) détenait, à fin juillet 2014, 10 090 t d'OTR, dont 4 000 t d'oxyde mixte de praséodyme-néodyme, 500 t de Nd_2O_3, 500 t de Pr_6O_{11}, 1 200 t de Dy_2O_3, 300 t d'Er_2O_3, 500 t d'Eu_2O_3, 500t de Tb_4O_7, 2 500 t d'Y_2O_3 et 90 t de Lu_2O_3. (Investorintel, 2014 ; Roskill, 2015). D'après Roskill (2015), les 6 principaux opérateurs (cf. 6.1.1) sont censés stocker l'équivalent de 30 % du stock national, soit 3,03 kt d'OTR supplémentaires.

Les Terres Rares ne font pas partie des neuf métaux stratégiques[85] dont le Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) publie détenir un stock national.au Japon.

En Corée du Sud, le KORES (Korea Resources Corporation) avait stocké environ 62 t d'oxydes de Terres Rares en 2010 et avait annoncé en 2011 (lors de la "bulle" sur les Terres Rares) prévoir passer à 1 940 t en 2014 (100 jours de consommation) (Risk & Policy Analysts Ltd, mars 2012). L'état réel actuel des stocks n'est pas publié.

4.7.2. Stockages par les industriels

Il n'y pas de données publiées sur les stocks de Terres Rares qui auraient pu être stockés par les industries consommatrices. Toutefois, un tel stockage a vraisemblablement été envisagé, voire effectivement mis en place, notamment en 2010-2011, lorsque les craintes sur la pérennité des approvisionnements étaient les plus vifs et les prix en forte augmentation. Ces stockages préventifs ont fortement contribué à alimenter la bulle spéculative et à l'envolée des prix, puis ces mêmes stocks ont contribué ensuite à assécher la demande, conduisant à l'éclatement de la bulle et la chute des prix.

4.7.3. Stockage par les négociants et les ETF

Les ETF (Exchange Traded Funds) sont des produits financiers basés sur des matières premières physiques. Ils avaient d'abord été institués sur des métaux précieux (or, platinoïdes) puis se sont diversifiés, et certains sont même apparus récemment sur les Terres Rares, comme en France MTL Index (http://mtlindex.com), qui s'est lancé en 2013 comme négociant en métaux rares, dont les Terres Rares, en constituant des stocks tampons financés par l'investissement privé. D'autres n'ont eu qu'une existence éphémère, comme le canadien Dacha Strategic Materials, qui aurait stocké jusqu'à 14 t de Terres Rares, et qui a disparu en juillet 2014.

Ces instruments spéculatifs contribue à accroître la volatilité des prix, tant à la hausse qu'à la baisse.

Il n'y a pas de publication d'éventuels stocks détenus par les négociants et les ETF.

4.8. PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION

La plupart des analystes prévoyaient une augmentation conséquente de la production de Terres Rares d'ici 2020, en particulier hors de Chine, avec l'entrée en production de divers nouveaux gisements découverts et étudiés ces dernières années.

Toutefois, de nombreux facteurs pèsent sur ces nouveaux projets et en retardent jusqu'ici la mise en production.

La première difficulté est liée à l'évolution récente des prix, qui ont atteint un niveau médiocre qui réduit ou annihile la rentabilité potentielle de nombre de projets qui avaient été explorés et étudiés les années précédentes. Déjà les deux principales sociétés occidentales qui ont récemment mis (ou remis) en production des gisements de Terres Rares, Molycorp à Mountain Pass aux États-Unis et Lynas à Mount Weld en Australie, opèrent désormais à perte (en 2015) et sont confrontées à des difficultés financières (cf. 6.1.2). La plupart des projets en développement sont désormais ralentis. Seuls les meilleurs d'entre eux, et en

[85] Chrome, cobalt, gallium, indium, manganèse, molybdène, nickel, tungstène et vanadium

particulier ceux qui sont suffisamment enrichis en Terres Rares lourdes, comme Norra Kärr en Suède ou Nechalacho au Canada, par exemple, sont susceptibles d'arriver en production à plus ou moins court terme.

Une deuxième difficulté tient au traitement métallurgique et industriel complexe des Terres Rares. En effet, pour obtenir des Terres Rares commercialisables, une société minière junior doit non seulement avoir une compétence minière, mais également identifier une filière métallurgique, car la valeur ajoutée de ces éléments ne réside pas dans leur forme brute mais, et ce de manière beaucoup plus importante que pour d'autres métaux, dans leur séparation et l'obtention de concentrés d'extrême pureté. Ainsi, tout opérateur minier de Terres Rares doit-il d'une manière ou d'une autre également contrôler l'étape de la séparation, souvent en partenariat avec le petit nombre d'entreprises maîtrisant cette expertise (Solvay, Molycorp-Silmet, Shin-Etsu, par exemple, cf. 6.2).

Ensuite, pour s'assurer d'avoir un acheteur pour la production de concentrés ou oxydes, en l'absence de place d'échange, le schéma recherché est celui de contrats d'enlèvement ("off-take"), où les termes sont prédéfinis avec un acheteur attitré.

Enfin, l'un des problèmes est la proportion et la disponibilité naturelle relative de chaque élément, qui ne correspondent pas toujours aux besoins réels du marché. Lanthane et cérium sont en effet en général plus abondants que les Terres Rares les plus recherchées, comme le néodyme et le praséodyme parmi les Terres Rares légères, et l'europium, le terbium et le dysprosium parmi les Terres Rares intermédiaires ou lourdes. Ainsi, pour obtenir les quantités nécessaires des Terres Rares les plus critiques (Nd, Pr, Eu, Tb, Dy), il est incontournable d'extraire et séparer également de grandes quantités de cérium et lanthane dans la chaîne de production, puisqu'elles sont associées dans les mêmes gisements. Or ces Terres Rares légères, plus abondantes, sont déjà en situation excédentaire sur les marchés.

Les problèmes de visibilité et de prévisibilité des marchés nécessaires pour encourager les investissements pour développer de nouveaux gisements sont encore accentués par le contraste entre :

- une demande rapidement évolutive des Terres Rares, d'une part en raison des innovations rapides des industries de haute technologie, d'autre part en raison de basculement qui pourraient être dus à des décisions politiques : si les sociétés occidentales décidaient un basculement massif des capacités de production d'énergie vers des énergies renouvelables, cela pourrait conduire à une forte hausse de la demande. Il en serait de même s'il y avait des décisions volontaristes et incitatives pour une plus rapide transition du parc automobile vers des véhicules hybrides ou électriques ;
- une offre fondamentalement moins flexible, puisque le processus de mise en production d'un gisement nouvellement découvert prend généralement au moins de l'ordre d'une décennie.

Comme exposé en 4.2.1, il ne devrait guère y avoir de problème de disponibilité de ressources en terre à court ou moyen terme, les ressources de Terres Rares déjà identifiées étant suffisantes même avec des accroissements de production. Mais il reste de réels aléas sur la disponibilité des Terres Rares extractibles et matériellement disponibles pour les consommateurs à court terme.

À court terme, il est vraisemblable que la Chine pourra, même éventuellement seule, assurer une production minière de Terres Rares suffisantes pour approvisionner un marché même croissant. Le reste du monde, et en particulier l'Europe, restera donc très dépendant et très tributaire de la politique industrielle et commerciale chinoise.

5. Prix des Terres Rares

5.1. ÉTABLISSEMENT DES PRIX

Il n'y a pas de cotation publique des Terres Rares sur les marchés boursiers[86]. Les prix s'établissent généralement par négociations directes de contrats entre producteurs primaires et transformateurs ou utilisateurs, éventuellement par l'intermédiaire de négociants ("traders"). Les échanges sont donc relativement opaques en termes de volumes et de prix.

Metal Pages (www.metal-pages.com) publie deux fois par semaine, une fourchette de prix spot d'échanges de 10 Terres Rares (La, Ce, Nd, Pr, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy et Y) d'une part sous forme d'oxyde, d'autre part sous forme de métal, en US$/kg FOB[87] Chine depuis avril 2001. Il publie aussi ces prix en yuans (CNY) sur le marché intérieur chinois depuis novembre 2007, d'autre part. Il publie depuis plus récemment des prix du mischmetal 35 % La - 65 % Ce, de ferrodysprosium à 80 %, de carbonate de cérium et de mixte Pr-Nd. Il publie aussi depuis mai 2012 des prix CAF Europe des oxydes de Ce, Nd et Y, ainsi que, depuis mai 2015, de Tb, Dy et Er.

Industrial Minerals (www.indmin.com), du groupe Metal Bulletin, publie des fourchettes des prix spot d'échanges de 5 oxydes de Terres Rares à 99 % (La_2O_3, CeO_2, Pr_6O_{11}, Nd_2O_3 et Eu_2O_3) en US$/kg FOB Chine. Ces prix sont légèrement décalés par rapport à ceux publiés par Metal Pages (cf. tab.25).

Ces prix publiés par Metal Pages et Industrial Minerals sont cependant ceux du marché spot, sans qu'il soit précisé quelle proportion du marché global représente le marché spot. Ces prix spot ne doivent pas être considérés comme les prix réels moyens d'échange des Terres Rares, mais comme des prix indicatifs, et en particulier des indicateurs de tendance, reflétant la tension ou le relâchement du marché et l'équilibre offre-demande.

	La_2O_3		CeO_2		Pr_6O_{11}		Nd_2O_3		Eu_2O_3	
	Metal-Pages	Industrial Minerals	Metal-Pages	Industrial Minerals	Metal-Pages	Industrial Minerals	Metal-Pages	Industrial Minerals	Metal-Pages	Industrial Minerals
Janvier 2015	4.6 $/kg	4.8 $/kg	4.5 $/kg	4.8 $/kg	117 $/kg	115 $/kg	58 $/kg	63 $/kg	705 $/kg	740 $/kg
Février 2015	4.6 $/kg	4.8 $/kg	4.5 $/kg	4.6 $/kg	117 $/kg	116 $/kg	58 $/kg	63 $/kg	705 $/kg	720 $/kg

Tableau 25 - Comparaison des prix moyens des 5 oxydes de Terres Rares publiés par Industrial Minerals avec ceux publiés par Metal Pages

La bourse de métaux de Fanya (Fanya Metal Exchange, www.fyme.cn/english/), spécialisée dans les métaux mineurs, lancée en avril 2011 à Kunming (Yunnan, Chine), avait commencé à vendre et coter les oxydes de terbium et de dysprosium le 31 octobre 2014[88], et prévoyait

[86] À l'exception de la bourse chinoise de Fanya entre 2011 et 2015 pour certains éléments des Terres Rares, cf. plus bas.

[87] FOB = Free on Board, terminologie de commerce international d'acceptation internationale, que l'on peut désigner plus spécifiquement en français par FAB (Franco à Bord). Désigne le prix d'une marchandise chargée sur un navire au départ d'un port du pays d'exportation (donc non compris les frais de transport maritime, d'assurance, de dédouanement et de livraison).

[88] Le communiqué de Fanya cite que les quantités d'oxyde de dysprosium et de terbium mises en vente ce premier jour (31/10/2014) ont été vendus en 5 secondes et 24 secondes respectivement, pour des valeurs de 22.35 M CNY et 8.24 M CNY respectivement. Il ne publie pas les quantités correspondantes, mais au premier cours publié début novembre 2015, cela correspond à 14,6 t Dy_2O_3 et 2,9 t Tb_2O_3.

faire de même pour l'oxyde de néodyme à travers la Xiamen Fanya Mercantile Exchange Centre à Xiamen (Fujian) à partir de mars 2015. Cette place a ensuite été prise dans une tourmente à partir d'août 2015, avec des soupçons de fraude et des pertes massives en particulier pour tous les chinois qui y avaient investi. Le site Internet de Fanya a fermé en novembre, les actifs ont été placés sous contrôle du gouvernement provincial, et le dossier est toujours en cours d'évolution.

Il n'y a pas de recueil régulier et publié des prix des autres Terres Rares. Des fourchettes de prix peuvent être constatées sur le site de commerce en ligne chinois Alibaba (www.alibaba.com), qui fournit des contacts avec les sociétés chinoises exportatrices. Parmi les vendeurs de Terres Rares listés, la plupart n'affichent pas de prix ou affichent des fourchettes très larges[89], les prix de transaction n'étant fixés qu'après demande et établissement d'un devis. Toutefois, certains vendeurs affichent des fourchettes de prix relativement resserrées, qui sont donc un bon indicateur de ce que pourrait être le prix réel pratiqué. C'est le cas en particulier de Chinalco Rare Earths (Jiangsu) Co Ltd, qui propose à la vente des oxydes de Terres Rares (sauf Tm) à 99,9% à des prix affichés assez précis. Des prix indicatifs de l'oxyde de thulium ou de l'oxyde de scandium peuvent être trouvés chez d'autres vendeurs (cf. tab. 26).

5.2. ÉVOLUTION RÉCENTE DES PRIX

Les différents éléments des Terres Rares ont des prix qui s'échelonnent du simple au centuple ou davantage selon les éléments : ainsi le prix moyen du lanthane métal au 3ème trimestre 2015 était de 6,02 US$/kg, tandis que celui du terbium était de 703 US$/kg, plus de cent fois plus élevé.

Ces prix ont aussi fortement varié dans le temps, avec des prix multipliés par plusieurs dizaines entre 2002-2003 et un pic en juillet 2011, puis ont fortement baissé depuis lors, avec des prix au 3ème trimestre 2015 divisés par 8 ou 10 pour Nd, Dy, Tb et Sm et par 15 pour Eu, et par 27 pour La et Ce sous forme métal par rapport au pic de 2011, et encore davantage pour les oxydes.

Le tableau 26 ci-après récapitule les prix des différentes Terres Rares sous forme de métal ou d'oxyde au 3ème trimestre 2015, les compare entre eux et à leur maximum de juillet 2011. Le tableau est classé par ordre de prix actuels des métaux croissants, pour ceux dont les prix sont publiés par Metal Pages, suivis des autres.

[89] Voire farfelues : il semble qu'il puisse subsister des problèmes de traduction et d'ajustements d'unités dans la version anglaise du site.

	Prix moyen au 3ème trimestre 2015 FOB Chine US$/kg		Prix moyen 2002-2003 FOB Chine US$/kg		Prix maxi de juillet 2011 FOB Chine US$/kg		Facteur de division des prix entre juil. 2011 et le 3ème trim. 2015		Facteur de multiplication des prix entre 2002-2003 et le 3ème trim. 2015	Source
	Métal	**Oxyde**	Métal	Oxyde	Métal	Oxyde	Métal	Oxyde	Métal	
La	**6.0**	**2.3**	3.4	1.7	166	152	27.6	67.2	1.8	Metal Pages
Ce	**6.2**	**2.2**	3.4	1.8	169	158	27.3	71.3	1.8	Metal Pages
Sm	**17.5**	**2.6**	12.6	2.8	191	129	10.9	48.9	1.4	Metal Pages
Y	**44**	**5.6**	33	*n.d.*	210	183	4.8	32.7	1.3	Metal Pages
Gd	**61**	*n.d.*	*n.d.*	*n.d.*	226	203	3.7			Metal Pages
Er	*n.d.*	**37***	*n.d.*	*n.d.*	*n.d.*	*n.d.*				Metal Pages
Nd	**55**	**42**	6.7	4.3	468	338	8.5	8.0	8.3	Metal Pages
Pr	**90**	**58**	6.4	4.1	281	249	3.1	4.3	14.0	Metal Pages
Dy	**324**	**234**	32	18	3 410	2 840	10.5	12.2	10.1	Metal Pages
Eu	**445**	**209**	785	*n.d.*	6 760	5 870	15.2	28.1	0.57	Metal Pages
Tb	**703**	**489**	205	*n.d.*	5 110	4 510	7.3	9.2	3.4	Metal Pages
Yb		**65****								Chinalco Rare Earths (Jiangsu) Co Ltd, mai 2015
Ho		**82****								
Tm		**275****								
Lu		**1 550****								
Sc	**4 200*****	**2 150******		Changsha Santech Materials Co Ltd / Changsha Easchem Co Ltd, nov.2015						

** Prix CAF Europe*
*** http://chinalco-jsre.en.alibaba.com/productlist.html, accédé en mai 2015*
**** www.alibaba.com/product-detail/High-Pure-Scandium-Pieces-99-999_1533256598.html le 25/11/2015*
***** www.alibaba.com/product-detail/Scandium-Oxide-99-99-99-999-_60208805329.html le 25/11/2015*

Tableau 26 - Prix des Terres Rares FOB Chine en US$/kg.

Les figures 50 et 51 illustrent l'évolution des prix de celles des Terres Rares publiés par Metal Pages (moyenne de la fourchette bihebdomadaire de prix) depuis 2002, sous forme métallique ≥ 99 %, en US$/kg FOB Chine, depuis 2002, en deux diagrammes séparés par classes de prix pour des raisons d'échelles et de lisibilité. La figure 51 montre les moins chers (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd et Y), et la figure 52 les plus chers (Eu, Tb et Dy),

Les figures 52 et 53 illustrent l'évolution des prix de ces mêmes Terres Rares sous forme d'oxyde, d'une part en US$/kg FAB Chine, d'autre part sur le marché chinois, publiés en yuans chinois (CNY) par kg ex entrepôt, depuis 2008[90], et convertis ici aux taux de change du jour de chaque prix de façon à permettre la comparaison des prix intérieurs et à l'export.

La figure 54 illustre l'évolution plus récente des prix des oxydes de terbium et de dysprosium, avec, en plus des prix publiés par Metal-Pages figurant déjà sur la fig. 54, les cotations au Fanya Metal Exchange entre novembre 2014[91] et juin 2015.

On constate sur les diagrammes des figures 50 à 53 une très forte flambée des prix de toutes les Terres Rares, amorcée début 2010, amplifiée à partir de février 2011, et ayant atteint son paroxysme mi-juillet 2011. Le 14 juillet 2011, le prix du dysprosium-métal a atteint 3 410 US$/kg, soit une multiplication par un facteur 106 par rapport au prix moyen de ce métal au cours des années 2002-2003 (il était alors de 32,1 US$/kg), soit une augmentation

[90] Metal Pages publie les prix des oxydes ainsi que des métaux FAB Chine depuis 2002. En revanche il ne publie les prix intérieurs chinois que depuis fin 2007.

[91] Première vente de Tb_4O_7 et de Dy_2O_3 au Fanya Metal Exchange le 31/10/2014.

de 10 500 %[92]. Le prix du néodyme a atteint 467 US$/kg le 19 juillet 2011, soit une multiplication par un facteur 70 par rapport au prix moyen de ce métal au cours des années 2002-2003 (il était alors de 6,67 US$/kg).

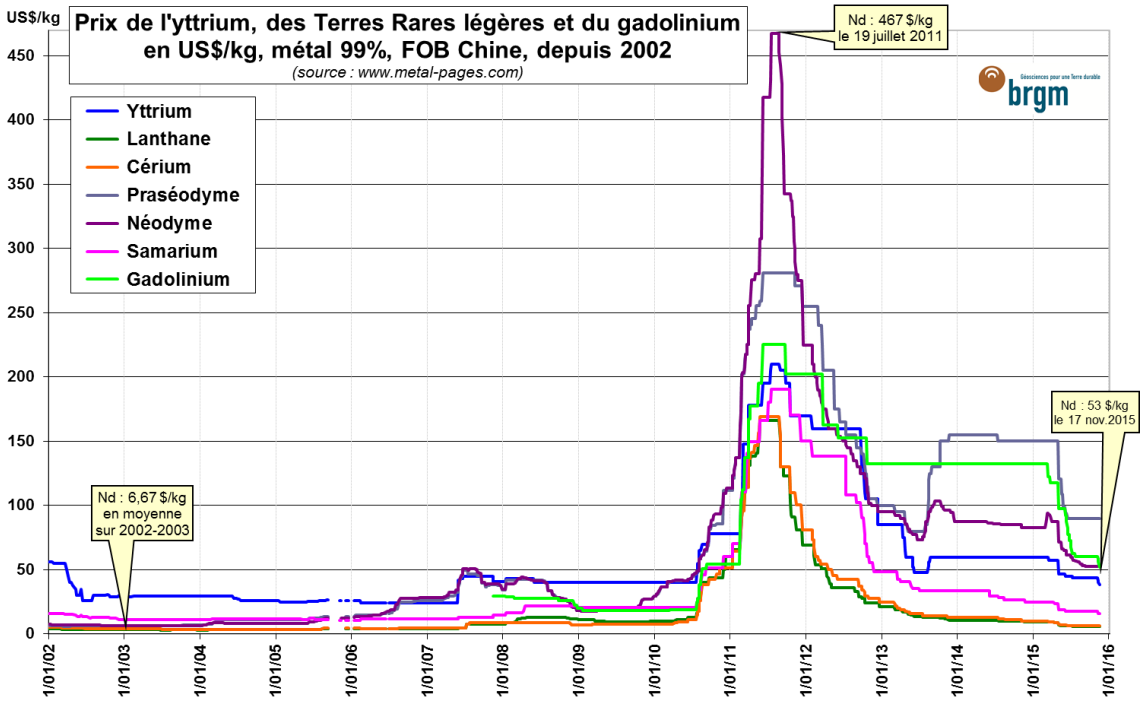


Figure 50 - Évolution des prix de l'yttrium, des Terres Rares légères (lanthane, cérium, praséodyme, néodyme, samarium) et du gadolinium sous forme métal ≥99% FAB Chine depuis 2002 (source : www.metal-pages.com).

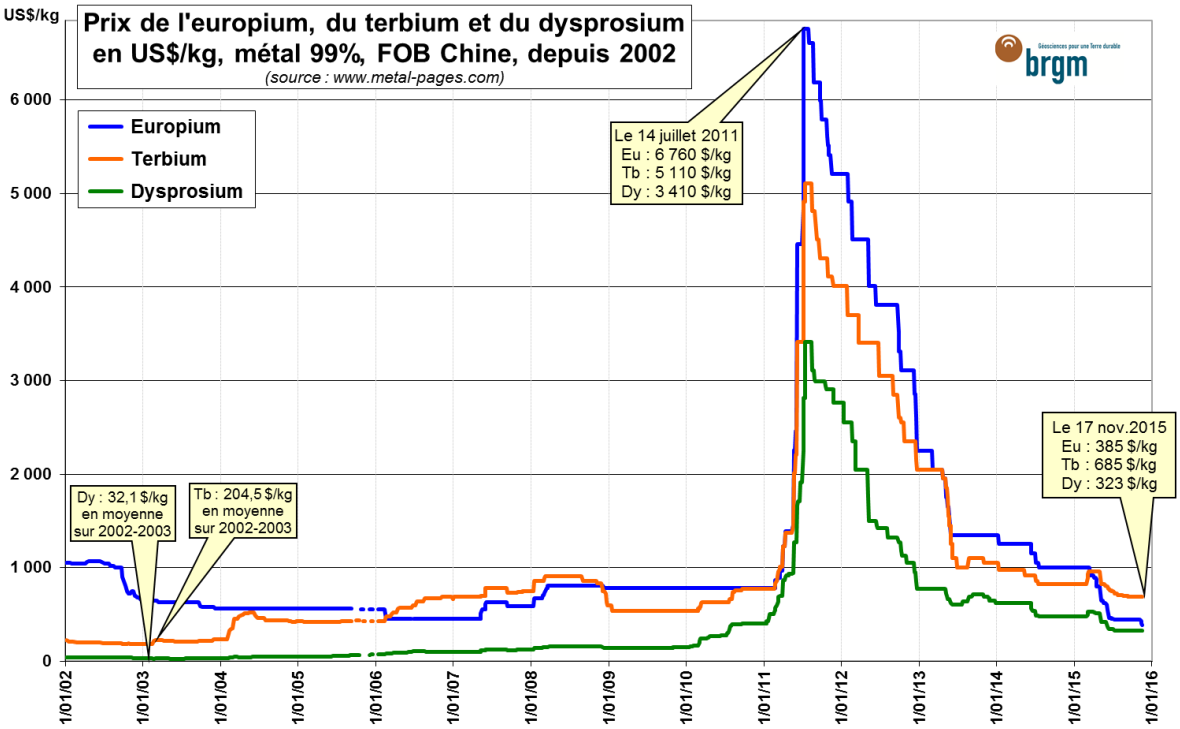


Figure 51 - Évolution des prix de l'europium, du terbium et du dysprosium sous forme métal ≥ 99 % FAB Chine depuis 2002 (source : www.metal-pages.com).

[92] Ceci constitue vraisemblablement un record absolu, toutes matières premières confondues.

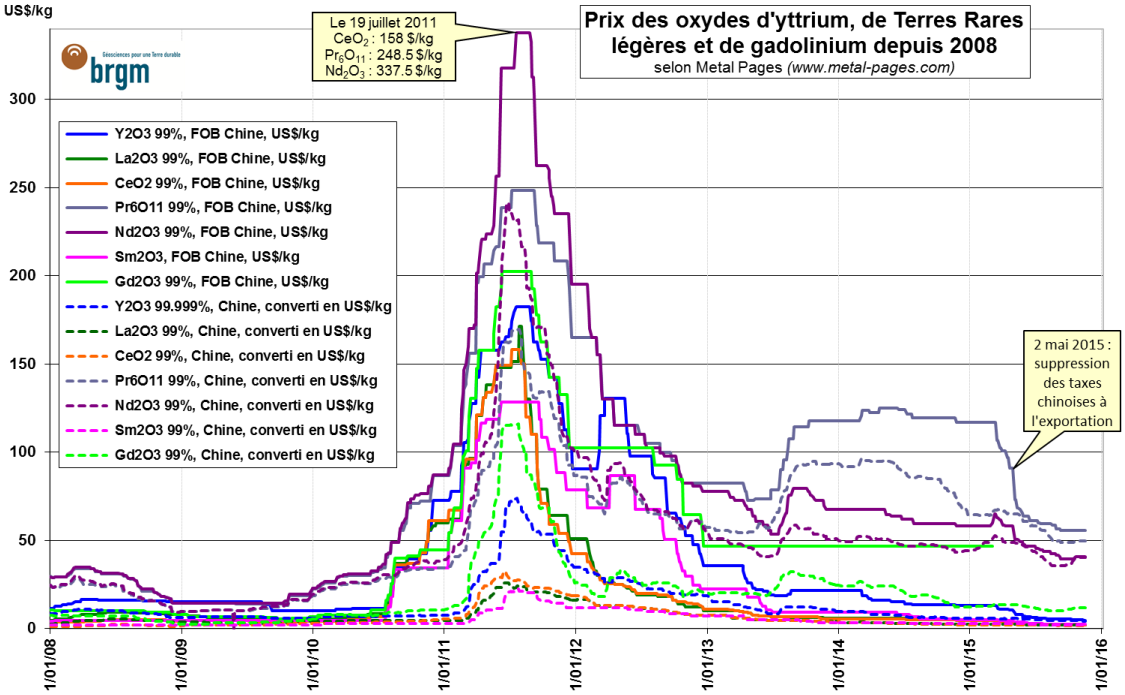


Figure 52 - Évolution des prix de l'yttrium, des Terres Rares légères et du gadolinium sous forme d'oxyde depuis 2008 pour l'export (FAB Chine en US$/kg) et pour le marché intérieur chinois (en CNY/kg) (source : www.metal-pages.com).

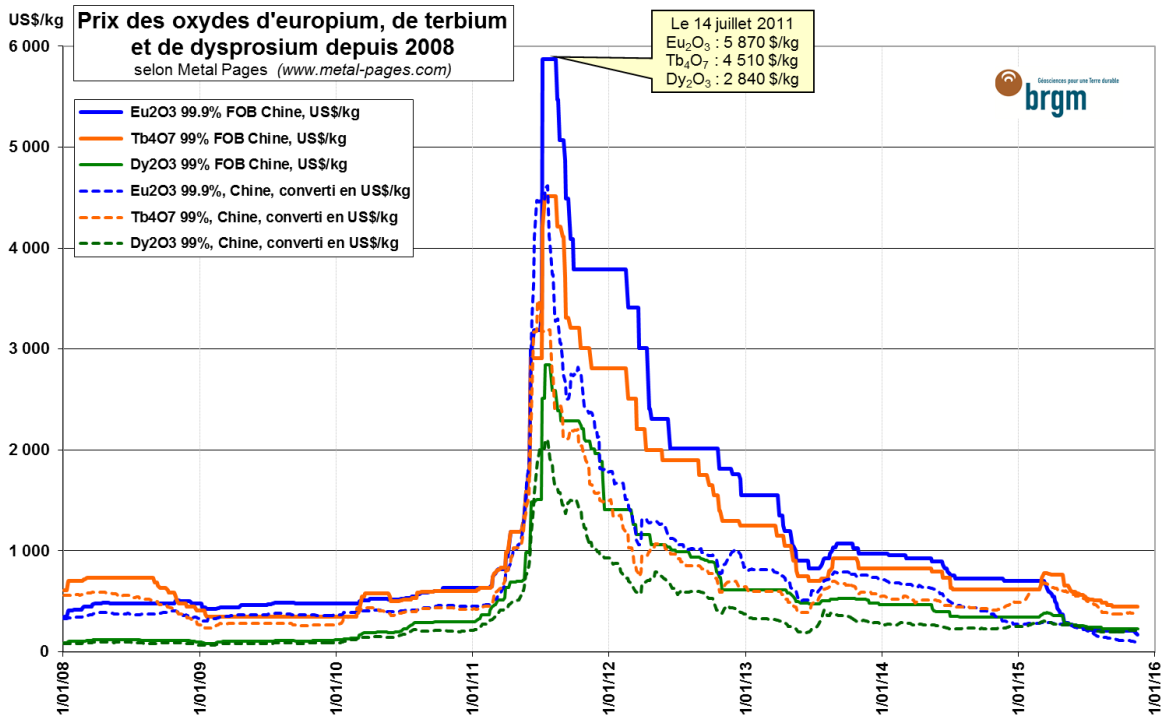


Figure 53 - Évolution des prix de l'europium, du terbium et du dysprosium sous forme d'oxyde depuis 2008 pour l'export (FAB Chine en US$/kg) et pour le marché intérieur chinois (en CNY/kg) (source : www.metal-pages.com).

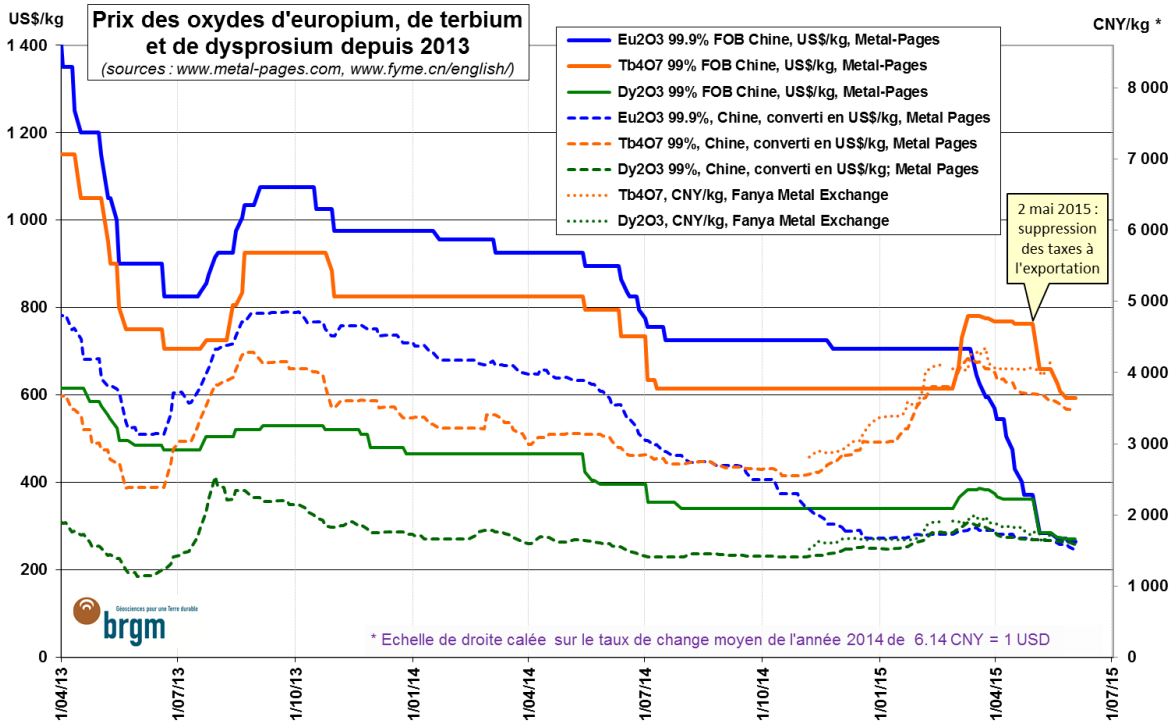


Figure 54 - Évolution des prix des oxydes d'Eu, Tb et Dy depuis avril 2013 pour l'export (FAB Chine en US$/kg) et pour le marché intérieur chinois en CNY/kg selon www.metal-pages.com, et de la cotation des oxydes de Tb et Dy à la bourse de Fanya depuis nov. 2014, en CNY/kg.

La montée en flèche des prix en 2010-2011 avait été déclenchée par la conjonction :

- d'une décision de forte réduction des quotas chinois à l'exportation (passés de ~60 kt en 2006-2007 à 57 kt en 2008, 50 kt en 2009 puis 30 kt par an à partir de 2010) et ;
- d'une augmentation de la demande et d'une anticipation d'une poursuite de cette augmentation, plus particulièrement pour les aimants permanents (poussée en faveur des énergies renouvelables, dont les éoliennes ; anticipation, à l'époque, d'un décollage significatif de la part de marché des véhicules électriques ; etc.) et les luminophores (généralisation du remplacement des ampoules à incandescence par des ampoules fluo-compactes).

L'incident des îles Senkaku / Diaoyu en septembre 2010 entre la Chine et le Japon (cf. 4.6.2), qui avait conduit la Chine à décréter un embargo sur les exportations de Terres Rares vers le Japon en octobre 2010, cité par certains comme le déclencheur de la flambée des prix des Terres Rares, n'a en réalité fait qu'accentuer la hausse des prix déjà amorcée plusieurs mois auparavant et qui s'est poursuivie plusieurs mois après.

Les menaces sur les approvisionnements pour le Monde hors Chine, consécutive d'une part à la division progressive par deux des quotas d'exportation chinois, d'autre part à cet embargo temporaire vers le Japon, a conduit les industriels utilisateurs à acheter pour constituer des stocks préventifs, ce qui a contribué à faire monter les prix, le tout accentué par un facteur spéculatif.

Selon un mécanisme classique de « bulle », la flambée des prix a conduit à une baisse de la demande, d'une part par économie (entre autres par un moindre gaspillage et un meilleur recyclage des chutes de fabrication, cf. 4.5.1), d'autre part par substitution et retour à des technologies moins performantes, en particulier dans une partie des secteurs d'usage des aimants permanents, le tout dans un contexte de morosité économique en particulier en Europe (faiblesse de la construction automobile européenne, par exemple, en 2011-2013).

Cette baisse de la consommation, assortie à un report de cette consommation sur les stocks préventifs constitués, a conduit à un « éclatement » de la bulle et à une baisse quasi-continue des prix pendant 2 ans, entre mi-2011 et mi-2013.

Parallèlement, les hausses de prix amorcées en 2010 et les inquiétudes associées sur les approvisionnements avaient aussi conduit nombre d'investisseurs à rechercher des ressources minières en Terres Rares ailleurs qu'en Chine. Ainsi la société Molycorp a remis en état de produire l'ancienne mine californienne de Terres Rares de Mountain Pass, qui avait fermé en 2002 et a repris une production en 2012, et une foison de nouveaux projets a vu le jour, essentiellement sur investissements de sociétés juniors. Le plus avancé a été le projet de Mount Weld (société Lynas), en Australie-Occidentale, qui a pu démarrer une production commercialisable en 2013. Parmi les centaines d'autres nouveaux projets, quelques dizaines sont apparus comme pouvant potentiellement entrer en production entre 2015 et 2018, atténuant ainsi une partie des inquiétudes à moyen terme sur les approvisionnements, en particulier sur les Terres Rares légères dont Nd et Pr, déjà produits par Molycorp et Lynas. Quelques projets devraient aussi pouvoir contribuer à l'approvisionnement en Terres Rares lourdes (en particulier Tb et Dy), mais ils sont moins avancés (cf. chapitre 4).

La chute des prix de 2011-2015 a ensuite conduit à l'abandon ou au report d'investissements et à la mise en sommeil d'une bonne partie des nouveaux projets miniers. Elle a aussi conduit les sociétés Molycorp et Lynas, qui avaient démarré leurs exploitations, à d'importantes difficultés financières et à la chute de leur valeur boursière (cf. 6.1.2).

Certains prix (Nd, Dy, Tb) ont connu de légers rebonds temporaires en septembre 2013 et en février-mars 2015, mais se sont à nouveau dégradés depuis.

La plupart des prix étaient, au 3ème trimestre 2015, encore 1,3 à 1,8 fois supérieurs à ce qu'ils étaient en 2002-2003 pour La, Ce, Sm et Y, 3 fois supérieur pour Tb, 8 à 14 fois supérieurs pour Pr, Nd, Dy, mais le prix de l'europium, qui était la plus chère de toutes les Terres Rares en 2001-2002 (prix supérieur à 1 000 US$/kg d'avril 2001 à septembre 2002) est descendu nettement en dessous de son prix moyen de 2002-2003.

L'europium était en effet, dans les années 1980-1990, l'élément qui tirait à lui seul le marché des Terres Rares[93], grâce à son utilisation pour les poudres luminophores des téléviseurs couleur à tube cathodique. La disparition progressive des tubes cathodiques entre 2004 et 2008, et aujourd'hui la décroissance attendue de la part des ampoules fluo-compactes dans le marché de l'éclairage, ont largement atténué la demande en europium, dont les usages alternatifs sont secondaires.

Suite à la plainte des États-Unis, de l'Union Européenne et du Japon à l'OMC en 2012 sur les restrictions chinoises à l'exportation, la Chine a renoncé aux quotas à l'exportation pour 2015, puis a supprimé les taxes à l'exportation à partir du 2 mai 2015. Ces contraintes étaient jugées comme faussant la compétitivité des industries utilisatrices (cf. 4.6.1). On constate sur la figure 54 des écarts significatifs entre les prix intérieurs chinois et les prix FOB à l'exportation jusqu'à début 2015, puis une convergence rapide de ces prix début mai 2015 dès la suppression de la taxe. Il y avait d'ailleurs déjà eu un rapprochement temporaire des prix intérieur et FOB de l'oxyde de terbium en février 2015.

La taxe intérieure sur la production (taxe ad valorem), mise en place en mai 2015 (cf. 4.6.1), qui aurait pu renchérir les Terres Rares tant sur le plan intérieur qu'à l'export, n'avait pas

[93] C'est pourquoi les gisements à teneur en europium améliorée faisaient l'objet d'une attention spécifique, comme les "monazites à europium" de Bretagne (cf. 4.2.3).

encore eu un tel effet début juin 2015, bien au contraire, puisque les prix même intérieurs ont continué à baisser en mai 2015. Il faudra probablement quelques mois pour que les effets des nouvelles taxes se fassent sentir sur les prix.

5.3. ÉQUILIBRE OFFRE-DEMANDE ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION FUTURE DES PRIX

Comme évoqué en 3.3.2, nombre d'analystes prévoient une poursuite de la croissance du marché des aimants permanents et de la demande des Terres Rares utilisées dans cette filière (surtout Nd et Dy, mais aussi Pr et Tb). Cette demande s'ajustera aussi en fonction des prix, puisque l'utilisation des aimants à Terres Rares résultent d'un équilibre prix-performances : des prix très élevés conduiront à réduire la part des technologies à Terres Rares, voire la quantité de telle ou telle Terre Rare (le dysprosium en particulier), en abaissant un peu les performances, à l'inverse si les prix restent bas cela encouragera à la réutilisation de ces Terres Rares pour optimiser les performances.

Pour les luminophores, il est encore difficile de quantifier l'impact de la prise de part de marché progressive par les ampoules à LED au détriment des fluocompactes. Si certains anticipent une baisse significative dans les pays les plus avancés (Japon, États-Unis, Europe), elle est moins facile à évaluer dans les pays émergents ou les pays en voie de développement compte tenu des différentiels résiduels des prix.

Côté offre, elle est très difficile à évaluer avec précision, en particulier pour les Terres Rares lourdes, compte tenu de la part importante de la production et des exportations illégales de Terres Rares chinoises (évaluées entre 10 et 40 %). Il est difficile aussi de prévoir de manière fiable ce que sera la production hors Chine : les prix médiocres actuels ne favorisent pas les investissements en développement de nouveaux projets, les mines actuelles connaissent des difficultés, et la Chine, de par sa situation de domination et ses capacités de production, peut intervenir pour faire évoluer les prix et influer sur la rentabilité des opérations extérieures.

Globalement, la production de Terres Rares dans leur ensemble est excédentaire et les analyses les plus récentes tendent à prévoir qu'elles le resteront pour les quelques prochaines années (Roskill, 2015, et fig. 42). Même sans avoir des chiffres suffisamment précis de production et de consommation par élément, la seule observation de leurs prix, qui continuent à baisser ou au mieux à stagner pour chaque élément au 3ème trimestre 2015, montre que le marché n'est pas déficitaire.

La tension est cependant différente selon les éléments. Le lanthane et le cérium resteront probablement durablement en surproduction, puisqu'ils sont une production fatale de la séparation des Terres Rares plus recherchées que sont Nd, Pr et les Terres Rares lourdes.

La demande peut largement fluctuer en fonction des évolutions technologiques. Ainsi l'europium, qui était de loin la plus chère des Terres Rares avant 2005, est la seule dont le prix soit passé fin 2015 en dessous de son prix de la période 2002-2003 (plus de 1 000 US$/kg au 1er semestre 2002, 385 US$/kg en novembre 2015).

La demande générale en Terres Rares devrait cependant continuer à augmenter (5 à 6 %/an, cf. 3.3.2), et la production de Terres Rares devra augmenter pour y répondre. Les ressources sont suffisantes pour y faire face. Les travaux d'exploration menés dans le Monde entier en 2010-2012 ont montré que bien des gisements potentiels existent hors de Chine. Mais si la production chinoise venait à faiblir ou à subir de nouvelles restrictions, le délai nécessaire à la mise en production des autres gisements pourrait à nouveau conduire à une situation de déficit, et de remontée des prix.

6. La filière industrielle

Les chaînes de valeur de valorisation des Terres Rares vont de l'extraction minière et de concentration sur site (production de concentrés minéraux) à l'extraction des Terres Rares mélangées sous forme de composés[94] (oxydes, carbonates, etc.), puis à la séparation (partielle ou totale selon les applications), à la préparation des produits intermédiaires (poudres métalliques, composés purs) et enfin aux produits commerciaux utilisables dans leurs applications finales, comme illustré en figure 55 pour les aimants permanents.

La chaîne de valeur globale des terres reares utilisées dans les aimants permanents
(traduit et adapté de Roskill / IMCOA 2012)

Exploitation minière et concentration	Extraction des composés de TR	Séparation des TR	Fabrication des alliages magnétiques	Aimants Nd-Fe-B
Chine Bayan Obo (bastn./monaz.) SE Chine (argiles ioniques) Sichuan (bastnaésite) Etc. **Etats-Unis** Molycorp **Australie** Lynas **Inde** Indian Rare Earth **Russie** Solikamsk (loparite)	**Chine** Baotou rare earth Mianning Fanxing Mianning Beida Etc. **Etats-Unis** Molycorp **Australie** Lynas **Inde** Indian Rare Earth	**Chine** Baotou rare earth Molycorp Liyang Rhodia Mianning founder China RE holding >100 petites sociétés **Etats-Unis** Molycorp **Europe** Solvay/Rhodia Silmet Treibacher **Japon** Shin Etsu Mitsui Mining & Smelting Quelques autres sociétés	**Chine** Baotou rare earth Molycorp (Neo) Jingxi Magnetism Ningbo Yunsheng Shanghai Roco Ganzhou Qiangdong Grirem Advanced Material 50-100 petites sociétés **Europe** Less Common Metals Vacuumschmelze **Japon** Shin Etsu Santoku Showa Denko Hitachi Metals Chuden Rare Earth **Vietnam** Santoku Shin Etsu	**Chine** Beijing Zhongka San Huan Advanced Technol.& Materials Ningbo Yunsheng Jingxi Magnetism Shanghai Roco Shanxi Huiqiang Magnets Hengdan Group Magnetics Ningbo Zhao Bao Molycorp (Neo) >50 petites sociétés **Japon** Shin Etsu Santoku Hitachi Metal Daido Electronics TDK-Hitachi Metal JV **Thaïlande** Molycorp (Neo) **Etats-Unis** Arnold Magnetics **Europe** Vacuumschmelze

Figure 55 - La chaine de valeur des Terres Rares de l'extraction à la fabrication d'aimants permanents, avec les principales sociétés impliquées en 2012 (Roskill/IMCOA, 2012).

Les sections 6.1 à 6.4 ci-après passent en revue les principales sociétés ou entités présentes dans ces chaines de valeur.

[94] Étape parfois qualifiée de "rare earth cracking" dans la littérature anglo-saxonne.

6.1. LES PRINCIPAUX PRODUCTEURS MINIERS DE TERRES RARES

6.1.1. Sociétés chinoises

La Chine est de loin le premier producteur mondial de Terres Rares, et la production minière légale est intégralement réalisée par des sociétés chinoises, généralement contrôlées par l'État ou les provinces.

Le plus gros producteur en tonnage, de Terres Rares légères dominantes, est historiquement Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth Hi-Tech Co., Ltd, du groupe Baotou Iron and Steel qui exploite le gisement de fer de Bayan Obo, en Mongolie intérieure, qui contient des Terres Rares en sous-produit. Il existe aussi un grand nombre d'autres sociétés exploitantes plus petites ou comme branches de consortiums plus grands ou plus généralistes, ainsi qu'une exploitation presque artisanale ou à petite échelle, en particulier sur les argiles ioniques du sud-est de la Chine, dont une partie est illégale.

Selon l'association chinoise de l'industrie des Terres Rares, 40 % des Terres Rares chinoises vendues seraient produites de façon illégale.

La Chine s'efforce depuis quelques années de rationaliser la gestion de ses ressources naturelles et a entrepris, début 2014, de restructurer son secteur des Terres Rares. Ainsi le ministère de l'industrie et des technologies de l'information (MIIT) a approuvé en janvier 2014 un programme de consolidation de ce secteur, avec la formation de 6 consortiums qui assureraient l'essentiel de la production et du traitement des Terres Rares (Ecomine, 2015). Cette consolidation, prévue s'achever en 2015, consiste à regrouper dans une même entité les différents acteurs d'une région : mines, fonderies, usines de séparation, fabricants de produits contenant des Terres Rares (aimants, luminophores etc.) et instituts de recherche.

Six entreprises d'État ont été chargées de la restructuration, Baotou Iron and Steel Group (le 1er producteur mondial de Terres Rares légères), Chinalco, Ganzhou Rare Earth, Guangdong Rising Nonferrous Metals Group Co Ltd, China Minmetals Corporation (le 1er producteur mondial de Terres Rares lourdes), et Xiamen Tungsten Co., Ltd.

Selon le MIIT, ces six groupes contrôlent actuellement environ 75 % des mines et presque 60 % des activités de fonderie et de séparation du pays.

Le tableau 27 récapitule de manière simplifiée les nouveaux groupes en cours de consolidation, leur principal groupe parent chargé de ces consolidations, et les provinces ou régions autonomes concernées.

Nouveaux consortiums	Groupe parent	Provinces / Régions autonomes
China Northern Rare Earth Group	Baotou Iron and Steel Group	Mongolie Intérieure, Gansu
Chalco/Chinalco	Chalco	Guangxi, Jiangsu, Sichuan, Shandong
China Minmetals	China Minmetals Corp	Guangdong, Jiangxi, Hunan, yunnan, Fujian, Guangxi
Xiamen Tungsten	Xiamen Tungsten	Fujian
China Southern Rare Earth Group	Ganzhou Rare Earth Group	Jiangxi
Guangdong Rare Earth Group	Guangdong Rising Nonferrous Metals Group	Guangdong

Tableau 27 - Récapitulatif simplifié des restructurations en cours (2014-2015) des entreprises du secteur des Terres Rares en Chine (d'après Écomine, mai 2015).

Début 2015, seul le regroupement des activités Terres Rares de la Mongolie Intérieure et du Gansu avait été complété pour donner naissance au consortium China Northern Rare Earth Group, sous la houlette de Inner Mongolia Baotou Steel Rare-Earth (Group) Hi-Tech Co, la filiale de Baotou Iron and Steel Group, qui dominait déjà le secteur dans la région. Le

processus sera plus long au sud, où les acteurs sont plus nombreux et de taille et d'importance comparables.

À fin février 2015, 66 concessions minières et 77 usines de transformation avaient été intégrées. Les producteurs restants seront intégrés dans l'un des super-groupes ou devront cesser leurs activités afin la fin 2015.

La restructuration, en renforçant le contrôle de l'État sur la filière, devrait limiter les capacités de production, en particulier par l'arrêt des unités de production obsolètes et polluantes, et enrayer la production illégale et la contrebande.

China Northern Rare Earth Group Hi-Tech Co., Ltd ("Northern Rare Earth", www.reht.com**),** est issue du regroupement, finalisé en décembre 2014, entre le géant **Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth Hi-Tech Co., Ltd** ("Baotou Rare Earth") et plusieurs séparateurs et raffineurs de Terres Rares de la province de Mongolie Intérieure. C'est désormais l'entité principale d'exploitation des Terres Rares dans le nord de la Chine, et le premier acteur à l'échelle internationale (près de 60 % de la production mondiale d'OTR). Exploitant les ressources du gisement de Bayan Obo, sa capacité de production attendue est de 73 500 t d'OTR/an. Baotou Rare Earth, dont Northern Rare Earth rassemble les activités, est un conglomérat présent de l'amont à l'aval de la filière des Terres Rares, extrayant et séparant des Terres Rares, en produisant des composés (oxydes, carbonates, chlorures) ou des métaux, des poudres de Nd-Fe-B pour la fabrication d'aimants, des aimants Nd-Fe-B, des poudres luminophores, des poudres de polissage, des anodes pour batteries NiMH, soit seul, soit en JV avec d'autres sociétés chinoises ou étrangères. Elle a en particulier une JV avec Solvay/Rhodia, Baotou Rhodia Rare Earth (Solvay/Rhodia 55%, West KAje Investment 15%, Baotou Rare Earth 30%), qui produit du chlorure de Terres Rares à partir de la bastnaesite de Bayan Obo.

En 2011, les capacités de production du groupe Baotou Rare Earths étaient les suivantes (Roskill, 2012) :

- concentrés de Terres Rares : 235 kt/an ;
- carbonates et chlorures de Terres Rares : 21,2 kt/an ;
- oxydes de Terres Rares séparés : 60 kt/an ;
- néodyme métal : 8 kt/an ;
- autres Terres Rares sous forme métal : 2,7 kt/an ;
- poudre d'alliage Nd-Fe-B pour aimants : 4 kt/an ;
- aimants Nd-Fe-B : 3 kt/an ;
- poudres pour luminophores : 100 t/an ;
- poudres de polissage : 2 kt/an ;
- alliage pour stockage d'hydrogène : 2 kt/an ;
- anodes pour batteries NiMH : 7 millions d'unités/an ;
- batteries NiMH : 7 millions d'unités/an.

China Minmetals Corporation (www.minmetals.com) est le premier producteur chinois de fer et d'acier et l'un de premiers acteurs mondiaux du secteur. Cette société est également présente dans les secteurs de la finance et de l'immobilier, ainsi que dans un certain nombre de métaux ferreux et non ferreux (cuivre, aluminium, tungstène, antimoine, étain, tantale, niobium, Terres Rares) à l'échelle de 28 pays. Sa filiale **China Minmetals Rare Earth Co., Ltd.** (www.cmreltd.com/en/) est elle-même composée de trois entités **:** Ganxian Hongjin

Rare Earth Co.,Ltd., basée dans la province du Jiangxi et spécialisée dans la séparation de Terres Rares individuelles, avec des capacités de traitement de l'ordre de 4 600 t/an de minerai d'argiles ioniques ; Damr Rare Earth Co.,Ltd, également située dans la province de Jiangxi et supposée avoir des capacités de traitement de 4 400 t/an de minerai, et un institut de recherche, Minmetals Rare Earth Research Institute, basé à Pékin. China Minmetals est également impliquée dans l'industrie des Terres Rares dans la province du Hunan et dans certaines provinces du nord de la Chine.

Xiamen Tungsten Co Ltd (XTC) (www.cxtc.com), (en chinois seulement), basée à Xiamen (Fujian), est une société cotée à la bourse de Shanghai (SSE: XTC) dont l'actionnaire majoritaire est China Minmetals. C'est une société intégrée, de la mine aux produits intermédiaires et semi-finis. Elle est l'un des plus gros producteurs de tungstène au monde, opérant deux mines et plusieurs unités de production en Chine[95]. La société a commencé à s'impliquer dans l'industrie des Terres Rares dès 2006. Ses usines de traitement se situent dans la municipalité de Longyan et auraient des capacités de séparation de 5 000 t/an de minerai, ainsi que la production de 2 000 t d'OTR de haute pureté. Elle est également présente dans la production de produits semi-finis, avec des capacités de 1 000 t/an pour les luminophores et 3 000 t/an d'alliages pour aimants permanents Nd-Fe-B (Roskill, 2011).

Aluminium Corporation of China Ltd. (Chalco ou Chinalco) (www.chalco.com.cn) est une société d'État basée à Pékin, deuxième producteur mondial d'alumine et troisième d'aluminium primaire Ce groupe a aussi étendu ses activités à un certain nombre de métaux non ferreux, dont les Terres Rares. Sa filiale **Chinalco Rare Earth (Jiangsu) Co. Ltd (JSRE)**, (www.chinalco-jsre.com) a été créée en 2011 par le rachat de plusieurs sociétés, dont Jiangxi Rare Earth and Rare Metals Tungsten Group (JXTC) et Funing Rare Earth Industry Co., Ltd, implantées dans les provinces du Jiangxi et Jiangsu. Les capacités annuelles de séparation de Terres Rares de JSRE seraient de 5 000 t d'OTR, 3 500 t de Terres Rares métal, et 2 500 t d'alliages de Terres Rares (Roskill, 2011). Chinalco a aussi des intérêts dans des projets de Terres Rares dans la province du Guangxi.

Guangdong Rising Nonferrous Metals Group (www.gdnmi.com.cn) est composé de 14 filiales implantées dans les provinces du Guangdong, du Jiangxi, du Hunan et de Hainan. Contrôlant notamment cinq mines de tungstène dans le Guangdong, ce groupe exploite aussi des Terres Rares, de l'étain et du cuivre. Huit de ses compagnies subsidiaires sont spécialisées dans les Terres Rares et opèrent trois usines de séparation ayant au total des capacités de séparation de 6 000 t/an de minerai. Il détient également une société d'import-export spécialisée. En outre, c'est la seule entreprise à détenir des permis d'exploration pour les Terres Rares dans la province du Guangdong.

Ganzhou Qiandong Rare Earth Group Co., Ltd (GQD) (www.jxgqd.com), est basée à Ganzhou, dans la province du Jiangxi. Créée en 1988, cette compagnie a désormais 13 filiales, dont quatre joint-ventures avec des entreprises internationales. Son expertise va de la séparation des Terres Rares, au commerce de nombreux produits semi-finis : matériaux magnétiques (alliages pour aimants permanents NdFeB), catalyseurs, luminophores et matériaux céramiques. Les capacités de ses usines de séparation sont estimées à 2 500 t/an de minerai, 3 000 t/an de Terres Rares sous forme de métal et 8 000 t/an d'alliages Nd-Fe-B (Roskill, 2011).

[95] Malgré son importance sur le marché et sa cotation en bourse, Xiamen Tungsten Co Ltd ne communique pas d'informations techniques ou de production directement. Même le nom et la localisation de ses mines ne sont pas communiqués, ni la localisation de ses usines. Seules des capacités ou des indications de production de concentrés, pouvant présenter certains écarts avec la réalité, sont publiées par Research in China (www.researchinchina.com) et reprises par Roskill (2011).

Avec les restructurations en cours, ces six acteurs vont consolider leur place majeure dans l'industrie chinoise des Terres Rares.

6.1.2. Sociétés minières hors Chine

En 2014, le nombre d'exploitations minières de Terres Rares et d'acteurs ayant une production primaire hors de Chine était très limité. Ces acteurs ont connu des difficultés financières depuis 2011, suite à l'éclatement de la bulle sur le prix des Terres Rares (cf. chap.5).

Aux États-Unis

Molycorp, Inc. (www.molycorp.com) est une société américaine, cotée à la bourse de New York (NYSE:MCP) et basée en Californie. En 2012, elle est redevenue productrice de Terres Rares (6,4 % de la production mondiale, soit environ 7 000 t d'OTR), après un arrêt de sa mine de Mountain Pass entre 1998 et 2010[96]. Ses opérations incluent aussi des usines de traitement dans plusieurs pays.

En Estonie, l'usine de Sillamäe a été rachetée fin 2011 pour devenir Molycorp Silmet, augmentant d'environ 3 000 t ses capacités de production. Elle a également initié des accords avec le japonais Mitsubishi et a des activités en Chine et Thaïlande via sa filiale Molycorp Magnequench (www.mqitechnology.com), ainsi qu'en Corée du Sud, en Allemagne et au Canada. Son ambition est de promouvoir un modèle intégré, de la mine aux produits finis, d'où l'acquisition de multiples filiales. Néanmoins, les objectifs de production à Mountain Pass étaient de 20 000 t d'OTR/an en pleine capacité, mais ces chiffres ont grandement été revus à la baisse pour causes de nombreuses complications techniques et financières. En 2014, la production s'est élevée à 4 769 t d'OTR, contre 3 473 t en 2013 (rapport annuel 2014).

Le gisement de Mountain Pass est à Terres Rares légères largement dominantes, avec un prix moyen de vente en 2014 bien inférieur à celui qui était anticipé avant 2011. L'exploitation est devenue non-rentable. Le cours de Molycorp en bourse est tombé très bas (fig. 56).

[96] Les ressources à Mountain Pass, exprimées selon le code NI 43-101, sont estimées à 34,7 Mt (pour environ 2 Mt d'OTR contenues). À comparer avec les 43 à 56 Mt d'OTR de réserves à Bayan Obo.

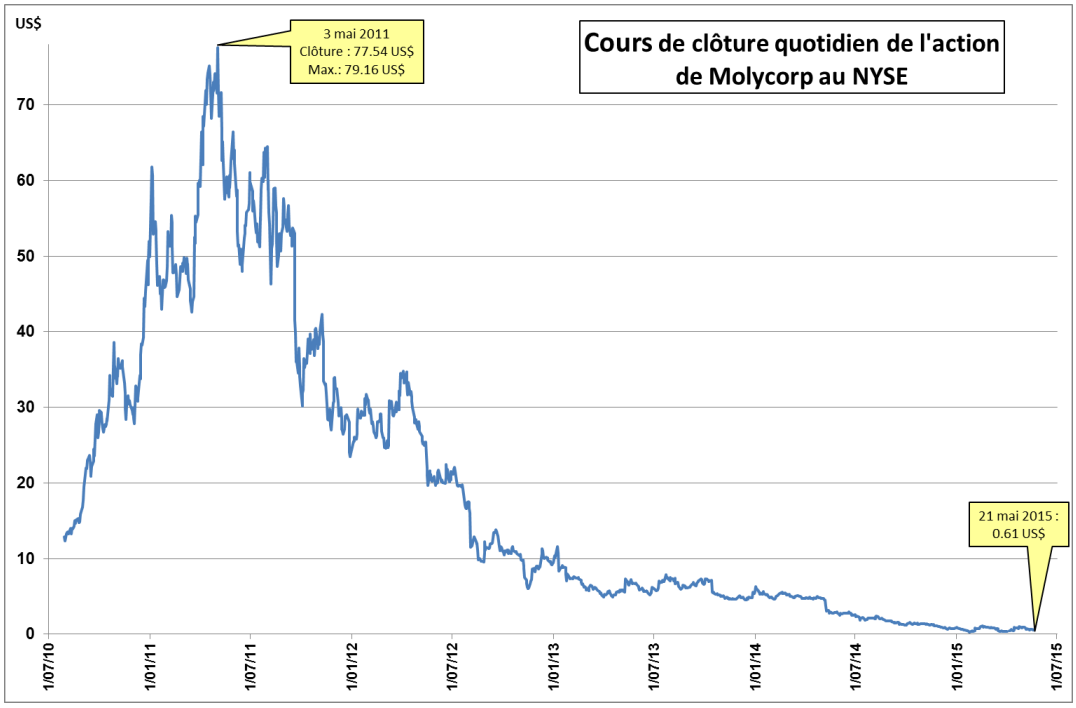


Figure 56 - Évolution du cours de l'action de Molycorp au New York Stock Exchange depuis mi-2010.

Le 25 juin 2015, Molycorp s'est déclaré officiellement en faillite. En août 2015, elle a interrompu les opérations minières à Mountain Pass et a placé la mine en "care and maintenance". Molycorp a recherché de repreneurs, et a demandé à ce que les offres de reprises soient soumises avant le 1er décembre 2015. Parmi les repreneurs potentiels, la société australienne Lynas Corp. (cf plus bas) a été évoquée.

En tout état de cause, il faudrait une remontée significative des prix des Terres Rares pour que la mine de Mountain Pass retrouve une viabilité économique.

En Australie

Lynas Corporation Ltd. (www.lynascorp.com) est une société australienne basée à Sidney, cotée à l'Australian Securities Exchange (ASX : LYC). Elle exploite la mine de Mount Weld, située à 35 km de Laverton, en Australie-Occidentale, ouverte en août 2011. Ce gisement a des ressources évaluées à 18 Mt de minerai, pour 1,4 Mt d'OTR contenues. Il se caractérise par une faible teneur en thorium (44 ppm Th pour 1 % d'OTR). Le minerai est concentré sur place puis le concentré est envoyé à l'usine de traitement (Lynas Advanced Materials Plant, "LAMP") installée à Gebeng, près du port de Kuantan, en Malaisie. Achevée en 2012, les capacités initiales de l'usine devaient être de 11 kt/an d'OTR/an, avec une expansion prévue à 22 kt/an à terme. Elle a atteint 8,8 kt d'OTR sur l'année fiscale australienne 2015 (juillet 2014 à juin 2015), selon le tableau 28 ci-après.

Lynas a commencé ses extractions et concentrations de minerai en 2011, mais son usine de traitement en Malaisie n'a commencé à produire des composés commercialisables que début 2013. Lynas a ainsi produit 1,25 kt d'OTR en 2013 et 7,19 kt en 2014 sous forme de composés commercialisables[97].

[97] Pour l'année fiscale australienne 2014 (juillet 2013 à juin 2014), Lynas a produit 3 965 t d'OTR à partir de 10 828 t de concentrés provenant d'Australie. À fin juin 2014, 289 560 t de minerai avaient été extraites et stockées à Mount Weld (Lynas, rapport annuel 2014).

Les produits commercialisés sont des oxydes et carbonates de lanthane, de cérium, de lanthane + cérium, des oxydes de praséodyme-néodyme, et un combiné de Terres Rares intermédiaires (Sm, Eu, Gd) et lourdes non séparées, avec une distribution d'environ 45 % Ce, 25 % La, 25 % PrNd, et 5 % de TR intermédiaires et lourdes (Lynas, 2014). La majeure partie de la production malaisienne est exportée en France dans le cadre d'un accord d'off-take signé avec Rhodia (désormais Solvay) en 2010.

Comme pour Molycorp, les gisements de Mount Weld exploités par Lynas sont à Terres Rares légères largement dominantes, avec des prix moyens de vente assez médiocres en 2014, et sa rentabilité est menacée. Son cours en bourse est aussi en forte baisse depuis 3 ans (cf. fig. 57), et Lynas aurait besoin d'une remontée des prix pour assurer sa viabilité.

Trimestre calen-daire		Trimestre fiscal australien		Extraction minière et concentration (Australie)		Production OTR (Malaisie)	dont production NdPr (Malaisie)	Ventes
				t con-centrés	t OTR contenus	t OTR	t oxydes NdPr	t OTR
2011	Q1	2011	Q3					
2011	Q2	2011	Q4					
2011	Q3	2012	Q1	?	700 t			
2011	Q4	2012	Q2	6 059 t	2 188 t			
2012	Q1	2012	Q3	11 196 t	4 029 t			
2012	Q2	2012	Q4	13 000 t	4 800 t			
2012	Q3	2013	Q1	14 365 t	5 225 t			
2012	Q4	2013	Q2	15 200 t	5 140 t			
2013	Q1	2013	Q3	15 593 t	5 540 t	*116 t*		
2013	Q2	2013	Q4	15 710 t	5 626 t	144 t		117 t
2013	Q3	2014	Q1	18 425 t	6 724 t	253 t		218 t
2013	Q4	2014	Q2	15 371 t	5 888 t	741 t	946 t	409 t
2014	Q1	2014	Q3	14 676 t	5 590 t	1 089 t		751 t
2014	Q2	2014	Q4	10 828 t	4 144 t	1 882 t		1 630 t
2014	Q3	2015	Q1	*nc*	*nc*	2 043 t	445 t	1 546 t
2014	Q4	2015	Q2	*nc*	*nc*	2 177 t	542 t	2 014 t
2015	Q1	2015	Q3	*nc*	*nc*	1 973 t	432 t	1 970 t
2015	Q2	2015	Q4	*nc*	*nc*	2 606 t	839 t	2 353 t
2015	Q3	2016	Q1	*nc*	*nc*	3 171 t	968 t	2 691 t
2015	Q4	2016	Q2					

Tableau 28 - Production de concentrés (Australie) et de composés (Malaisie) de Terres Rares par Lynas, selon des rapports trimestriels publiés en ligne (www.lynas.com).

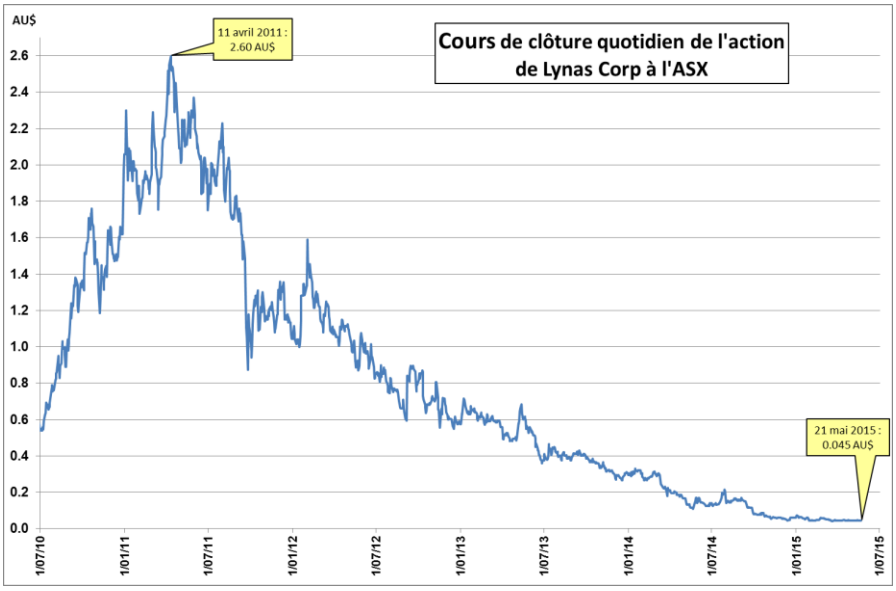


Figure 57 - Évolution du cours de l'action de Lynas Corp. à l'Australian Stock Exchange depuis mi-2010.

En Russie

La société **Solikamsk Magnesium Works (SMW)** (www.smw.ru), filiale depuis 2011 de la société OJSC Uralkali, exploite la mine souterraine de Karnasurt, dans le district de Lovozero, dans la péninsule de Kola. Le principal minéral à Terres Rares est la loparite (cf. 4.1.2 et 4.2.2). Solikamsk produit aussi du magnésium (un des principaux producteurs hors de Chine), du niobium, du tantale et du titane. Le minerai de Lovozero a une composition complexe et contient environ 30-35 % RE_2O_3, 35-38 % TiO_2, 8-12% Nb_2O_5 et 0,6-0,8 % Ta_2O_5.

Le rapport annuel 2013 de SMW fait état d'une production de 7 363 t de loparite, contre 6 713 t en 2012. Son traitement a donné lieu à une production de 1 443,5 t d'OTR dont 1 297 t sous forme de carbonates de Terres Rares, et 146,5 t sous formes de Terres Rares séparées. Cette production est plus faible qu'en 2012, où elle s'élevait à 2 131 t d'OTR, et s'explique en partie par la volonté de la compagnie SMW de réduire sa dépendance envers ses deux principaux clients, des transformateurs non chinois de Terres Rares, en produisant eux-mêmes des Terres Rares séparées. La production a été vendue principalement en Asie (784,2 t d'OTR en 2013), en Europe (610,2 t) et en Russie (49,1 t).

Le projet de doubler les capacités de production d'ici 2015, (European Mineralogical Conference, 2012) par des procédés de traitement minéralurgique innovants concernant l'apatite et l'eudialyte, deux autres minéraux porteurs de Terres Rares présents à Lovozero, semble retardé par les conditions du marché peu favorables. Il pourrait cependant représenter un potentiel d'expansion de la production russe dans les années à venir.

L'entreprise **TriArkMining**, joint-venture créée en 2013 entre Rostec et IST Group (détenu par le milliardaire Alexander Nesis), envisage l'extraction des Terres Rares d'un stock d'environ 82 kt de monazite, entreposé à Krasnoufimsk, dans la région de Sverdlovsk, dans l'Oural, ainsi que l'exploitation du gisement de Tomtor (Yakoutie).

Au Brésil

L'exploitation des Terres Rares est encore peu développée au Brésil, malgré des ressources importantes (cf 4.2.1). Deux sociétés sont actuellement actives dans ce domaine.

Indústrias Nucleares do Brasil (INB, www.inb.gov.br/eng/) est une entreprise d'économie mixte sous tutelle du ministère des Sciences et Technologies et liée à la Commission Nationale de l'Énergie Nucléaire (CNEN) du Brésil. Outre la recherche active sur l'énergie atomique, elle a accumulé des stocks de monazite issus de l'exploitation des sables de plage, dans l'état de Rio de Janeiro notamment (mine de Buena Sul). Ces stocks sont aujourd'hui estimés à environ 10 000 t de concentrés de monazite. La production serait arrêtée depuis 2010, et les stocks diminuent progressivement, étant exportés vers la Chine, qui en est le seul destinataire. Selon le DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral do Brasil), 600 t de ces concentrés de monazite auraient été exportés vers la Chine en 2013, contre 2 700 t en 2012.

Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM, www.cbmm.com) exploite le gisement d'Araxá, première source de niobium mondial, qui est aussi enrichi en Terres Rares. Cette société ne produit pas de rapport annuel public, il est donc difficile d'évaluer sa production de Terres Rares en sous-produit de niobium. Les réserves seraient estimées à 26,65 Mt de minerai à une teneur moyenne de 3,25 % d'OTR. Selon une annonce faite en 2013 par la société, la valorisation des Terres Rares demanderait un investissement de 21 MUS$, pour une unité pilote pour une capacité de production de 3 000 t d'OTR/an, et

14 M US$ pour un centre de recherche hydrométallurgique avec des capacités de traitement de 6-8 t OTR/an.

CBMM est détenu à 70 % par Moreira Salles Group, associé à un consortium japonais et sud-coréen (Sojitz Corp., Mitsubishi Corp., JOGMEC, etc.),15 %, et un consortium d'industriels chinois mené par le groupe Baotou Steel, 15 %.

En Inde

Indian Rare Earths Ltd (IREL, www.irel.gov.in) est une société d'État créée dans les années 1950, basée à Mumbai, et sous le contrôle administratif du Département à l'Energie Atomique indien (DAE). Elle est composée de cinq unités dont la Rare Earth Division dans l'état du Kerala, et Odisha Sands Complex (OSCOM), dans l'état d'Odisha. La production de Terres Rares provient de l'exploitation des sables de plages, notamment le long de la côte est, à Chatrapur (district de Ganjam) et Brahmagiri (district de Puri). La monazite est le principal minéral porteur de Terres Rares (environ 60 % d'OTR). Les réserves s'élèveraient à 12 Mt de monazite (selon Atomic Minerals Directorate for Exploration and Research, 2012) ou 3 Mt OTR contenus (USGS, 2015, cf. tab.16). Les chiffres de production ne sont pas publiés, les seules statistiques à ce sujet provenant de l'USGS, qui fait état d'une production stable de 2 900 t d'OTR pour les années 2012 et 2013.

Les capacités des usines de production et de traitement seraient de 220 000 t/an de concentrés de minéraux lourds (ilménite, rutile, zircon, monazite, silimanite, grenats et monazite). IREL a annoncé en 2013 une capacité de production de 100 t/an d'oxyde de néodyme de pureté 4N[98], ainsi qu'une production de fluorures et carbonates de Terres Rares non chiffrée, à destination du Japon et des États-Unis principalement.

Les objectifs futurs de cet acteur sont doubles : d'une part de s'associer à des compagnies étrangères afin de développer ses capacités de traitement de Terres Rares lourdes (la monazite étant principalement enrichie en Terres Rares légères, cf. chap 4). D'autre part, d'axer ses programmes de recherche sur le contenu en thorium de la monazite extraite (étape 3 du programme nucléaire du pays).

Au Kazakhstan

SARECO (Summit Atom Rare Earth Co. LLP) est une co-entreprise formée en 2010 entre le japonais Sumimoto Corp. (www.sumitomocorp.co.jp), et la société d'énergie atomique du Kazakhstan, Kazatomprom (www.kazatomprom.kz/en) pour l'exploitation et la valorisation des résidus des mines d'uranium de Kazatomprom enrichis en Terres Rares, pour la production d'OTR purifiés.

Une usine de traitement a été construite en 2012, en complément des existantes, avec des cibles de production annoncées à 1 500 t d'OTR/an jusqu'en 2015, puis une augmentation jusqu'à 6 000 t d'OTR en 2017. Les tests de production commerciale n'ont commencé qu'en octobre 2014 (Industrial Minerals).

[98] 99,99 %

Au Vietnam

La société d'état vietnamienne **Lai Chau-Vimico Rare Earts JSC** et le consortium japonais Dong Pao Rare Earth Development Company (qui rassemble Sojitz Corp et Toyota Tsusho Corp) avaient signé un accord en 2012 pour développer le projet minier d'exploitation de Terres Rares de Dong Pao, avec une capacité prévue de 10 kt OTR par an.

En Malaisie

La Malaisie produit quelques centaines de tonnes de Terres Rares par an principalement en sous-produit de ses mines d'étain.

Par ailleurs c'est en Malaisie, à Gebeng, près du port de Kuantan, que la société australienne Lynas Corp a installé l'usine de traitement du concentré de son gisement de Terres Rares de Mount Weld. Cette usine (Lynas Advanced Materials Plant), achevée en 2012, a une capacité initiale de 11 kt/an d'OTR.

6.1.3. Les éventuels futurs producteurs miniers

Plusieurs dizaines de sociétés juniors se sont lancées dans l'exploration et l'évaluation de divers gisements de Terres Rares à travers le Monde (voir 4.2.2 et tableaux 15 et 18), surtout à partir du décollage des prix des Terres Rares fin 2009 et en 2010, pour beaucoup en levant des fonds sur la bourse de Toronto (TSX) et sur la bourse australienne (ASX).

Les sociétés placées sur les projets les plus avancés sont listées dans le tableau 18 (cf. 4.2.2).

Mais avec la chute des prix des Terres Rares, amorcée mi-2011 et qui s'est poursuivie ensuite pour atteindre des niveaux très médiocres en 2015, nombre de ces projets ont perdu de leur attractivité et peu sont encore en dynamique de développement avec des perspectives de mise en exploitation à court terme.

La mise en faillite de Molycorp en juin 2015 a encore largement réduit l'enthousiasme des investisseurs à financer le développement d'autres projets Terres Rares ailleurs.

Parmi les sociétés qui maintiennent des perspectives de développement, on pourra souligner :

Avalon Rare Metals (basé à Toronto, Canada, TSX & NYSE-MKT : AVL, www.avalonraremetals.com) étudie et développe le projet de Nechalacho, au Canada (Territoires du Nord-Ouest), assez enrichi en Terres Rares lourdes (rapport Terres Rares lourdes / Terres Rares totales de 29 %). Il prévoit une production de 10 kt/an d'OTR contenus et espère obtenir tous ses permis et autorisations courant 2015. Il a conclu en mars 2014 un partenariat stratégique avec Solvay pour faire séparer ces Terres Rares en France dans son usine de La Rochelle.

Tasman Metals Ltd (basé à Vancouver, Canada, TSX-V : TSM, NYSE-MKT : TAS, www.tasmanmetals.com) étudie et développe le projet de Norra Kärr, en Suède, assez enrichi en Terres Rares lourdes (rapport Terres Rares lourdes / Terres Rares totales de 50 %). Ils prévoient pouvoir produire 5 120 t d'OTR, dont 200 t d'oxyde de dysprosium, pendant au moins 20 ans, pour un investissement initial évalué à 378 MUS$.

6.2. LES PRINCIPAUX TRANSFORMATEURS, SÉPARATEURS ET FABRICANTS DE PRODUITS INTERMÉDIAIRES

6.2.1. Les principaux transformateurs et fabricants de produits intermédiaires chinois

Comme précisé en 6.1.1, la plupart des grands groupes chinois impliqués dans l'exploitation des Terres Rares sont également présents aux étapes de transformation et fabrication de semi-produits et produits finis, dont les aimants permanents, les batteries NiMH, les poudres de polissage, luminophores, etc. Cette consolidation s'est notamment réalisé par intégration progressive d'entités de plus petites tailles. Il y a cependant aussi encore un nombre considérable de petites entités spécialisées à certaines étapes de la chaine, non détaillées ici, mais pouvant jouer un rôle significatif dans la production totale (cf. fig. 37 et 55).

Aux étapes de transformation et production de semi-produits, on retrouve donc les acteurs des principaux groupes déjà cités précédemment (6.1.1) :

- **China Northern Rare Earth Group (Baotou) ;**
- **China Minmetals ;**
- **Xiamen Tungsten ;**
- **Chinalco Rare Earth ;**
- **Ganzhou Qiandong Rare Earth.**

S'y ajoutent de nombreux autres sociétés ou groupes parmi lesquels :

- **Grirem Advanced Material Ltd** (www.grirem.com/en/), émanation du centre national de recherche en ingénierie chinois sur les Terres Rares, qui a plusieurs filiales productrices : Jiangsu Guosheg Rare Earth a 3 unités de séparation de Terres Rares (une de lourdes et 2 de légères) d'une capacité de 5 000 t/an et produit des composés ; Leshan Grirem Advanced Materials produit des Terres Rares légères sous forme métallique (La, Ce, Pr, Nd) ; et Langfang GANS Magnetic Material Company produit des alliages magnétiques Nd-Fe-B ; etc ;
- **Beijing Zhongke San Huan High Tech Co.** (www.san-huan.com.cn) produit et commercialise des aimants Nd-Fe-B frittés et liés ainsi que des oxydes de Terres Rares ;
- Divers fabricants d'aimants : **Shanxi Innuovo Magnetics** (www.sx-innuovo.com) ; **Ningbo Zhao Bao Magnet** (www.zhaobao-magnet.com) ; **Ningbo Ketian Magnet** (www.kt-magnet.com) ; **Jingyu Magnetic Corp.** ; etc.

La Chine produit environ 85 % des aimants Nd-Fe-B frittés et 65 % des aimants Sm-Co mondiaux (Roskill, 2011). Il existerait plus de 130 sites de production en Chine pour les aimants Nd-Fe-B frittés, surtout concentrés à Pékin, Ningbo et Shanxi. Ils représentent une capacité totale de production de 130 000 t par an. En 2010, la production chinoise totale d'aimants permanents s'est élevée à 82 600 t, dont 78 000 t d'aimants Nd-Fe-B frittés, 4 000 t d'aimants Nd-Fe-B liés et 600 t d'aimants Sm-Co (Roskill, 2011). Seules 13 900 t de ces aimants étaient destinées à l'exportation.

6.2.2. Les principaux transformateurs et fabricants de produits intermédiaires japonais

Le Japon est le deuxième transformateur, distributeur et consommateur de produits semi-finis et finis à base de Terres Rares au monde, bien qu'il ne dispose d'aucune ressource primaire. Plusieurs entreprises sont prédominantes à l'international sur l'ensemble des marchés des Terres Rares, dont le principal est sans doute celui des aimants permanents.

Shin-Etsu Chemical Co., Ltd. (www.shinetsu.co.jp) est l'une des principales entreprises chimiques du Japon, basée à Tokyo. Ses domaines d'activités comprennent les PVC (leader mondial), les silicones, les fibres optiques, mais aussi les aimants permanents et les batteries Li-ion. Sa principale usine de traitement des Terres Rares est l'usine Takefu, située dans la préfecture de Fukui, avec une capacité de production de 1 000 t/an, ainsi que plusieurs délocalisées aux Philippines, Indonésie, Malaisie et Chine. Shin-Etsu est l'un des rares producteurs intégrés d'aimants permanents, des alliages aux produits finis. Sa principale source d'approvisionnement ces dernières années était Molycorp (12 % des ventes de la société américaine en 2010, source : Roskill, 2011).

Hitachi Metals Ltd. (www.hitachi-metals.co.jp) est une société japonaise basée à Tokyo et spécialisée dans la conception et la vente de produits finis intégrant des alliages de métaux de haute qualité (câbles électriques, outils d'usinage et de coupe, aimants permanents, etc). Leader dans le domaine des aimants Nb-Fe-B frittés, Hitachi Metals détient plus de 600 brevets pour leurs fabrications, dont 100 aux États-Unis. Le plus connu est le NEOMAX®. C'est le plus gros producteur japonais d'aimants permanents, avec des capacités dépassant 4 000 t/an, grâce à ses différentes usines et joint-ventures (JV), notamment avec TDK (cf. plus bas). En outre, le groupe a signé un accord de JV avec le leader chinois **Beijing Zhongke San Huan Hi-Tech Co., Ltd.**, en février 2015, montrant sa volonté d'étendre son influence sur le marché chinois.

Showa Denko K.K. ou SDK (www.sdk.co.jp) est également une des principales entreprises chimiques japonaises, basée à Tokyo. Elle est présente dans les secteurs de la pétrochimie, la chimie, l'électronique, les céramiques et l'aluminium. Les alliages de Terres Rares pour la production d'aimants permanents constituent l'un des piliers de sa stratégie industrielle et ses capacités de production s'élèvent à 8 000 t/an d'alliages pour aimants permanents, avec des usines au Japon, en Chine et au Vietnam, permettant également le traitement des Terres Rares pour la production de poudres de polissage et de batteries NiMH.

Sumitomo Corporation (www.sumitomocorp.co.jp) est l'un des plus vastes et des plus anciens conglomérats industriels japonais, possédant un nombre important de filiales et compagnies associées. Les ressources minérales comptent pour un quart de ses activités (rapport annuel 2014). **Sumitomo Metal Mining Co., Ltd.** (www.smm.co.jp) est la principale entité dédiée à l'industrie des Terres Rares, notamment via la JV avec Kazatomprom, la production d'aimants permanents et un grand nombre de brevets historiques sur les aimants Nd-Fe-B.

Chuden Rare Earth Co. Ltd. (www.chu-den.co.jp) a été fondée en 1990 comme JV entre Sumitomo et Molycorp. Elle a été renommée en décembre 2009 après son acquisition par Chuo Denki Kogyo Co, également affiliée à **Sumitomo Metal Industries, Ltd** et opère aujourd'hui plusieurs usines à Wakayama-shi. Elle produit des alliages de Terres Rares, ainsi que d'alliages de molybdène. Elle a créé en 2009 la filiale Vietnam Rare Earth.

Le Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC, www.jogmec.go.jp/english), créé en 2004, est une institution administrative indépendante, c'est-à-dire un établissement public japonais à fonction opérationnelle. Cet organisme peut être considéré comme le « bras armé » du Japon dans le domaine des matières premières, sa mission étant d'assurer la sécurisation de l'approvisionnement du pays en ressources naturelles indispensables à son économie. Pour se faire, son fonctionnement repose sur trois piliers : les métaux, l'énergie, et la recherche, pour un budget d'environ 15 G€. Ses actions consistent à soutenir financièrement les entreprises japonaises à l'étranger, à passer des contrats de long terme sur certains secteurs clés, et à promouvoir la recherche, notamment grâce au centre de recherche sur les métaux, le Metals Technology Centre à Kosaka–machi.

Son rôle dans l'industrie japonaise des Terres Rares est considérable, notamment par l'aide financière apportée aux sociétés Sumitomo, Sojitz ou Toyota Tsusho Corporation pour le développement de projets hors Chine via des partenariats industriels. Le JOGMEC a également signé des accords au Kazakhstan, en Inde et au Vietnam et prévoit l'établissement d'un centre de recherche sur les Terres Rares basé à Hanoï.

TDK Corporation (www.tdk.com) est une société japonaise basée à Tokyo, spécialisée dans les matériaux magnétiques, les condensateurs en céramiques et autres composants électroniques. Premiers à avoir commercialisé la ferrite dans les années 1930, la vente d'aimants permanents constitue une grande part de leur activité. La JV avec Hitachi Metals (cf. plus haut) opère une usine à Narita, avec des capacités de production de 2 500 t/an.

Santoku (www.santoku-corp.co.jp) est une société japonaise basée à Kobé et spécialisée dans les alliages pour aimants permanents samarium-cobalt et néodyme-fer-bore, ainsi que didyme métal et des alliages pour batteries NiMH. Elle opère une usine à Baotou.

Mitsui Mining and Smelting Co Ltd (Mitsui Kinzoku, www.mitsui-kinzoku.co.jp/en/) produit des oxydes de cérium pour les poudres de polissages dans son usine d'Omuta (Fukuoka), d'une capacité de 4 000 t/an, ainsi que des supports de catalyseurs, et des alliages pour batteries NiMH. Sa filiale à 70% **Nippon Yttrium** produit des composés de Terres Rares de haute pureté.

Daiichi Kigenso Kagaku Kogyo Co Ltd (DKKK, www.dkkk.co.jp/english/) produit et commercialise des composés de lanthane et de cérium.

Toyota Tsusho Corp. (www.toyota-tsusho.com/english/), conglomérat diversifié du groupe Toyota, s'est impliqué dans divers projets de production de Terres Rares. Il détient en partenariat avec Sojitz 49 % du projet minier de Dong Pao, au Vietnam, et s'est associé à Shin Etsu, le Jogmec et Indian Rare Earths pour construire une usine de chlorure de Terres Rares en Inde dans l'Etat d'Odisha, parrainé par un accord gouvernemental signé en février 2001 entre l'Inde et le Japon. Sa filiale **Toyotsu Rare Earths Corporation** (www.toyotsu-rare-earths.com/e/) produit et commercialise divers métaux et composés de Terres Rares.

Sojitz Corp. (www.sojitz.com/en/) est un conglomérat diversifié qui dispose d'une branche ressources minérales et d'une branche métaux. Il détient en partenariat avec Toyota Tsusho 49 % du projet minier de Dong Pao, au Vietnam. Il avait par ailleurs signé avec Lynas un contrat d'off-take en échange de prêts pour le financement de son usine de traitement en Malaisie.

Aichi Steel Corp. (www.aichi-steel.co.jp/ENGLISH), basée à Tokai (Aichi), membre du groupe Toyota, fabrique divers aciers de spécialité. Il produit aussi des aimants Nd-Fe-B liés à partir de poudres d'alliages importées

6.2.3. Les principaux transformateurs et fabricants de produits intermédiaires nord-américains

Great Western Minerals Group ou GWMG (www.gwmg.ca) est une société canadienne basée à Saskatoon et cotée à la bourse de Toronto (TSX.V: GWG). Ses ambitions sont d'atteindre une intégration verticale de l'industrie des Terres Rares, de la mine aux produits finis, mais cette ambition est retardée par les délais dans la mise en production de son principal projet, la mine de Steenkampskraal (Afrique du Sud), dont l'étude de faisabilité été achevée en mai 2014. Sa filiale **Less Common Metals Ltd**, rachetée en 2008, basée à Birkenhead au Royaume-Uni, fait partie des quelques producteurs européens de métaux et d'alliages de Terres Rares. Ses principaux produits sont des alliages Nd-Fe-B et Sm-Co pour la fabrication d'aimants permanents (sous brevet Sumitomo), des métaux de Terres Rares de haute pureté, et des alliages NiMH destinés au stockage d'hydrogène. Ses capacités de production sont d'environ 2 000 t d'alliages/an. Un de ses principaux clients est Aichi Steel, membre du groupe Toyota. Son autre filiale, **Great Western Technologies Inc**. est basée à Troy (Michigan) et produit également des alliages à base de Terres Rares pour aimants permanents et batteries NiMH.

Arnold Magnetic Technologies (www.arnoldmagnetics.com) est basée à Rochester (NY) et a des usines aux États-Unis, au Royaume Uni, en Suisse et en Chine. Cette société est spécialisée dans la fabrication d'aimants permanents et électroaimants, ainsi que de systèmes magnétiques de précisions, produits laminés, moteurs et alliages métalliques de hautes performances.

Electron Energy Corporation (www.electronenergy.com) est basée à Landisville, en Pennsylvanie, avec deux usines de productions d'aimants permanents (Sm-Co et Nd-Fe-B). Parmi leurs clients figurent la marine américaine (US Navy), des compagnies aéronautiques, pétrolières, et médicales.

Molycorp Magnequench (www.molycorp.com/about-us/our-facilities/molycorp-magnequench/ et www.mqitechnology.com). L'ancienne société Magnequench, fondée en 1986 à l'origine des aimants Nd-Fe-B, a été acquise en 2012 par Molycorp. Cette société domine la production de poudres magnétiques pour la production d'aimants Nd-Fe-B liés. Elle dispose de deux usines de productions, l'une à Tianjin (Chine), l'autre à Korat (Thailande). En 2010, ses ventes s'élevaient à 6 000 t de poudres pour aimants permanents (Roskill, 2011).

6.2.4. Les principaux transformateurs, fabricants de produits intermédiaires et recycleurs européens (hors France)

En Allemagne

Vacuumschmelze GmbH & Co. KG (VAC) (www.vacuumschmelze.com) est une société basée à Hanau (Hesse), filiale de la compagnie américaine OM Group Inc. depuis 2011. Elle a cinq usines de productions implantées en Allemagne, Finlande, Slovaquie, Malaisie et Chine. L'usine chinoise, basée à Pékin, est controlée par SANVAC, joint-venture entre VAC et San Huan (Ningbo) Magnetics. L'usine finlandaise est issue du rachat en 1997 de l'entreprise **Neorem Magnets Oy**, implantée à Ulvila, et spécialisée dans la production d'aimants Nd-Fe-B frittés. Ses principales productions d'aimants permanents à base de Terres Rares sont des aimants permanents Nd-Fe-B sous brevet Hitachi (VACODYM®) et Sm-Co (VACOMAX®). VAC produit également des alliages de spécialités et autres matériaux magnétiques.

MS Schramberg GmbH & Co. KG (www.magnete.de/en.html) est une société basée à Schramberg (Bade-Wurtemberg), fondée en 1963 et historiquement spécialisée dans la production d'aimants à ferrite. Depuis les années 1980, elle conçoit également des aimants permanents frittés Nd-Fe-B et Sm-Co, sous brevet Hitachi avec des capacités de production d'environ 20 millions d'unités par an. Elle dispose de trois usines en Allemagne et a depuis 2006 un bureau en Chine.

Magnetfabrik Bonn (www.magnetfabrik.de) est une société de taille modeste, basée à Bonn et présente dans le secteur des aimants permanents depuis 1932. Elle produit une gamme d'aimants Nd-Fe-B frittés et liés (Neofer) et Sm-Co (Seco). Parmi ses clients se trouvent Bosh, Opel, Mitsuba, Valeo.

En Autriche

Treibacher Industrie AG (www.treibacher.com), basée à Althofen, en Autriche, produit divers métaux et matériaux de spécialité avec quatre divisions : Matériaux céramiques avancés, Métaux durs et stockage d'énergie, Aciers et produits de fonderie, Terres Rares et produits chimiques. Les Terres Rares constituent donc une part importante des activités du groupe, avec une grande diversité de produits (oxydes, sels, alliages) et de débouchés, dont l'industrie du verre et des lasers (grenats YAG, oxydes de zirconium dopés aux Terres Rares), les catalyseurs chimiques, les super-alliages (YAl, YNi, AlSm notamment) et la purification de l'eau.

En Belgique

Umicore (www.umicore.com et aussi www.umicore.fr) est une société belge dont le siège est à Bruxelles, cotée à l'Euronext. Umicore se présente comme le leader mondial du recyclage des métaux précieux et l'un des principaux fabricants de catalyseurs automobiles à base de Terres Rares. Umicore dispose d'implantations et de filiales dans 28 pays (Europe, Amériques, Asie-Pacifique, Afrique du Sud), dont cinq filiales en France (Umicore France SAS, Umicore Building Products France SAS, Umicore Climeta SAS, Umicore IR Glass SAS, et Umicore Autocat France SAS). Elle opère au total 74 usines dans le monde.

Sa branche **Umicore Precious Metals Refining** (www.preciousmetals.umicore.com) raffine et recycle des métaux précieux, métaux de base et métaux rares à partir d'un très large éventail de matériaux : déchets d'équipements électriques et électroniques, catalyseurs automobiles usagés, catalyseurs industriels, des produits ou résidus de fonderies et de raffineries métallurgiques (mattes, boues anodiques, etc.), dans sa raffinerie de Hoboken, près d'Anvers, en Belgique. Un partenariat avec Rhodia en 2011 avait pour objet le développement d'un procédé innovant de recyclage des batteries NiMH (Roskill,2011). Umicore a eu un chiffre d'affaires de 12,5 milliards d'Euros en 2012, dont 9,6 milliards pour sa branche recyclage (source : rapport annuel 2012 d'Umicore).

En Estonie

Molycorp Silmet AS (www.molycorp.com/about-us/our-facilities/molycorp-silmet/) est désormais une filiale à 100% de la société étatsunienne Molycorp (www.molyciro.com, cf. 6.1.2 plus haut) après l'acquisition de la société estonienne Silmet par Molycorp en 2011. Molycorp Silmet dispose d'un complexe de séparation et de métallurgie à Sillimaë, (Estonie) avec une unité de séparation de Terres Rares et de production de composés (oxydes, carbonates, chlorures, etc.), une unité de production de composés de niobium et de tantale, et une unité métallurgique de production de niobium, tantale, néodyme et didyme (alliage néodyme-praséodyme) sous forme métallique (poudres et lingots) et d'alliage néodyme-fer-bore. Molycorp Silmet importe des composés de Terres Rares bruts (non-séparées) des

États-Unis (Molycorp, mine de Mountain Pass) et de Russie (SMW, mine de Lovozero) et exporte désormais ses productions en majorité vers les Etats-Unis et le Japon. La capacité de production du complexe de Sillimaë est d'environ 3 kt/an de produits de Terres Rares (composés et métaux), 300 t/an de niobium et 60 t/an de tantale.

Au Royaume-Uni

Optical Surface Technologies ou OST (www.opticalsurfacetech.com) est une société basée à Rotherham (Sud Yorkshire). Elle fait partie des leaders européens de la production de poudres de polissage. Désormais rattachée au groupe néerlandais **Advanced Metallurgical Group N.V. (AMG)**, ses produits phares sont les gammes de poudres à base d'oxyde de cérium : Regipol™, Polimax™, and Tecepol®. OST produit également Decol™, produit à base d'oxyde de cérium de haute pureté utilisé pour la décoloration du verre et céramiques (cf 3.1.7).

MEL-Chemicals (www.luxfer.com/products/zirconium.asp) est une société basée à Manchester spécialisée dans les produits et alliages de haute performance à base de zirconium. C'est une des quatre filiales de **Luxfer Group**. Elle opère trois usines, une au Royaume-Uni (Manchester), une aux États-Unis (Flemington) et une au Japon (Shimizu). Les Terres Rares utilisées sont principalement l'yttrium, le cérium et le lanthane, intégrées au sein des alliages de zirconium pour augmenter leur résistance à la corrosion et aux hautes températures (cf. 3.1.6). MEL-Chemicals a des capacités de production de zirconium stabilisé estimées à environ 300 t/an.

En Slovénie

Magneti Ljubljana, d.d. (www.magneti.si) est une société basée à Ljubljana. Spécialisée dans la fabrication d'aimants permanents et de systèmes magnétiques depuis 60 ans, ses produits comprennent des aimants frittés Nd-Fe-B et Sm-Co. Parmi ses clients se trouvent General Electric, Bosh, Schneider Electric, ou encore Alstom.

6.2.5. Les transformateurs, fabricants de produits intermédiaires, recycleurs et négociants en France

Une seule société française se distingue dans l'industrie de transformation des Terres Rares, jouant un rôle important à l'échelle internationale, il s'agit de Solvay (anciennement Rhodia).

Solvay France (www.solvay.fr) est la branche française du groupe belge Solvay, depuis l'acquisition de l'entreprise Rhodia en septembre 2011, elle-même anciennement Rhône-Poulenc (issue de la fusion en 1928 de la Société chimique des usines du Rhône et des établissements Poulenc frères). Les spécialités du groupe Solvay sont la chimie fine, les fibres synthétiques, les polymères, et la transformation des Terres Rares. Le groupe est désormais organisé autour de cinq Segments Opérationnels : Formulations Avancées, Matériaux Avancés, Produits Chimiques de Performance, Polymères Fonctionnels, et Services. L'unité dédiée aux Terres Rares fait partie du segment Matériaux Avancés et s'intitule Rare Earth Systems (RES). Elle reste un secteur minoritaire du groupe : sur un chiffre d'affaires global de 9,94 G€ en 2013 (rapport annuel Solvay 2013), le secteur des Terres Rares en a représenté 3 % (298 M€). La part de Solvay pour les produits de spécialité à base de Terres Rares est toutefois supérieure à 25 % du marché mondial.

L'unité RES est n° 1 mondial de la production de Terres Rares pour la catalyse automobile (monolithes), notamment grâce aux produits Eolys™, Actalys® et Optalys®. Ses clients directs sont les constructeurs automobiles (Renault, PSA) ou les producteurs de catalyseurs comme Umicore, BASF, Johnson Matthey, Toyota.

Elle est également très présente sur le secteur des précurseurs pour poudres luminophores, connus sous les gammes de produits Luminostar™ et Morningstar®, utilisés dans les ampoules fluo-compactes et les technologies d'affichage (écrans plasma et LCD). Ses clients sont par exemple Osram, Philips Lighting, G.E. Enfin, les produits Cerox™, Opaline™, Zenus® sont destinés au polissage des produits électroniques et Superamic® utilisé comme additif pour céramiques.

La production se répartit en cinq sites industriels. La principale usine se situe à La Rochelle, qui fut longtemps la première source de produits à base de Terres Rares au monde. Elle pouvait traiter jusqu'à 15 000 t de concentré de Terres Rares par an. L'usine a dû cesser le traitement de la monazite (principale source des Terres Rares traitées) en 1994, du fait de son contenu radioactif et de l'absence de débouchés pour le thorium fatal.

Aujourd'hui, l'usine de La Rochelle achète des concentrés de Terres Rares partiellement séparés et s'approvisionne d'environ 3 000 t d'OTR/an, provenant majoritairement de Chine, mais également de Lynas. Selon son site Internet[99], "elle produit chaque année environ 6 000 t de produits de formulation à base de terres rares pour les marchés de la catalyse, de la dépollution automobile, du polissage et de l'électronique".

Les autres sites de productions se situent en Chine et au Japon. Au Japon, l'usine d'Anan (Shikoku) est une source de production des supports de catalyse automobile. En Chine, deux accords de joint-ventures (JV) assurent le reste de la production via les usines associées : **Baotou Solvay Rare Earth** (Mongolie Intérieure) pour la production de poudres de polissage, et **Liyang Solvay Rare Earth** pour les luminophores, catalyseurs et produits de spécialité.

Solvay maintient sa stratégie et sa capacité de séparation des Terres Rares pour offrir ses services aux juniors minières qui ont des projets hors Chine. En avril 2012, une lettre d'intention avait été signée entre Solvay et Tantalus Rare Earths AG au sujet d'une coopération technique pour le développement du procédé d'extraction et de purification des Terres Rares d'un projet situé à Madagascar. Celle-ci semble avoir été abandonnée. Un partenariat industriel avec Avalon Rare Metals Inc., prévoyant de développer le gisement de Nechalacho (Canada) était également évoqué en juillet 2014.

Solvay est absent du secteur de la production des aimants permanents, mais recycle des chutes de fabrication d'aimants et purifie également Pr, Nd, Dy et Tb.

Depuis 2012, le groupe a aussi développé une technologie de recyclage des poudres luminophores contenue dans les ampoules fluo-compactes, qu'elle traite à La Rochelle pour obtenir des oxydes de La, Ce, Eu, Gd, Y et Tb (cf. 4.5.1).

6.3. LES UTILISATEURS EUROPÉENS FINAUX

Les industries utilisatrices de produits à base de Terres Rares sont d'une part tous les fabricants de biens d'équipement individuels ou collectifs qui contiennent des aimants permanents miniaturisés (moteurs électriques miniature pour l'automobile, l'informatique, l'outillage, les lecteurs CD, etc., appareils électroacoustiques (haut-parleurs, écouteurs, etc.)), les fabricants d'ampoules d'éclairage, les fabricants ou utilisateurs de pots catalytiques automobiles, les fabricants et utilisateurs de batteries NiMH, les raffineurs pétroliers utilisateurs de catalyseurs de craquage. La liste des industries européennes utilisatrices est donc extrêmement longue et variée et ne sera pas détaillée ici.

[99] www.solvay.fr/fr/implantations/la-rochelle/index.html

Il pourra être mentionné plus spécifiquement les fabricants d'éoliennes. En effet, il existe des programmes significatifs de construction de parcs d'éoliennes off-shore, de capacités de l'ordre de 6 MW, qui représentent un potentiel significatif de consommation prochaine de Terres Rares en Europe. Plusieurs industriels sont présents sur ces marchés, rivalisant sur les technologies disponibles, plus ou moins gourmandes en aimants permanents Nd-Fe-B (Dy).

L'allemand **Enercon** (www.enercon.de/fr-fr) a été le premier à se passer d'aimants permanents à base de Terres Rares grâce à une technologie de générateur synchrone à excitation électrique, à base d'électroaimants et un bobinage en cuivre[100].

Le danois **Vestas**, (www.vestas.com/en) et l'allemand **Siemens** (www.siemens.com) continuent quant à eux à développer des systèmes utilisant à la fois des moteurs à aimants permanents Nd-Fe-B et des générateurs synchrones à excitation électrique. Siemens a annoncé en septembre 2014 réduire ses coûts grâce à des aimants permanents sans dysprosium, grâce à un système de refroidissement interne.

En France, le groupe **Alstom** (www.alstom.com) développe et doit installer aussi des éoliennes off-shore (cf. 6.4.3)

6.4. LES UTILISATEURS FRANÇAIS FINAUX

Comme déjà indiqué en 6.3, la liste des industries utilisatrices de produits à base de Terres Rares en France est extrêmement longue et variée, et ne sera pas détaillée ici. L'accent est mis sur certains secteurs industriels en particulier.

6.4.1. Fabricants d'aimants permanents

Euromag (www.euromag-magnets.com), basé à Saint-Pierre d'Allevard (38), fabrique une large gamme d'aimants permanents pour des applications variées : automobile (systèmes de filtration, moteurs électriques à courant continu…), aéronautique (génératrice tachymétrique pour mesurer la vitesse de rotation du moteur…), BTP (sabot magnétique de fixation…), industrie, levage-manutention (porteur et plateau à aimant permanent pour fraiseuse, centre d'usinage…), etc.

Euromag propose notamment des aimants à base de Terres Rares de type :

- Nd-Fe-B : aimants frittés composés principalement de poudre de néodyme, de fer et de bore ainsi que de cobalt (entre 1 et 5 % d'après le CDI) ;
- outils magnétiques, comme un aimanteur à aimants permanents néodyme-fer-bore ;
- Sm-Co : ces aimants frittés composés de poudres de samarium et de cobalt sont principalement de deux types : SmCo5 et Sm2Co17, plus performants.

First Magnetic France (www.firstmagneticfrance.com), basé à Roncq (59), propose une large gamme d'aimants, d'accessoires magnétiques et d'outils pour le triage magnétique. Il propose notamment, outre les traditionnels ferrites, des aimants permanents à Nd-Fe-B, Sm-Co et AlNiCo.

Emile Maurin (www.emile-maurin.fr), basé à Lyon (69), possède dix implantations en France. Il est spécialisé dans la conception et la fabrication d'éléments standard mécaniques (manœuvre, montage, bridage, éléments magnétiques), d'éléments de fixation (visserie,

[100] Cf. www.enercon.de/fr-fr/753.htm

boulonnerie), et produits métallurgiques (aciers de construction, aciers à outils et aciers inoxydables). Il dispose d'une gamme d'aimants plats, cylindriques ou en U (ferrites, AlNiCo, NdFeB ou SmCo).

De nombreuses autres PME et TPE françaises spécialisées dans la fabrication et la vente d'aimants permanents. Un annuaire professionnel (www.hellopro.fr) en liste quelques-unes :

- Maizeray Electro-Aimants (Glos, 14, avec un salarié), fabrique des aimants permanents « Terres Rares » sur mesure ;
- Aimants Goudsmit France (Neuville-Ferrain, 59, 6-9 personnes), est la filiale française du néerlandais Goudsmit Magnetic Systems (www.goudsmit-magnetics.nl), spécialisé dans la fourniture d'aimants permanents de haute qualité et de systèmes magnétiques pour l'industrie automobile, électronique et médicale. Il propose notamment une gamme d'aimants permanents NdFeB, Alnico et SmCo, ainsi que des systèmes magnétiques utilisés pour la séparation et le recyclage des métaux ;
- Mecamag (Chambéry, 73, 3-5 salariés, www.mecamag.fr), est spécialisé dans les systèmes de bridage magnétiques, mécaniques, hydrauliques et à dépression, les systèmes de levage ainsi que les aimants. Il propose notamment une gamme d'aimants permanents NdFeB, Alnico et SmCo sous forme d'aimants nus ou de ventouses magnétiques ;
- Braillon Magnetics (Montmélian, 73, 20 à 49 salariés, www.braillon.com), conçoit et fabrique des fixations magnétiques universelles : bridage de pièces sur machines-outils travaillant par enlèvement de métal et de moules sur presse haute température, manutention, fixation, entraînement sans contact. Il propose une large gamme d'accessoires magnétiques, dont des aimants et ventouses Alnico, NdFeB et SmCo ainsi que des coupleurs magnétiques à aimants permanents.

6.4.2. Constructeurs et équipementiers automobiles

Les constructeurs automobiles **PSA Peugeot Citroën** (www.psa-peugeot-citroen.com) et **Renault** (www.renault.fr), ainsi que leurs équipementiers et sous-traitants, et les usines en France de constructeurs automobiles de marques étrangères (Toyota, Mitsubishi, etc.) sont consommateurs de Terres Rares. Ils en utilisent ou peuvent en utiliser dans la plupart des dispositifs utilisant des aimants permanents dans les véhicules, à des positions stratégiques, comme les colonnes de direction électriques, ou dans les divers petits moteurs électriques d'équipements, ainsi que dans les haut-parleurs, etc. De l'oxyde de cérium est aussi utilisé pour les supports de pots catalytiques (cf. 3.1.4).

6.4.3. Fabricants d'éoliennes

Le groupe **Alstom** (www.alstom.com) doit débuter une production industrielle d'éoliennes de type Haliade™ 150 - 6 MW[101], spécialement adaptée au milieu marin, pour répondre aux commandes d'installation de 240 éoliennes en France (pour 3 parcs éoliens offshore français à Saint-Nazaire, Courseulles-sur-Mer et Fécamp) et 5 éoliennes aux États-Unis (ferme pilote de 30 MW Block Island au large des côtes de l'état du Rhode Island prévue pour 2016), avec une technologie reposant sur un alternateur à aimant permanent et à entraînement direct (sans boîte de vitesses).

[101] Une puissance de 6 MW correspond à l'alimentation en électricité d'environ 5 000 foyers.

6.4.4. Industrie pétrolière

Le lanthane et en moindre proportion le cérium jouent un rôle important dans le craquage catalytique des pétroles lourds (cf. 3.1.3). Ainsi, les principaux acteurs pétroliers français sont des consommateurs potentiels de ces Terres Rares au sein de leurs raffineries.

Le groupe **Total** (www.total.com) dispose de 5 raffineries en France, à Gonfreville et Granpuits (76), Donges (44), Châteauneuf-les-Martigues (13) et Feyzin (69), et s'est illustré par la construction d'une raffinerie géante en Arabie Saoudite (Jubail), en partenariat avec Saudi Aramco. Cette plateforme a été conçue pour transformer un pétrole brut particulièrement difficile à traiter. Baptisée SATORP, elle a été achevée en 2014 et utilise une technologie à base de Terres Rares pour la catalyse du craquage des pétroles lourds. Elle devrait traiter 400 000 barils de pétrole brut par jour (soit 20 millions de tonnes par an).

Esso S.A.F. (www.esso.fr), filiale française à 82,89 % du groupe pétrolier étatsunien ExxonMobil. Elle dispose de deux raffineries de pétrole en France, à Gravenchon (76), et à Fos-sur-mer (13).

6.4.5. Éclairage

Les fabricants d'ampoules fluo-compactes sont également consommateurs de Terres Rares pour les poudres luminophores à l'origine de l'éclairage fourni par ces ampoules (cf. 3.1.8).

Parmi les fabricants en France, on pourra citer (liste non exhaustive) :

- la branche éclairage **Philips Lighting** (www.lighting.philips.com), de la société néerlandaise **Philips** (www.philips.com, www.philips.fr) qui possède cinq usines de production d'ampoules et dispositifs d'éclairage en France : Châlons-sur-Saône (71), Chartres (28), Longvic (21), Lamotte-Beuvron (41) et Miribel (01) ;
- **Aric** (93 Aubervilliers, www.aric-sa.com), qui produit et commercialise toutes sortes d'ampoules d'éclairage dans ses usines d'Aubervilliers (93) et de Segré (49) ;
- la société allemande **Osram** (www.osram.com) ayant une implantation en France, Osram Sasu, à Molsheim (67).

Comme mentionné en 6.2.5, Solvay-Rhodia est le principal fournisseur français de précurseur pour ces poudres luminophores.

6.4.6. Industries diverses

Parmi les entreprises consommatrices de Terres Rares pour la production de produits finis à haute valeur ajoutée, on pourra citer :

Saft (www.saftbatteries.com), basée à Bagnolet (93) est une entreprise française leader mondial dans la production de batteries de haute technologie. Parmi la large gamme d'accumulateurs qu'elle commercialise (Li-ion, Ni-Cd, et Ni-MH) pour des applications diverses (transport urbain, équipements électroniques personnels, appareils médicaux, alimentations électriques de secours, applications militaires et de Défense, etc.), les batteries Ni-MH sont fortement consommatrices de Terres Rares (cf. 3.1.5). Saft possède trois sites de production en France : Poitiers (86), Nersac (16) et Bordeaux (33) ainsi qu'indirectement, le site d'ASB à Bourges (18) dont il est actionnaire à 80 %. Le groupe est implanté à l'international à travers des sites de production aux États-Unis, en Chine, en Inde, en Australie, au Royaume-Uni, en Allemagne, en Suède et en République Tchèque.

Draka, filiale du Prysmian Group (www.prysmiangroup.com/fr), leader en production de fibres optiques et câbles de télécommunications, avec une implantation française sur 11 sites industriels et deux usines principales : Paron (89) et Charvieu (38).

Quantel Lasers (www.quantel-laser.com) produisant des lasers de haute performance à fibre Erbium-Ytterbium et Nd : YAG, à applications médicales et industrielles. Elle dispose d'un vaste réseau de distribution mondial.

Cilas ou Compagnie Industrielle des Lasers (www.cilas.com), filiale d'EADS Astrium, qui développe, industrialise et produit des systèmes associant le laser à l'optique de précision dans les domaines des hautes technologies militaires (64 %) et civiles (36 %). Ses installations sont réparties sur quatre sites : Orléans, Mont Audouze (Saint-Setiers, Corrèze), Marseille et Limoges.

Edmund Optics France (www.edmundoptics.fr), leader dans la distribution d'optiques et de composants optiques pour l'industrie, qui conçoit et fabrique une large gamme de lentilles à multi éléments, des systèmes d'imagerie, et des équipements opto-mécaniques. Les Terres Rares sont critiques pour l'amélioration des propriétés optiques de ce matériel optique, notamment l'augmentation de l'indice de réfraction (cf. 3.1.7).

Guerbet (www.guerbet.fr) produit et commercialise une large gamme de produits de contraste à base de gadolinium, sous le nom Dotarem, pour l'imagerie médicale IRM (cf. 3.2.7).

6.4.7. Industries de défense, aéronautique, et spatiale

La plupart des industries françaises des secteurs de l'aéronautique, du spatial et de la défense (Groupe Safran, Groupe Thalès, EADS, Dassault Aviation, MBDA, etc.) sont susceptibles d'utiliser des Terres Rares dans les dispositifs utilisant des aimants permanents de hautes performances, ainsi que dans la plupart des alliages résistants aux très hautes températures. Néanmoins, ces quantités sont très peu documentées.

6.4.8. Industrie nucléaire

Comme mentionné en 3.1.10, l'industrie nucléaire est consommatrice de Terres Rares (Sm, Eu, Gd, Dy) en faibles quantités dans les barres de contrôle des réacteurs nucléaires.

7. Commerce extérieur et consommation de la France

7.1. COMMERCE EXTERIEUR

Les tableaux 29 et 30 qui suivent récapitulent les données françaises d'importations et d'exportations, en valeur (k€) et en volume (t), de composés et produits identifiés comme contenant des Terres Rares pour les années 2009 à 2014, publiées par le portail des statistiques du Commerce extérieur français, « Le Kiosque de Bercy » (http://lekiosque.finances.gouv.fr. La nomenclature NC8 des Douanes françaises comprend cinq catégories de produits contenant des Terres Rares :

- 28053010 - Métaux de Terres Rares, scandium et yttrium, mélangés ou alliés entre eux ;
- 28053090 - Métaux de Terres Rares, scandium et yttrium, non-mélangés ni alliés entre eux ;
- 28469000 - Composés, inorganiques ou organiques, des métaux des Terres Rares, de l'yttrium ou du scandium ou des mélanges de ces métaux (à l'exclusion des composés de cérium) ;
- 28461000 - Composés de cérium ;
- 36069010 - Ferrocérium et autres alliages pyrophoriques sous toutes formes.

Il existe par ailleurs plusieurs nomenclatures dans le titre desquelles les Terres Rares ne sont pas spécifiquement mentionnées mais qui peuvent en contenir. Les tableaux 31 et 32 récapitulent les données françaises d'importation et d'exportation des quatre nomenclatures suivantes :

- 85051990 - Aimants permanents et articles destinés à devenir des aimants permanents après aimantation, autres qu'en métal ou ferrite agglomérée ;
- 85051990 - Aimants permanents et articles destinés à devenir des aimants permanents après aimantation, autres qu'en métal ou ferrite agglomérée ;
- 32065000 - Produits inorganiques des types utilisés comme luminophores, même de constitution chimique définie ;
- 85075000 - Accumulateurs au nickel-hydrure métallique (sauf hors d'usage).

(À noter qu'il existe une troisième nomenclature d'aimants permanents, la 85051910 - Aimants permanents en ferrite agglomérée, qui ne concerne pas les Terres Rares).

Les données fournies par Le Kiosque excluent le matériel militaire.

	2010			2011			2012			2013			2014		
	valeur	masse	val.unit.	valeur	masse	val.unit.	valeur	masse	val.unit.	valeur	masse	val.unit.	valeur	masse	val.unit.
28053010 - Métaux de terres rares, scandium et yttrium, mélangés ou alliés entre eux															
Exportations FAB															
Allemagne	40 k€	4 t	10.0 €/kg	320 k€	6 t	53.3 €/kg	271 k€	8 t	33.9 €/kg	95 k€	8 t	11.9 €/kg	51 k€	5 t	10.2 €/kg
Belgique	30 k€	1 t		96 k€	2 t		126 k€	3 t	42.0 €/kg	54 k€	2 t		7 k€	0 t	
Espagne							4 k€	0		16 k€	1 t		4 k€	0 t	
Portugal	3 k€	0		6 k€	0		1 k€	0							
Afrique du Sud	5 k€	1 t													
Autres pays	7 k€	0		10 k€	0		3 k€	0		2 k€	0		3 k€	0	
TOTAL	**85 k€**	**6 t**		**432 k€**	**8 t**		**405 k€**	**11 t**		**167 k€**	**11 t**		**65 k€**	**5 t**	
Importations CAF															
Chine	2 586 k€	310 t	8.3 €/kg	3 514 k€	386 t	9.1 €/kg	3 485 k€	207 t	16.8 €/kg	2 461 k€	279 t	8.8 €/kg	901 k€	163 t	5.5 €/kg
Hong-Kong										245 k€	40 t	6.1 €/kg			
Royaume-Uni	1 k€	0		108 k€	2 t		15 k€	1 t							
Autriche	30 k€	1 t													
Allemagne							4 k€	0 t							
Autres pays	3 k€	0		86 k€	99 t	0.9 €/kg	202 k€	14 t	14.4 €/kg	130 k€	1 t		31 k€	2 t	
TOTAL	**33 k€**	**1 t**		**3 708 k€**	**487 t**		**3 706 k€**	**222 t**		**2 836 k€**	**320 t**		**932 k€**	**165 t**	
Solde	**52 k€**	**5 t**		**-3 276 k€**	**-479 t**		**-3 301 k€**	**-211 t**		**-2 669 k€**	**-309 t**		**-867 k€**	**-160 t**	
28053090 - Métaux de terres rares, scandium et yttrium, non-mélangés ni alliés entre eux															
Exportations FAB															
Roumanie	8 k€	0		33	1 t		35 k€	1 t		67 k€	3 t		59 k€	2 t	
Espagne							1 k€	0					10 k€	1 t	
Portugal													7 k€	0	
Italie	3 k€	1 t											6 k€	0	
Allemagne							6 k€	0		1 k€	0		3 k€	0	
Pologne				5 k€	0					4 k€	0				
Etats-Unis										3 k€	0				
Chine	1 k€	0		6 k€	1 t										
Autres pays	13 k€	1		6 k€	0					1 k€	0		2 k€	0	
TOTAL	**25 k€**	**2 t**		**50 k€**	**2 t**		**42 k€**	**1 t**		**76 k€**	**3 t**		**87 k€**	**3 t**	
Importations CAF															
Chine	482 k€	22 t	21.9 €/kg	224 k€	7 t	32.0 €/kg	13 k€	1 t		178 k€	14 t	12.7 €/kg	182 k€	22 t	8.3 €/kg
Autriche	45 k€	1 t		21 k€	0		9 k€	0		53 k€	1 t		48 k€	1 t	
Royaume-Uni	550 k€	25 t	22.0 €/kg	36 k€	1 t		19 k€	0		31 k€	0		38 k€	0	
Etats-Unis	18 k€	0		17 k€	0		15 k€	0		34 k€	0		28 k€	0	
Italie	48 k€	11 t	4.4 €/kg	49 k€	11 t	4.5 €/kg	70 k€	12 t	5.8 €/kg	9 k€	2 t		6 k€	2 t	
Brésil				78 k€	1 t										
Autres pays	13 k€	0		14 k€	0		800 k€	44 t		9 k€	0		11 k€	0	
TOTAL	**1 156 k€**	**59 t**		**439 k€**	**20 t**		**926 k€**	**57 t**		**314 k€**	**17 t**		**313 k€**	**25 t**	
Solde	**-1 131 k€**	**-57 t**		**-389 k€**	**-18 t**		**-884 k€**	**-56 t**		**-238 k€**	**-14 t**		**-226 k€**	**-22 t**	
28469000 - Composés, inorganiques ou organiques, de terres rares, Y ou Sc, à l'exclusion des composés du Ce															
Exportations FAB															
Chine	618 k€	179 t	3.5 €/kg	619 k€	576 t	1.1 €/kg	867 k€	51 t	17.0 €/kg	1 236 k€	583 t	2.1 €/kg	3 171 k€	274 t	11.6 €/kg
Etats-Unis	4 866 k€	648 t	7.5 €/kg	10 589 k€	376 t	28.2 €/kg	46 444 k€	786 t	59.1 €/kg	19 796 k€	291 t	68.0 €/kg	4 692 k€	236 t	19.9 €/kg
Japon	4 661 k€	2 120 t	2.2 €/kg	5 094 k€	700 t	7.3 €/kg	3 044 k€	236 t	12.9 €/kg	1 445 k€	77 t	18.8 €/kg	2 954 k€	142 t	20.8 €/kg
Allemagne	1 296 k€	181 t	7.2 €/kg	4 080 k€	700 t	5.8 €/kg	7 269 k€	562 t	12.9 €/kg	5 632 k€	634 t	8.9 €/kg	7 588 k€	80 t	94.9 €/kg
Italie	909 k€	25 t	36.4 €/kg	2 639 k€	17 t	155.2 €/kg	3 807 k€	46 t	82.8 €/kg	2 534 k€	31 t	81.7 €/kg	2 854 k€	63 t	45.3 €/kg
Espagne	190 k€	3 t	63.3 €/kg	222 k€	3 t	74.0 €/kg	363 k€	3 t	121.0 €/kg	1 515 k€	19 t	79.7 €/kg	254 k€	2 t	127.0 €/kg
Pays-Bas	178 k€	8 t	22.3 €/kg	57 k€	1 t		19 k€	1 t		1 786 k€	23 t	77.7 €/kg	1 045 k€	20 t	52.3 €/kg
Suède	138 k€	3 t	46.0 €/kg	590 k€	4 t	147.5 €/kg	494 k€	4 t	123.5 €/kg	331 k€	3 t	110.3 €/kg	721 k€	5 t	144.2 €/kg
Tchèquie	86 k€	2 t		1 070 k€	60 t	17.8 €/kg	6 806 k€	273 t	24.9 €/kg	2 488 k€	141 t	17.6 €/kg	2 k€	0 t	
Brésil	130 k€	25 t	5.2 €/kg	1 011 k€	34 t	29.7 €/kg	939 k€	47 t	20.0 €/kg						
Corée du Sud	308 k€	29 t	10.6 €/kg	1 602 k€	78 t	20.5 €/kg	1 209 k€	35 t	34.5 €/kg						
Afrique du Sud	261 k€	48 t	5.4 €/kg	1 605 k€	30 t	53.5 €/kg	486 k€	27 t	17.9 €/kg						
Egypte				484 k€	2 t		244 k€	2 t							
Inde	237 k€	34 t	7.0 €/kg	728 k€	12 t	60.7 €/kg	82 k€	2 t							
Royaume-Uni	266 k€	43 t	6.2 €/kg	457 k€	69 t	6.6 €/kg	55 k€	1 t							
Belgique	316 k€	40 t	7.9 €/kg	244 k€	19 t	12.8 €/kg	199 k€	1 t							
Autres pays	587 k€	23 t	25.5 €/kg	996 k€	105 t	9.5 €/kg	598 k€	18 t	33.2 €/kg	1 044 k€	75 t	13.9 €/kg	425 k€	21 t	
TOTAL	**15 047 k€**	**3 411 t**		**32 087 k€**	**2 786 t**		**72 925 k€**	**2 095 t**		**37 807 k€**	**1 877 t**		**23 706 k€**	**843 t**	
Importations CAF															
Japon	1 641 k€	181 t	9.1 €/kg	4 577 k€	192 t	23.8 €/kg	13 772 k€	423 t	32.6 €/kg	10 240 k€	410 t	25.0 €/kg	5 890 k€	196 t	30.1 €/kg
Chine	22 198 k€	741 t	30.0 €/kg	90 596 k€	581 t	155.9 €/kg	58 263 k€	315 t	185.0 €/kg	26 130 k€	591 t	44.2 €/kg	6 743 k€	133 t	50.7 €/kg
Etats-Unis	2 458 k€	337 t	7.3 €/kg	3 783 k€	418 t	9.1 €/kg	11 597 k€	396 t	29.3 €/kg	6 384 k€	280 t	22.8 €/kg	2 344 k€	99 t	23.7 €/kg
Malaisie										422 k€	20 t	21.1 €/kg	2 044 k€	70 t	29.2 €/kg
Autriche	886 k€	49 t	18.1 €/kg	4 170 k€	85 t	49.1 €/kg	3 463 k€	35 t	98.9 €/kg	1 389 k€	27 t	51.4 €/kg	1 145 k€	37 t	30.9 €/kg
Hong-Kong							151 k€	3 t	50.3 €/kg	1 085 k€	22 t	49.3 €/kg	738 k€	17 t	43.4 €/kg
Allemagne	72 k€	6 t	12.0 €/kg	48 k€	1 t		276 k€	74 t	3.7 €/kg						
Royaume-Uni	702 k€	26 t	27.0 €/kg	4 244 k€	56 t	75.8 €/kg	78 k€	1 t							
Autres pays	1 216 k€	68 t	17.9 €/kg	1 650 k€	25 t	66.0 €/kg	4 927 k€	54 t	91.2 €/kg	605 k€	45 t	13.4 €/kg	891 k€	20 t	44.6 €/kg
TOTAL	**29 173 k€**	**1 408 t**		**109 068 k€**	**1 358 t**		**92 527 k€**	**1 301 t**		**46 255 k€**	**1 395 t**		**19 795 k€**	**572 t**	
Solde	**-14 126 k€**	**2 003 t**		**-76 981 k€**	**1 428 t**		**-19 602 k€**	**794 t**		**-8 448 k€**	**482 t**		**3 911 k€**	**271 t**	
Cumul composés, métaux et alliages de terres rares, hors cérium et ferrocérium (NC8 28053010, 28053090 et 28469000)															
Exportations	15 157 k€	3 419 t		32 569 k€	2 796 t		73 372 k€	2 107 t		38 050 k€	1 891 t		23 858 k€	851 t	
Importations	30 362 k€	1 468 t		113 215 k€	1 865 t		97 159 k€	1 580 t		49 405 k€	1 732 t		21 040 k€	762 t	
Solde	**-15 205 k€**	**1 951 t**		**-80 646 k€**	**931 t**		**-23 787 k€**	**527 t**		**-11 355 k€**	**159 t**		**2 818 k€**	**89 t**	

Tableau 29 - Statistiques françaises d'import-export de métaux, alliages et composés de Terres Rares, hors cérium et ferrocérium. Données CAF-FAB, hors matériel militaire. Source : http://lekiosque.finances.gouv.fr

	2010			2011			2012			2013			2014		
	valeur	masse	val.unit.	valeur	masse	val.unit.	valeur	masse	val.unit.	valeur	masse	val.unit.	valeur	masse	val.unit.
36069010 - Ferrocérium et autres alliages pyrophoriques sous toutes formes															
Exportations FAB															
Tous pays	*Confidentiel*			*Confidentiel*			*Confidentiel*			*Confidentiel*			*Confidentiel*		
Importations CAF															
Irlande							93 k€	49 t	1.9 €/kg	147 k€	76 t	1.9 €/kg	567 k€	305 t	1.9 €/kg
Belgique	37 k€	16 t	2.3 €/kg	1 k€	0					4 k€	0		600 k€	242 t	2.5 €/kg
Chine	2 k€	0		6 188 k€	187 t	33.1 €/kg	19 900 k€	658 t	30.2 €/kg	978 k€	120 t	8.2 €/kg	1 039 k€	162 t	6.4 €/kg
Royaume-Uni													197 k€	79 t	2.5 €/kg
Espagne													368 k€	17 t	21.6 €/kg
Etats-Unis	74 k€	1 t		79 k€	2 t		262 k€	5 t	52.4 €/kg	142 k€	2 t				
Pologne	48 k€	65 t	0.7 €/kg	29 k€	174 t	0.2 €/kg	38 k€	227 t	0.2 €/kg						
Allemagne	3 k€	0		1 k€	0		19 k€	0							
Canada				1 471 k€	22 t	66.9 €/kg									
Retour France										6 k€	0		1 100 k€	104 t	10.6 €/kg
Autres pays	2 k€	1 t		67 k€	3 t	22.3 €/kg				13 k€	43 t	0.3 €/kg	116 k€	23 t	5.0 €/kg
TOTAL	**166 k€**	**83 t**		**7 836 k€**	**388 t**		**20 312 k€**	**939 t**		**1 290 k€**	**241 t**		**3 987 k€**	**932 t**	
Solde	*???*			*???*			*???*			*???*			*???*		
28461000 - Composés de cérium															
Exportations FAB															
Tous pays	*Confidentiel*			*Confidentiel*			*Confidentiel*			*Confidentiel*			*Confidentiel*		
Importations CAF															
Chine	14 188 k€	4 553 t	3.1 €/kg	94 723 k€	1 575 t	60.1 €/kg	*Confidentiel*			*Confidentiel*			*Confidentiel*		
Etats-Unis	105 k€	29 t	3.6 €/kg	2 832 k€	72 t	39.3 €/kg									
Espagne	399 k€	99 t	4.0 €/kg	1 164 k€	62 t	18.8 €/kg									
Autriche	628 k€	95 t	6.6 €/kg	1 537 k€	57 t	27.0 €/kg									
Belgique	117 k€	39 t	3.0 €/kg	2 687 k€	56 t	48.0 €/kg									
Japon	591 k€	14 t	42.2 €/kg	381 k€	8 t	47.6 €/kg									
Allemagne	72 k€	11 t	6.5 €/kg	133 k€	6 t	22.2 €/kg									
Corée du Sud	1 551 k€	558 t	2.8 €/kg												
Estonie	199 k€	259 t	0.8 €/kg												
Autres pays	282 k€	28 t	10.1 €/kg	1 248 k€	30 t										
TOTAL	**18 132 k€**	**5 685 t**		**104 705 k€**	**1 866 t**		*Confidentiel*			*Confidentiel*			*Confidentiel*		
Solde	*???*			*???*			*???*			*???*			*???*		

Tableau 30 - Statistiques françaises d'import-export de ferrocérium et des composés du cérium. Données CAF-FAB, hors matériel militaire. Source : http://lekiosque.finances.gouv.fr

Remarques préliminaires sur la qualité et la pertinence des données

Il est à noter que, à l'exception du cérium qui est distingué dans les nomenclatures 2846100 et 36069010, tous les autres éléments des Terres Rares sont fusionnés dans des nomenclatures communes. Il est donc impossible d'évaluer spécifiquement les importations, exportations et par éventuelle déduction les consommations françaises spécifiques de lanthane, de néodyme, d'europium ou de dysprosium, par exemple.

La nomenclature 28469000 (composés inorganiques ou organiques des métaux de Terres Rares) recouvre en particulier les oxydes de Terres Rares (OTR), qui sont la forme sous laquelle ces éléments sont majoritairement échangés. Mais elle inclut aussi des carbonates, chlorures ou tout autre composé plus complexe, de sorte qu'il est difficile de déduire des tonnages échangés les tonnages exacts de Terres Rares ou oxydes de Terres Rares contenus, même sans distinguer les Terres Rares les unes des autres.

De plus, pour les deux nomenclatures spécifiques au cérium, les données d'exportation sont considérées comme confidentielles depuis 2009 et celles d'importation de composés depuis 2013, et ne sont donc pas publiées. De plus, la nomenclature 36069010 est intitulée « ferrocérium et autres alliages pyrophoriques sous toutes formes », elle peut donc inclure des masses qui ne contiennent pas du tout de cérium ou d'autres Terres Rares. Cette nomenclature est donc difficilement utilisable pour l'appréciation du marché.

Les données 2012 qui n'avaient pas été téléchargées alors n'étant plus disponibles sur le site du kiosque, ce sont les données de la base Eurostat[102] qui ont été utilisée. Elles sont reportées seulement à titre indicatif, car, sur les autres années, on constate parfois des écarts entre les données du kiosque et les données d'Eurostat, en particulier pour les importations en provenance de Chine. Il semblerait que certaines importations originaires de

[102] http://epp.eurostat.ec.europa.eu/newxtweb/

Chine mais transitant par un autre pays européen (Belgique ou Pays-Bas par exemple) puissent être traitées différemment selon les bases de données (enregistrées comme importées de Chine ou importées de Belgique ou des Pays-Bas). Ces écarts n'affectent cependant pas les soldes globaux.

Commentaires sur les imports-exports de Terres Rares et leurs composés

Au-delà des remarques ci-dessus, l'examen des tableaux 29 et 30 appelle un certain nombre de commentaires :

Concernant les composés de cérium et le ferrocérium, il est impossible d'avoir une évaluation du solde du commerce extérieur. Pour le « ferrocérium et autres alliages pyrophoriques », l'ordre de grandeur des importations est de 4 M€ en 2014, très variable selon les années (1,3 M€ en 2013 et 20,3 M€ en 2012). Aucune donnée d'export n'est publiée. Pour les composés de cérium, aucune donnée ni d'import ni d'export n'est publiée depuis 2012, et seuls les importations étaient publiées auparavant. Elles se montaient à 104,7 M€ en 2011 pour 1 866 t.

On constate aussi que les composés devaient recouvrir des substances très variables en contenu en cérium, puisque les prix unitaires, sur l'année 2010, s'échelonnaient de 0,8 €/kg pour les importations d'Estonie, 4,5 €/kg pour les importations d'Allemagne, et 42,2 € pour les importations du Japon, soit un écart de 1 à 55.

Le cérium étant l'élément des Terres Rares le plus abondant et en relative surproduction (production fatale avec les autres éléments plus critiques), l'insuffisance des données d'import-export est dommageable pour la connaissance et la compréhension des échanges extérieurs et le sens de la balance commerciale les concernant, mais n'est guère dommageable pour l'appréhension de la criticité de cet élément, relativement faible, vu son abondance sur le marché.

Concernant les autres Terres Rares, couvertes par 3 nomenclatures douanières (métaux non-séparés, métaux séparés et composés), l'on voit que les Terres Rares sous forme métallique, séparées ou non, ne représentent qu'une faible fraction des échanges, largement dominés par les composés, tant en tonnage qu'en valeur (moins de 1 % des exports en tonnage et en valeur, et de l'ordre de 5 % des imports en valeur et moins de 20% en tonnage cumulé).

On constate que la balance commerciale a été systématiquement déficitaire en tonnage comme en valeur pour les Terres Rares sous forme métallique ou alliée, le fournisseur largement dominant étant la Chine.

Pour les composés, on constate aussi que, sur les années 2009 à 2013, le solde des composés était excédentaire en tonnage mais déficitaire en valeur entre 2009 et 2013, avec un déficit décroissant entre 2011 et 2013 (déficit de 77 M€ en 2011, 19,6 M€ en 2012, 8,4 M€ en 2013) puis excédentaire aussi en valeur en 2014 (+2,8 M€). Cette évolution est peut-être en partie liée à la baisse des prix des Terres Rares, et en particulier au prix unitaire des composés de Terres Rares en provenance de Chine (185 €/kg en 2012, 50 €/kg en 2014). Les fournisseurs majoritaires de composés de Terres Rares sont la Chine et le Japon, mais la Malaisie commence à apparaitre en 2013, avec le démarrage de l'usine de Lynas et de ses livraisons à Solvay/Rhodia (cf. 6.2.5).

L'interprétation globale de ces évolutions est délicate, puisque :

- on ne sait pas quelle est la répartition de chaque Terre Rare dans les importations et les exportations, or les prix d'un élément à l'autre varie d'un facteur de 1 à plus de 200 (cf. chapitre 5, prix moyen en mai 2015 de l'oxyde de lanthane : 2,88 /kg ; de l'oxyde de terbium : 632 US$/kg) ; et
- on ne sait pas, même pour un élément donné, quelle est la nature des composés considérés, qui peuvent avoir des teneurs variées en l'élément en question.

On voit aussi que les tonnages exportés comme importés ont été pratiquement divisés par deux entre 2013 et 2014 (exportations passées de 1 891 t à 851 t et importations de 1 732 à 762 t), ce qui peut aussi traduire une baisse de l'activité industrielle correspondante.

Les imports-exports de produits intermédiaires susceptibles de contenir des Terres Rares

Le tableau 31 ci-après récapitule les données françaises d'importation et d'exportation des aimants permanents « en métal » et « autres qu'en métal ou en ferrite agglomérée »[103], et le tableau 32 celles des produits inorganiques luminophores et des accumulateurs Ni-MH, tous produits susceptibles de contenir des Terres Rares de nature et des proportions variables.

On constate que les échanges extérieurs de la France sont systématiquement déficitaires tant en masse qu'en valeur pour ces quatre nomenclatures. Les déficits les plus forts en valeur sont les batteries Ni-MH (66,5 M€ de déficit commercial en 2014) et les aimants permanents métalliques (40,2 M€ de déficit en 2014).

[103] Il n'est pas précisé ce que recouvre, au sens des douanes, le qualificatif de "métal" ou "autre qu'en métal" pour les aimants permanents. Les aimants en acier, AlNiCo ou SmCo devraient être considérés comme "métalliques". En revanche, la qualité métallique de l'alliage $Nd_2Fe_{14}B$ des aimants permanents Fe-Nd-B est ambigüe. Il est possible que, selon les déclarants, les importations d'aimants Fe-Nd-B soient affectées à l'une ou l'autre nomenclature (les aimants Fe-Nd-B liés pourraient être classés comme non-métalliques et les aimants Fe-Nd-B frittés comme métalliques, par exemple).

	2013			2014		
	valeur	masse	val.unit.	valeur	masse	val.unit.
85051100 - Aimants permanents [...] en métal						
Exportations FAB						
Pologne	2 008 k€	50 t	40.2 €/kg	1 744 k€	53 t	32.9 €/kg
Allemagne	865 k€	75 t	11.5 €/kg	1 136 k€	61 t	18.6 €/kg
Irlande	4 k€	0 t		922 k€	33 t	27.9 €/kg
Russie	34 k€	4 t	8.5 €/kg	639 k€	57 t	11.2 €/kg
Italie	496 k€	35 t	14.2 €/kg	704 k€	38 t	18.5 €/kg
Chine	469 k€	17 t	27.6 €/kg	453 k€	23 t	19.7 €/kg
Espagne	456 k€	32 t	14.3 €/kg	500 k€	69 t	7.2 €/kg
Brésil	246 k€	29 t	8.5 €/kg	495 k€	56 t	8.8 €/kg
Pays-Bas	83 k€	18 t	4.6 €/kg	162 k€	11 t	14.7 €/kg
Suisse	145 k€	6 t	24.2 €/kg	183 k€	9 t	20.3 €/kg
Hong-Kong	53 k€	2 t	26.5 €/kg	226 k€	16 t	14.1 €/kg
Hongrie	14 k€	1 t		202 k€	1 t	
Belgique	550 k€	24 t	22.9 €/kg	228 k€	19 t	12.0 €/kg
Royaume-Uni	188 k€	11 t	17.1 €/kg	229 k€	16 t	14.3 €/kg
Pakistan				162 k€	24 t	6.8 €/kg
Inde	198 k€	14 t	14.1 €/kg	69 k€	2 t	34.5 €/kg
Côte d'Ivoire	3 k€	0 t		101 k€	1 t	
Japon	1 281 k€	32 t	40.0 €/kg	39 k€	2 t	19.5 €/kg
Etats-Unis	85 k€	2 t	42.5 €/kg	58 k€	1 t	
Roumanie	55 k€	1 t		103 k€	2 t	51.5 €/kg
Suède	57 k€	3 t	19.0 €/kg	95 k€	5 t	19.0 €/kg
Tunisie	44 k€	3 t	14.7 €/kg	63 k€	6 t	10.5 €/kg
Danemark	79 k€	7 t	11.3 €/kg	81 k€	7 t	11.6 €/kg
Kazakhstan				73 k€	11 t	6.6 €/kg
Finlande	51 k€	6 t	8.5 €/kg	44 k€	5 t	8.8 €/kg
Turquie	53 k€	3 t	17.7 €/kg	30 k€	2 t	15.0 €/kg
Gabon	78 k€	7 t	11.1 €/kg			
Nigéria	45 k€	5 t	9.0 €/kg			
Autres pays	328 k€	21 t	15.6 €/kg	331 k€	27 t	12.3 €/kg
TOTAL	**7 968 k€**	**408 t**		**9 072 k€**	**557 t**	
Importations CAF						
Chine	26 967 k€	1 512 t	17.8 €/kg	27 186 k€	1 813 t	15.0 €/kg
Allemagne	8 514 k€	341 t	25.0 €/kg	8 383 k€	464 t	18.1 €/kg
Pays-Bas	4 161 k€	136 t	30.6 €/kg	2 978 k€	111 t	26.8 €/kg
Italie	1 641 k€	159 t	10.3 €/kg	1 772 k€	138 t	12.8 €/kg
Japon	804 k€	3 t	268 €/kg	1 468 k€	15 t	97.9 €/kg
Slovénie	687 k€	6 t	115 €/kg	1 140 k€	10 t	114 €/kg
Royaume-Uni	619 k€	23 t	26.9 €/kg	1 273 k€	19 t	67.0 €/kg
Etats-Unis	1 392 k€	61 t	22.8 €/kg	1 184 k€	26 t	45.5 €/kg
Suisse	484 k€	6 t	80.7 €/kg	748 k€	8 t	93.5 €/kg
Finlande	1 066 k€	30 t	35.5 €/kg	536 k€	16 t	33.5 €/kg
Taïwan	398 k€	76 t	5.2 €/kg	421 k€	74 t	5.7 €/kg
Danemark	4 k€	1 t		297 k€	3 t	99.0 €/kg
Belgique	538 k€	14 t	38.4 €/kg	197 k€	7 t	28.1 €/kg
Autres pays	1 263 k€	124 t	10.2 €/kg	1 727 k€	154 t	11.2 €/kg
TOTAL	**48 538 k€**	**2 492 t**		**49 310 k€**	**2 858 t**	
Solde	**-40 570 k€**	**-2 084 t**		**-40 238 k€**	**-2 301 t**	

	2013			2014		
	valeur	masse	val.unit.	valeur	masse	val.unit.
85051990 - Aimants permanents [...] autres qu'en métal ou ferrite agglo.						
Exportations FAB						
Allemagne	9 163 k€	242 t	37.9 €/kg	9 002 k€	259 t	34.8 €/kg
Chine	2 374 k€	59 t	40.2 €/kg	2 095 k€	415 t	5.0 €/kg
Etats-Unis	1 417 k€	37 t	38.3 €/kg	1 585 k€	41 t	38.7 €/kg
Slovaquie	260 k€	6 t	43.3 €/kg	713 k€	17 t	41.9 €/kg
Royaume-Uni	1 321 k€	43 t	30.7 €/kg	1 092 k€	30 t	36.4 €/kg
Tunisie	1 620 k€	242 t	6.7 €/kg	1 363 k€	196 t	7.0 €/kg
Espagne	1 319 k€	215 t	6.1 €/kg	896 k€	47 t	19.1 €/kg
Roumanie	457 k€	51 t	9.0 €/kg	638 k€	15 t	42.5 €/kg
Tchèquie	331 k€	10 t	33.1 €/kg	732 k€	30 t	24.4 €/kg
Autriche	164 k€	3 t	54.7 €/kg	251 k€	4 t	62.8 €/kg
Mexique	471 k€	8 t	58.9 €/kg	363 k€	8 t	45.4 €/kg
Suisse	274 k€	17 t	16.1 €/kg	319 k€	7 t	45.6 €/kg
Italie	1 013 k€	13 t	77.9 €/kg	266 k€	11 t	24.2 €/kg
Hongrie	42 k€	0 t		220 k€	1 t	
Turquie	103 k€	14 t	7.4 €/kg	105 k€	11 t	9.5 €/kg
Argentine	70 k€	1 t	70.0 €/kg	259 k€	4 t	64.8 €/kg
Corée du Sud	345 k€	25 t	13.8 €/kg	228 k€	15 t	15.2 €/kg
Bangladesh	0 k€	0 t		203 k€	0 t	
Belgique	197 k€	12 t	16.4 €/kg	143 k€	9 t	15.9 €/kg
Pays-Bas	118 k€	5 t	23.6 €/kg	168 k€	8 t	21.0 €/kg
Brésil	683 k€	29 t	23.6 €/kg	144 k€	8 t	18.0 €/kg
Pologne	143 k€	3 t	47.7 €/kg	133 k€	8 t	16.6 €/kg
Suède	142 k€	3 t	47.3 €/kg	102 k€	3 t	34.0 €/kg
Japon	686 k€	49 t	14.0 €/kg	138 k€	5 t	27.6 €/kg
Portugal	138 k€	3 t	46.0 €/kg	55 k€	2 t	27.5 €/kg
Autres pays	733 k€	52 t	14.1 €/kg	502 k€	29 t	17.3 €/kg
TOTAL	**23 584 k€**	**1 142 t**		**21 715 k€**	**1 183 t**	
Importations CAF						
Chine	13 037 k€	2 415 t	5.4 €/kg	11 660 k€	2 361 t	4.9 €/kg
Pays-Bas	1 547 k€	130 t	11.9 €/kg	1 663 k€	127 t	13.1 €/kg
Royaume-Uni	1 495 k€	170 t	8.8 €/kg	1 746 k€	148 t	11.8 €/kg
Pologne	1 619 k€	91 t	17.8 €/kg	1 787 k€	99 t	18.1 €/kg
Allemagne	1 432 k€	63 t	22.7 €/kg	1 468 k€	69 t	21.3 €/kg
Italie	2 241 k€	116 t	19.3 €/kg	762 k€	66 t	11.5 €/kg
Japon	387 k€	3 t	129 €/kg	400 k€	222 t	1.8 €/kg
Tunisie	189 k€	58 t	3.3 €/kg	329 k€	118 t	2.8 €/kg
Etats-Unis	488 k€	88 t	5.5 €/kg	436 k€	46 t	9.5 €/kg
Slovénie	336 k€	9 t	37.3 €/kg	283 k€	8 t	35.4 €/kg
Finlande	19 k€	0 t		198 k€	3 t	66.0 €/kg
Inde	161 k€	56 t	2.9 €/kg	227 k€	77 t	2.9 €/kg
Belgique	145 k€	28 t	5.2 €/kg	222 k€	22 t	10.1 €/kg
Espagne	243 k€	27 t	9.0 €/kg	176 k€	23 t	7.7 €/kg
Autres pays	698 k€	85 t	8.2 €/kg	775 k€	49 t	15.8 €/kg
TOTAL	**24 037 k€**	**3 339 t**		**22 132 k€**	**3 438 t**	
Solde	**-453 k€**	**-2 197 t**		**-417 k€**	**-2 255 t**	

Tableau 31 - Statistiques françaises d'import-export d'aimants permanents, hors ferrites agglomérées. Données CAF-FAB, hors matériel militaire. Source : http://lekiosque.finances.gouv.fr

	2013			2014		
	valeur	masse	val.unit.	valeur	masse	val.unit.
32065000 - Produits inorganiques utilisés comme luminophores […]						
Exportations FAB						
Etats-Unis				59 k€	4 t	14.8 €/kg
Espagne	9 k€	0 t		47 k€	0 t	
Royaume-Uni	41 k€	0 t		23 k€	0 t	
Belgique				8 k€	0 t	
Turquie				17 k€	0 t	
Algérie				17 k€	1 t	
Pays-Bas	29 k€	0 t		19 k€	0 t	
Luxembourg				7 k€	0 t	
Pologne	19 k€	0 t				
Chine				10 k€	2 t	5.0 €/kg
Niger	6 k€	0 t		1 k€	0 t	
Japon	26 k€	0 t				
Mexique	56 k€	6 t	9.3 €/kg			
Nigéria	7 k€	0 t				
Autres pays	7 k€	0 t		9 k€	0 t	
TOTAL	**200 k€**	**6 t**		**217 k€**	**7 t**	
Importations CAF						
Pays-Bas	2 192 k€	27 t	81.2 €/kg	2 543 k€	24 t	106 €/kg
Allemagne	3 117 k€	14 t	223 €/kg	1 156 k€	4 t	289 €/kg
Japon	337 k€	3 t	112 €/kg	664 k€	4 t	166 €/kg
Chine	94 k€	3 t	31.3 €/kg	117 k€	4 t	29.3 €/kg
Hongrie	74 k€	8 t	9.3 €/kg	66 k€	9 t	7.3 €/kg
Royaume-Uni	130 k€	11 t	11.8 €/kg	93 k€	6 t	15.5 €/kg
Italie	112 k€	11 t	10.2 €/kg	85 k€	8 t	10.6 €/kg
n.c.a.	14 k€	0 t		789 k€	1 t	
Autres pays	190 k€	14 t	13.6 €/kg	158 k€	8 t	19.8 €/kg
TOTAL	**6 260 k€**	**91 t**		**5 671 k€**	**68 t**	
Solde	**-6 060 k€**	**-85 t**		**-5 454 k€**	**-61 t**	

	2013			2014		
	valeur	masse	val.unit.	valeur	masse	val.unit.
85075000 - Accumulateurs au nickel-hydrure métallique (sauf hors d'usage)						
Exportations FAB						
Espagne	3 203 k€	64 t	50.0 €/kg	5 188 k€	106 t	48.9 €/kg
Royaume-Uni	1 899 k€	46 t	41.3 €/kg	2 505 k€	57 t	43.9 €/kg
Autriche	1 580 k€	37 t	42.7 €/kg	1 924 k€	47 t	40.9 €/kg
Allemagne	1 213 k€	28 t	43.3 €/kg	1 646 k€	37 t	44.5 €/kg
Etats-Unis	1 199 k€	31 t	38.7 €/kg	1 165 k€	30 t	38.8 €/kg
Pays-Bas	1 146 k€	32 t	35.8 €/kg	902 k€	21 t	43.0 €/kg
Belgique	801 k€	23 t	34.8 €/kg	831 k€	22 t	37.8 €/kg
Italie	872 k€	23 t	37.9 €/kg	465 k€	27 t	17.2 €/kg
Suède	121 k€	2 t	60.5 €/kg	227 k€	5 t	45.4 €/kg
Suisse	469 k€	11 t	42.6 €/kg	302 k€	8 t	37.8 €/kg
Finlande	169 k€	5 t	33.8 €/kg	246 k€	7 t	35.1 €/kg
Chine	49 k€	1 t		76 k€	1 t	
Pologne	147 k€	4 t	36.8 €/kg	117 k€	13 t	9.0 €/kg
Norvège	98 k€	2 t	49.0 €/kg	143 k€	3 t	47.7 €/kg
Autres pays	470 k€	10 t	47.0 €/kg	616 k€	31 t	19.9 €/kg
TOTAL	**13 436 k€**	**319 t**		**16 353 k€**	**415 t**	
Importations CAF						
Japon	79 414 k€	2 529 t	31.4 €/kg	61 139 k€	2 573 t	23.8 €/kg
Chine	16 250 k€	635 t	25.6 €/kg	14 616 k€	559 t	26.1 €/kg
Allemagne	4 521 k€	95 t	47.6 €/kg	3 810 k€	83 t	45.9 €/kg
Autres pays	3 816 k€	75 t	50.9 €/kg	3 269 k€	56 t	58.4 €/kg
TOTAL	**104 001 k€**	**3 334 t**		**82 834 k€**	**3 271 t**	
Solde	**-90 565 k€**	**-3 015 t**		**-66 481 k€**	**-2 856 t**	

Tableau 32 - Statistiques françaises d'import-export de luminophores et d'accumulateurs Ni-MH. Données CAF-FAB, hors matériel militaire. Source : http://lekiosque.finances.gouv.fr

7.2. CONSOMMATION FRANÇAISE DE TERRES RARES

Pour estimer la consommation française apparente de Terres Rares, il conviendrait, en sus des données d'import-export, de connaitre les données de production (production de l'usine Solvay/Rhodia de La Rochelle, en particulier), non publiée, mais aussi sa consommation : l'usine importe des composés non-séparés et en ressort des composés davantage séparés et transformés.

La consommation apparente, hors production française, c'est-à-dire les importations moins les exportations, aurait été de 323 tonnes de Terres Rares sous forme métal (séparé ou non) en 2014. La consommation apparente de composés (hors cérium) est impossible à déterminer, puisque le solde est excédentaire en tonnage (271 t en 2014) et que la consommation ne peut pas être négative, la France n'ayant pas de production primaire de Terres Rares.

Enfin, une certaine quantité de Terres Rares est importée sous une forme déjà intégrée, d'une part dans les produits intermédiaires tels que les aimants permanents, les luminophores ou les batteries Ni-MH, et d'autre part dans des équipements et produits finis qui contiennent ce type de produits intermédiaires (appareils électriques ou électroniques qui contiennent moteurs électriques et/ou des équipements électro-acoustiques miniature, appareils et équipements munis de batteries Ni-MH, part importée d'ampoules d'éclairage fluo-compactes, etc. Ce sont des quantités qui, à terme, en fin de vie, peuvent devenir sources de Terres Rares recyclées (cf. 4.5), mais ces quantités correspondent bien à des masses qui ont été importées à un moment donné, bien que les Terres Rares n'y soient pas spécifiées dans les nomenclatures douanières.

Ainsi la production française de composés de Terres Rares issues du recyclage (Solvay/Rhodia) provient bien, à une étape ou à une autre antérieur, de produits ayant été importés.

8. Criticité

La synthèse des criticités des éléments de Terres Rares est résumée comme suit (fig. 58) :

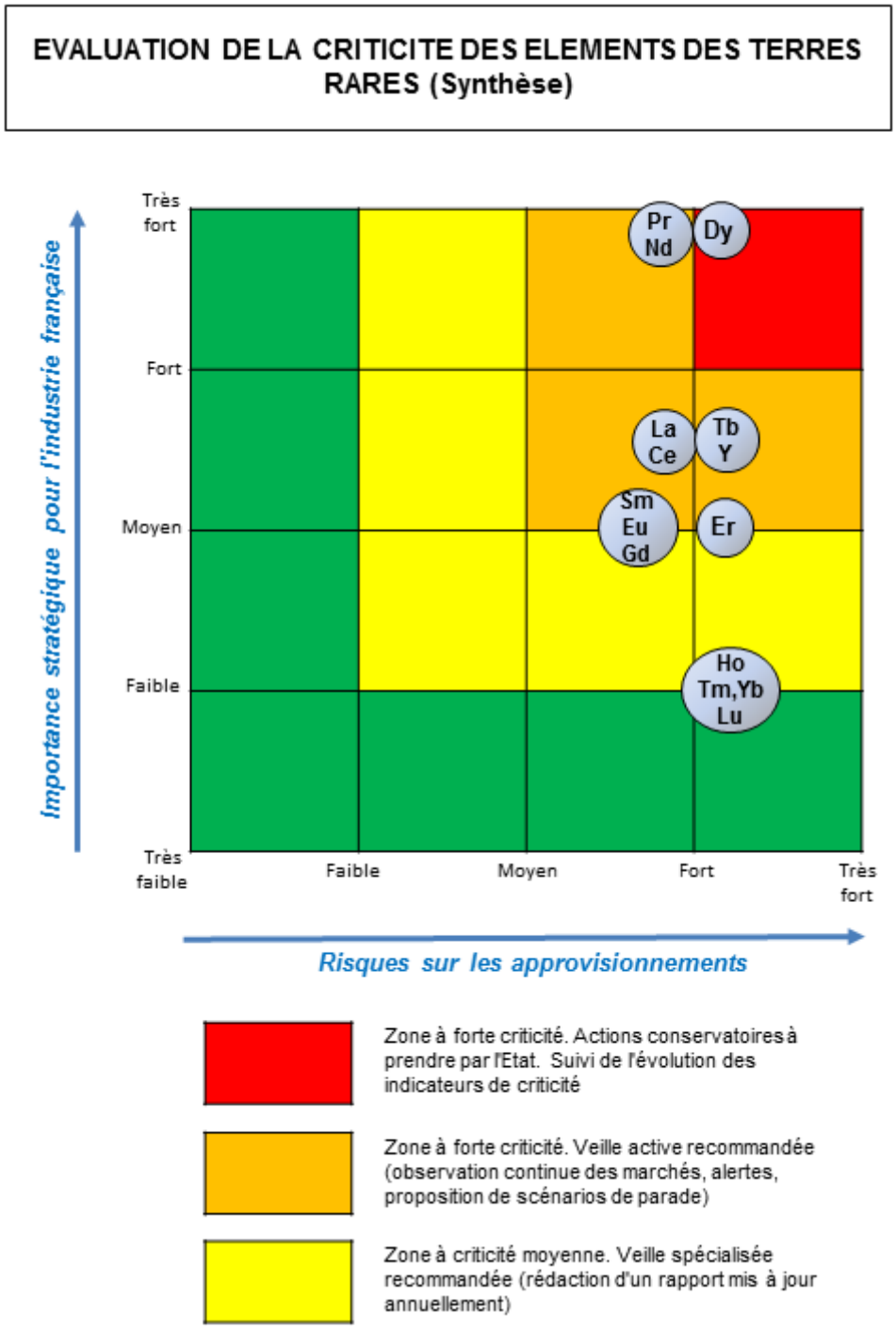


Figure 58 - Synthèse de la criticité des terres rares.

Bibliographie

Ad-hoc Working Group (European Commission, 2010) - Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2010, 53 p., 5 ann. http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/report-b_en.pdf

Ad-hoc Working Group (European Commission, 2014) - Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014, 41 p., http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf

Alonso, E., Sherman, A. M., Wallington, T. J., Everson, M. P., Field, F. R., Roth, R., & Kirchain, R. E. (2012) - Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies. Environmental Science & Technology, Vol. 46, No.6, pp. 3406-3414.

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

British Geological Survey (2012) - Element Risk list 2012 www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=2643

Charles N., Tuduri J., Guyonnet D., Pourret O., Melleton J., (2013) - Rare Earth Elements in Europe and Greenland: A geological potential? An overview. Mineral deposit research for a high-tech world. Proceedings of the 12th Biennial SGA Meeting, 12-15 August 2013, Uppsala, Sweden, ISBN 978-91-7403-207-9, 1698-1701.

Christmann P. (2014) - Les ressources minières en Terres rares et Métaux rares: facteurs de risque. Présentation au colloque Terres Rares et Métaux rares, enjeux du XXIème siècle ? Fondation Écologie d'Avenir, Paris, 15 mai 2014. http://fondationecologiedavenir.org/Colloque_Terres_Rares/Christmann.pdf

Constantinides S. (2014) - The technology and market issues of magnetic materials. Arnold Magnetic Technologies Corp. presentation, September14, 2014, 158 slides

Haynes W.M., Lide D.R. ***et al.*** (2012) - CRC Handbook of Chemistry and Physics, 92nd edition. CRC Press, Boca Raton, Floride, Etats-Unis

CNUCED (2014) - Coup d'œil sur les produits de base, Edition spéciale sur les terres rares, 50 p. http://unctad.org/en/Pages/SUC/Commodities/SUC-Commodities-at-a-Glance.aspx

Du, X., Graedel, T.E. (2011) - Global in-use stock of the rare earth elements: A first estimate. Environmental Science & Technology 2011, 45, pp.4096-4101. http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es102836s

Du, X., Graedel, T.E. (2011) - Global Rare Earth in-use stocks in NdFeB Permanent Magnets. Journal of Industrial Ecology, 7 p. www.mmta.co.uk/uploads/2012/09/19/142012_ree_magnets_graedel_2011.pdf

Dubois, D., Fargier, H., Guyonnet, D., Leroux, R., Planchon, M., Rollat, A., Tuduri, J. (2015) - Projet ANR ASTER. Rapport de Tâche 6. Réconciliation des MFA Terres Rares. Rapport final. BRGM/RP-64326-FR, 49 p., 8 fig., 8 tabl., 4 ann.

http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64326-FR.pdf

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

Gambogi J. (USGS, 2012) - 2012 - Mineral Yearbook: Rare Earths, revised fev. 2015, 13 p. http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/myb1-2012-raree.pdf

Gambogi J. (USGS, 2015) - 2015 Mineral Commodity Summaries: Rare Earths, janvier 2015, 2p. http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2015-raree.pdf

Géochronique (2011) - Magazine des Géosciences n°118, Dossier : Terres Rares, pp. 16-37.

Goodenough K.M., Schilling J., Jonsson E., Kalvig P., Charles N., Tuduri, J., Deady E.A., Sadeghi M., Schiellerup H., Müller A., Bertrand G., Arvaniditis N., Eliopoulos D.G., Shaw R.A., Thrane K., Keulen N. (2016) - Europe's rare earth element resources: metallogenetic provinces and geodynamic setting. Ore Geology Reviews 72, 838-856.

Goonan T.G. (2011) - Rare Earth elements - End use and recyclability. USGS scientific investigation report 2011-5094, 15 p. http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5094/pdf/sir2011-5094.pdf

Graedel T.E. ***et al.*** (UNEP, 2010) - Metal stocks in society, scientific synthesis. Global Metal Flows working group of the International Panel on Sustainable Resource Management, Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE/UNEP), 44 p., 7 fig., 8 app. www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metalstocks insociety.pdf

Graedel T.E. ***et al.*** (UNEP, 2011) - Recycling rates of metals, a status report. Global Metal Flows working group of the International Panel on Sustainable Resource Management, Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE/UNEP), 48 p., 4 fig., 2 app. www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf

Gutfleisch, O., Willard, M. A., Brück, E., Chen, C. H., Sankar, S. G., & Liu, J. P. (2011) - Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient. Advanced materials, Vol. 23, No. 7, pp.821-842.

Guyonnet D., Planchon M., Rollat A., Escalon V., Tuduri J., Charles N., Vaxelaire S., Dubois D., Fargier H. (in press) - Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe Journal of cleaner production. https://www.archives-ouvertes.fr/hal-01152939/document

Hatch G.P. (2011) - Critical Rare Earths. Global supply & demand projections and the leading contenders for new sources of supply. Technology Metals Research, Carpentersville, IL, USA, 76 p.

Hocquard C. (2014) - Chine et terres rares : situation au premier semestre 2014 et perspectives. www.mineralinfo.fr/ecomine/chine-terres-rares-situation-au-premier-semestre-2014-perspectives

Jordens A., Cheng Y.P., Waters K.E. (2013) - A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. Miner. Eng., Vol. 41, pp. 97–114

Kleijn R., Rademaker J. (2011) - Metals in energy technologies & rare earth recycling. Leiden University. Presentation at the Kivi Niria jaarcongres, Delft, November 23, 2011. 49 slides.
https://www.kivi.nl/media/Techniekpromotie/Thema_sKIVINIRIA/Slim_Materiaalgebruik/presentaties/W205_Kleijn.pdf

Kara H., Chapman A., Crichton T., Willis P., Morley N. (Oakdene Hollins, 2010) - Lanthanide resources and alternatives, 57 p.
www.oakdenehollins.co.uk/media/205/lanthanide_resources_and_alternatives_may_2010.pdf

Kato Y., Fujinaga K., Nakamura K., Takaya Y., Kitamura K., Ohta J., Toda R., Nakashima T., Iwamori H. (2011) - Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. Nature Geoscience, 5 p.
www.nature.com/ngeo/journal/v4/n8/pdf/ngeo1185.pdf

Kingsnorth D. (2013) - Rare earths: Is supply critical in 2013 ?, Presentation June 5, 2013, Aus IMM 2013 Critical Minerals Conference, Perth.

Kingsnorth D. (2014) - The rare earths industry: sustainable or stagnant? 2014 forecast. Presentation June 26, 2014 at the ERECON Steering Committee, Brussels.

Kleinj R. and Van der Voet E. (2010) - Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration. Renewable and Sustainable Energy Review. Vol.14, No. 9, pp. 2784-2795.

Komuro M., Qiongzhen L., Lanting Z., Fang X., Jiansheng W., and. Xianping D, (2010) - Dysprosium Nitride-Modified Sintered Nd–Fe–B Magnets with Increased Coercivity and Resistivity. *Jpn. J. Appl. Phys.,* Vol.49. doi:10.1143/JJAP.49.093001

Le Gleuher M. (2015) - La Chine poursuit la consolidation de son secteur des terres rares. Article Ecomine du 19 mai 2015, www.mineralinfo.fr/ecomine

Le Gleuher M. (2015) - La Chine a supprimé les taxes à l'exportation des terres rares et instauré une nouvelle redevance sur les concentrés. Article Ecomine du 22 mai 2015 www.mineralinfo.fr/ecomine

Long K.R. (2011) - The future of Rare Earth elements. Will these high-tech industry elements continue in short supply ? USGS open file report 2011-1189, 43 p.
http://pubs.usgs.gov/of/2011/1189/of2011-1189.pdf

Lucas J. , Lucas P., Le Mercier T., Rollat A., Davenport W.G. (2014) - Rare Earths: Science, Technology, Production and Use, Elsevier, 410 p.

Marchesseau J. (1978) - Étude des gisements de sables à ilménite, zircon, monazite et calcaire coquiller dans les formations littorales de la Guyane française. Rapport de fin de mission 1978. Rapport BRGM 78 GUY 002, BRGM, Direction Guyane, Cayenne.

Molycorp Inc (1993) - A Lanthanid Lanthology. Part. I 66 p ; Part II, 58 p.
www.phy.davidson.edu/fachome/dmb/RESolGelGlass/Lanthology/Lanthology_a-l.pdf ;
www.phy.davidson.edu/fachome/dmb/RESolGelGlass/Lanthology/Lanthology_M-Z.pdf

Navarro J. and Zhao F. (2014) - Life-cycle assessment of the production of rare-earth elements for energy applications: a review. *Front. Energy Res.* Vol.2, No.45. doi: 10.3389/fenrg.2014.00045

OPECST (Office Parlementaire d'évaluation des choix scvientiofiques et technologiques) (2014) - Étude de faisabilité de la saisine sur les enjeux stratégiques des Terres Rares. www.assemblee-nationale.fr/opecst/faisabilite_terres_rares.pdf

Panayotova M., Panayotov V. (2012) - Review of methods for the rare earth metals recycling. Annual of the University of Mining and Geology, St. Ivan Rilski, Vol 55, Part II, Mining and Mineral Processing, 6 p., www.mgu.bg/sessions/12/02/mpvp.pdf

Papangelakis V.G., Moldoveanu G. (2014) - Recovery of Rare Earth Elements from Clay Minerals. Proceedings of the 1st European Rare Earth Resources Conference (ERES 2014), Milos, pp. 191 à 202, www.eurare.eu/docs/eres2014/fifthSession/VladimirosPapangelakis.pdf

POLINARES (2012) - Fact Sheet: Rare Earths Oxides (REO). Polinares working paper n. 37, March 2012 www.polinares.eu/docs/d2-1/polinares_wp2_annex2_factsheet3_v1_10.pdf

Rollat A. (Solvay, 2014) - Les Terres Rares, Matériaux stratégiques, enjeux économiques. Présentation à la Fondation Écologie d'Avenir, 15 Mai 2014, 39 slides..

Roskill Information Services (2011) - Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015, 14th Edition 2011, 492 p., 5 app.

Roskill Information Services (2015) - Rare Earths: Market Outlook to 2020, 15thEdition 2015, 337 p., 2 app.

Schüler D., M. Buchert, R. Liu, S. Dittrich, C. Merz (2011) -. Study on Rare Earths and Their Recycling, Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament, Darmstadt, January, 2011. Öko-Institut e.V.

Stosch H.G. (2000) - Geochemie der Seltenen Erden. Mineralogisch-PetropraphischenInstitut des Universität zu Köln, 196 p. http://institut-seltene-erden.org/wp-content/uploads/2012/03/uni-koeln-geochemie-der-seltenen-erden.pdf

Tuduri J., Charles N., Guyonnet D., Melleton J., Pourret O., Rollat A. (2015) - Projet ANR ASTER. Rapport de tâche 4. Potentialité de stocks géologiques de terres rares en Europe et au Groenland. Rapport final. BRGM/RP-64910-FR, 119 p., 12 fig., 3 tabl., 4 ann. http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64910-FR.pdf

Vignes J.L. (2011) - Terres Rares, actualisé en nov. 2014. Disponible en ligne : www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/acc.htm

Wall F. (2014) - Rare Earth Elements, pp. 312-339, in **Gunn G.** (2014) - Critical Metals Handbook (2014), BGS / AGU / Wiley

Walters A., Lusty P. (**BGS**, 2010) - Mineral Profiles - Rare Earth Elements, BGS, Nottingham, Royaume-Uni, 44 p. www.bgs.ac.uk/downloads/start.cfm?id=1638

Watanabe Y. (2010) - Japan's search for alternative rare earths supply. Presentation to the 6th International Rare Earth conference, Hong-Kong, 9-11 November 2010, 14 slides.

Zepf V. (2013) - Rare Earth Elements, A new approach to the nexus of supply, demand and use: exemplified along the use of neodymium in permanent magnets. Ph.D. thesis of the University of Augsburg, Germany. Springer Publisher, 157 pp.

Sites généraux sur les Terres Rares ou les métaux technologiques et certains usages

Société Chimique de France : www.societechimiquedefrance.fr

The Minerals, Metals and Materials Society : www.tms.org

Association for Emission Control by Catalysts : www.aecc.be

Minor Metal Trade Association : www.mmta.co.uk

Investor Intel - Technology Metals : http://investorintel.com/technology-metals/

Technology Metals Research : www.techmetalsresearch.com/

Sites et rapports annuels des sociétés minières et industriels concernées

(cités au cours du texte)

Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34