

STRATÉGIES D'ADAPTATION DES IMPORTATEURS DE TERRES RARES FACE AUX RISQUES DE RUPTURE DE L'APPROVISIONNEMENT MONDIAL

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par **Thibaut Fraiteur** en vue de l'obtention du grade
académique de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement à finalité Gestion de
l'Environnement [M-ENVIG]

Année Académique 2015-2016

Directeur : Prof. M. Degrez

Co-directeur : Dr. G. Wallenborn

Résumé

Les terres rares (REE) sont **un** groupe de métaux, composé des 15 lanthanides, de l'yttrium et du scandium. Leurs configurations électroniques singulières leur confèrent des propriétés physico-chimiques qui en ont fait des matières premières intéressantes dans des domaines d'application nombreux et variés, qu'elles soient utilisées dans des procédés industriels, tels que le craquage du pétrole ou le polissage des verres, ou incorporés dans les composants d'objets en tous genres, allant des téléphones portables aux systèmes de guidage de bombes.

Elles sont également amenées à jouer un rôle important dans le domaine de l'environnement. Elles sont utilisées dans certaines « technologies vertes », telles que les éoliennes, les véhicules hybrides ou électriques, ou encore les éclairages basse consommation. Celles-ci prendront une place de plus en plus importante dans nos sociétés, en pleine mutation vers un modèle neutre en émissions de gaz à effet de serre.

Depuis les années 90, les terres rares sont principalement produites en Chine, qui détient une position quasi monopolistique, acquise grâce à l'implémentation de nombreuses mesures gouvernementales et législatives. Elle n'est cependant pas la seule à disposer de réserves, puisqu'il existerait des gisements dans une trentaine d'autres pays. L'industrie chinoise est également devenue la première consommatrice de REE au monde, en favorisant l'émergence et l'implantation d'entreprises de transformation de ces métaux en produits à haute valeur ajoutée sur son territoire, aux dépens de ses principaux importateurs : l'Union européenne, les États-Unis et le Japon.

La Chine a dès lors récemment fait courir un risque sur l'approvisionnement en matières premières au niveau mondial à cause de quotas d'exportation vers l'étranger. Les économies occidentales ont réagi, entre autres en déposant plainte à l'encontre des mesures chinoises au niveau de l'OMC.

Cette mesure diplomatique s'inscrit cependant dans une stratégie plus large visant à réduire la dépendance des pays aux métaux chinois. Ce sont ces stratégies, au sein de l'Union européenne et aux États-Unis, que nous étudions dans ce travail.

Il en résulte que les institutions ont développé des programmes visant à reconstruire la chaîne de production des terres rares, en cherchant à en diminuer la demande (par la création de technologies alternatives ou ayant recours à des quantités moins importantes de matières premières), et à en augmenter l'offre (par le recyclage et l'ouverture de nouvelles exploitations). Ces stratégies pourraient cependant faire face à des obstacles législatifs, techniques ou relatifs à l'opinion publique, mais aussi économiques, et il n'est pas certain qu'elles ne profiteront pas également à la Chine. Elles changeront cependant la géographie des échanges de REE à travers le monde et les rapports de force qui en résultent.

L'avenir reste néanmoins incertain, et sera impacté par les choix techniques qui seront faits dans le futur, les influences sociétales qui entoureront ces décisions, mais également par les résultats des recherches menées dans ce domaine.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, le professeur Marc Degrez, et à M. Grégoire Wallenborn, mon codirecteur, pour avoir accepté de m'accompagner durant l'ensemble de ce mémoire, depuis la rédaction de mon projet jusqu'à cette version définitive. Leurs commentaires, suggestions et corrections ont été d'une grande aide.

Je remercie ma sœur Séverine pour sa relecture, ses corrections et ses conseils, qui se sont avérés être d'une grande aide dans la finalisation de ce mémoire.

Je remercie ensuite mes proches, et surtout mes parents, pour le soutien qu'ils m'ont apporté durant mon travail et durant mes études, et sans qui je n'en serais pas là aujourd'hui.

Je remercie enfin mes amis du master, avec qui nous avons travaillé dans les locaux du Cercle des Étudiants en Environnement et Tourisme. L'entraide et la bonne humeur qui a régné durant nos longues journées de recherche et de rédaction m'ont permis de surmonter des moments parfois difficiles.

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	10
1. Introduction	10
2. Méthodologie	11
a. Démarche générale.....	11
b. Contextualisation.....	11
c. Cadre d'analyse	12
d. Sources	13
PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS	15
1. Nature et propriétés des métaux	15
2. Usage des terres rares	17
3. Réserve et production des terres rares	20
a. Réserves mondiales	20
b. Production mondiale	22
c. Impacts environnementaux liés à l'exploitation	23
4. Discussion : Introduction à la problématique	24
DEUXIÈME PARTIE : PROBLÉMATIQUE	26
1. L'ère <i>Mountain Pass</i>	26
a. La domination américaine.....	26
c. <i>Molycorp</i> et l'Asie	28
2. L'ère Bayan-Obo : Le monopole de la production chinoise	29
a. Introduction	29
b. Les débuts de la production chinoise.....	29
c. L'instauration des régulations.....	30
d. Les terres rares comme arme diplomatique : l'exemple Sino-Japonais.....	34
3. Plaintes auprès de l'Organisation mondiale du Commerce	34
a. Introduction	34
b. Règles de l'OMC relatives aux mesures de restriction d'exportations.....	35
c. Plainte de 2009.....	35
d. Plainte de 2012.....	36
e. Conclusions	37
4. Quelques évolutions récentes	37
5. Discussion	39
6. Conclusions	43
TROISIÈME PARTIE : TRAJECTOIRE D'ADAPTATION	44

1. Aux États-Unis	44
a. Situation sur le marché américain	44
b. Reconstruire la chaîne de production	45
c. <i>Rare Earths and Critical Materials Revitalization Act</i>	46
d. « Mine to Magnet »	47
e. Exploitation de nouveaux gisements miniers	48
f. Le complexe militaro-industriel américain	48
g. Discussion	50
2. Au sein de l'Union européenne	50
a. Situation sur le marché européen	50
b. Mesures européennes	51
c. Projets miniers	54
3. Création de nouvelles mines	55
4. Se passer de terres rares	56
a. Avec d'autres métaux	57
b. Avec moins de métaux	57
c. Avec d'autres technologies	57
5. Recycler	58
a. Les acteurs y trouvent leur compte	58
b. Des possibilités inégales	59
c. Nouvelle source d'approvisionnement	60
6. Discussion	61
DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION	63
1. Discussion générale	63
a. Limites de l'analyse et perspectives de recherche	63
b. Terres rares, répartition, usages et conflits	64
c. Terres Rares, Economie et Environnement	64
d. Terres rares et transition bas-carbone	65
e. Terres rares et avenir	66
2. Conclusions	66
Bibliographie	68

Table des illustrations

Liste des figures

– Figure 1 : Pistes possibles pour faire face aux risques de réduction (Stegen 2015, p. 4 schématisée par Thibaut Fraiteur).....	13
– Figure 2 : Répartition des usages des terres rares par secteur d'activité en 2012 (Source : ERECON 2014)	18
– Figure 3 : Répartition mondiale des principales réserves de terres rares (Source : USGS 2015, Chen 2010 ; Cartographie : Thibaut Fraiteur)	21
– Figure 4 : Production mondiale de terres rares de 1949 à 2009 (Source : Mancheri 2012)	22
– Figure 5 : Répartition des exportations des terres rares chinoises entre pays importateurs (Source : China Internet Information Center 2012).....	24
– Figure 6 : Schéma de la production minière à Mountain Pass (Molycorp 1999 cité par Tetra Tech 2001)	27
– Figure 7 : Quotas d'exportation des terres rares, comparées à la production chinoise (Sources : Garvin 2013, USGS 2015)	31
– Figure 8 : Évolution des prix de terres rares choisies entre 2008 et 2010 (Source : Ting & Seaman 2013, p. 237)	32
– Figure 9 : Système d'évolution des prix des terres rares (Thibaut Fraiteur)	33
– Figure 10 : Répartition mondiale des projets d'exploitation minière de terres rares (Source : Technology Metals Research 2015, Cartographie : Thibaut Fraiteur).....	38
– Figure 11 : Cartographie de la problématique autour des terres rares	40
– Figure 12 : Répartition de l'usage final des terres rares (Source : USGS 2015).....	44
– Figure 13 : Chaîne de production type de produits à base de terres rares (Martin 2010).....	45
– Figure 14 : Répartition de la consommation de terres rares au sein de l'UE en 2014 (Source : Machacek & Kalvig 2016)	51

Liste des tableaux

– Tableau 1 : Terres rares et abondances naturelles (Sources : CNUCED 2014, p. 3 ; USGS 2014, p. 1).....	16
– Tableau 2 : Exemple d'utilisation des terres rares (Source : EPA 2012, Lynas Corp, Mancheri 2012)	17
– Tableau 3 : Projets de mines avancés selon le TMR Advanced Rare-Earth projects (Technology Metals Research 2015)	48

-
- **Tableau 4 :** Exemple d'application des terres rares dans le DoD américain (Source : Martin 2010 ; Lockheed Martin 2016, GDBIW 2016, General Dynamics Land System 2016) 49
 - **Tableau 5 :** Exemple de projets de recherche dans le cadre de la RMI portant sur les aimants (Source : CORDIS 2015) 53
 - **Tableau 6 :** Liste de projets de mines de terres rares en Europe (Source : Technology Metals Research 2015, ERECON 2015) 54

Acronymes

- **CORDIS** *Community Research and Development Information Service* - Service communautaire d'information sur la recherche et le développement
- **CNUCED** Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement
- **DoE** *Department of Energy* – Département de l'Énergie des États-Unis (ministère)
- **DoD** *Department of Defence* – Département de la Défense des États-Unis (ministère)
- **GAO** *U.S. Government Accountability Office*
- **GATT** *General Agreement on Tariffs and Trade* : Accord Général sur les Tarifs et le Commerce
- **EPA** *United States Environmental Protection Agency* : Agence de la protection environnementale des États-Unis
- **ERECON** *European Rare Earth Competency Network* : Réseau européen de Compétence sur les Terres rares
- **NdFeB** Alliage de néodyme, de fer et de bore
- **OMC** Organisation Mondiale du Commerce
- **REE** *Rare Earth Elements* : Terres Rares sous forme élémentaire
- **REO** *Rare Earth Oxide* : Oxyde de terre rare
- **RMI** *Raw Materials Initiative* – Initiative sur les matières premières
- **SmCo** Alliage de samarium et de cobalt
- **USGS** *United States Geological Survey*

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Introduction

Aujourd'hui, de nombreuses technologies et processus industriels utilisent des ressources minérales. Parmi celles-ci se trouvent 17 métaux, les terres rares (REE). Leurs propriétés physiques en font des matières premières de choix, utilisées dans de nombreuses applications.

En 2012, les États-Unis et l'Union européenne, principaux consommateurs mondiaux de terres rares, ont déposé une plainte auprès de l'OMC à l'encontre de la Chine, premier producteur, dont ils estimaient que les politiques d'exportation de REE étaient contraires aux règles du commerce international.

Cet événement a rendu publique la question de notre dépendance à ces métaux, et du conflit qui existe, encore aujourd'hui, autour des inégalités d'accès à ces ressources. Il n'est cependant qu'un élément d'une problématique plus vaste, héritage (prévisible ?) d'une histoire qui commença au milieu du siècle passé, et dont ce travail se propose d'étudier certaines des conséquences qu'elle a actuellement. Les enjeux sont nombreux, imbriqués, parfois contradictoires. Ils pèsent sur l'avenir de notre économie en général et pourraient remettre en cause la transition de nos économies vers un modèle durable et pauvre en carbone.

Les liens qui existent entre terres rares et environnement sont multiples. Leur exploitation, leurs transformations et leurs utilisations peuvent avoir un impact tantôt positif, lorsqu'ils servent à produire ou à économiser de l'énergie, tantôt négatifs, lorsque leur exploitation et leur transformation détruisent les paysages ou polluent les sols, sur notre milieu. Elles seront cependant amenées à jouer un rôle important dans la mutation de nos sociétés dans le cadre de la lutte contre le changement climatique.

Aujourd'hui, les principaux consommateurs craignent une rupture de l'approvisionnement, depuis que la Chine est passée du rang de premier producteur mondial de terres rares à celui de premier consommateur, grâce aux politiques qu'elle a menées pour favoriser le développement d'une industrie domestique de la transformation de ces métaux en produits à haute valeur ajoutée. Cela s'est fait aux dépens des pays importateurs. Faisant face à une difficulté croissante à s'approvisionner en terres rares, ils se sont orientés vers d'autres stratégies. Ce sont elles qui seront l'objet de cette recherche.

Notre travail se propose d'étudier les moyens mis en œuvre par les acteurs du secteur des terres rares pour faire face aux risques récents de pénuries d'approvisionnement pour ces métaux afin de répondre aux enjeux liés au développement du secteur des « technologies vertes », à travers une démarche interdisciplinaire.

Nous proposons donc ici d'analyser ces stratégies à l'aune des connaissances que nous apportent les sciences strictes sur ces questions, mais également d'étudier l'histoire récente de la production et de la transformation des REE pour fournir un regard critique complémentaire sur ces stratégies. Nous utiliserons pour ce faire la

théorie de « l'acteur réseau », proposée par Bruno Latour. Celle-ci présente l'avantage définir l'acteur de telle manière qu'elle permet d'intégrer dans son analyse le rôle des objets « non humain » dans sa démarche, ce qui nous paraît particulièrement approprié pour notre cas.

2. Méthodologie

Nous allons ici produire une analyse critique des stratégies d'adaptation au sein des pays importateurs de terres rares suite aux diminutions des exportations au niveau mondial, et aux risques de pénuries qui pèsent sur l'approvisionnement. Face à l'étendue de la question, au nombre important de sources portant sur ce thème et à la variété des acteurs et des secteurs liés par ces éléments chimiques, nous préciserons l'angle avec lequel ce sujet sera abordé, et le cadre du travail.

a. Démarche générale

Nous proposons, ici, une approche interdisciplinaire. Effectivement, si la question des échanges de terres rares concerne le commerce international, les enjeux de développement et les stratégies d'adaptation qui y sont liés portent sur des aspects technologiques. C'est pourquoi nous aborderons la problématique sous l'angle des sciences sociales, mais également d'un point de vue technique, économique, ou encore légal.

Nous donnerons une place toute spécifique, dans ses analyses, au « non humain » dans les rapports politiques et sociétaux, dans la mesure ces objets ne sont pas seulement des « déterminants » ou des « toiles de fond pour l'action humaine », mais qu'ils « peuvent autoriser, permettre, encourager, suggérer, influencer, bloquer, rendre possible, interdire, etc. ». (Latour 2005, p. 72, traduction personnelle). Ils peuvent donc être des « acteurs » dans la mesure où ils amènent d'autres protagonistes à agir. Il s'agira dès lors de prendre en considération tant les caractéristiques techniques dans les affaires de relations internationales, que les connaissances scientifiques des protagonistes concernés (Barry 2013). Nous pouvons donc appliquer cette conception à la problématique des terres rares, puisqu'elle nous permettra d'aborder notre problématique sous plusieurs angles.

b. Contextualisation

Une partie significative du travail consistera à replacer notre problématique dans son contexte. Si le cœur de ce document porte sur les trajectoires d'adaptation choisies au sein des pays importateurs de terres rares et leur analyse, nous devons resituer ces décisions dans un cadre plus large. Elles s'inscrivent en effet dans une longue chaîne de causalités, dans laquelle sont impliqués de nombreux protagonistes.

La chronologie des faits nourrira également notre analyse, puisqu'elle nous permettra de mieux comprendre les protagonistes et d'anticiper les freins, oppositions ou les facteurs favorables aux dispositifs choisis par les acteurs pour palier le risque de rupture de l'approvisionnement.

L'événement autour duquel tournera notre analyse est la réclamation déposée conjointement par le Japon, les États-Unis et l'Union européenne auprès de l'OMC, à l'encontre des quotas d'exportation de terres rares de la Chine, et pour lesquels les plaignants ont obtenu gain de cause. Cette affaire sera considérée comme un moment charnière, révélateur des rapports de force et des relations d'échange au niveau international, et comme l'un des éléments concomitants aux stratégies d'adaptation. C'est également une transposition des problèmes relatifs aux terres rares, qui portent publiquement la controverse au sein d'une organisation internationale.

En outre, il nous permettra également de mettre en lumière la chronologie récente des évolutions dans le domaine de la production et de l'approvisionnement en terres rares, ainsi que la cartographie de la problématique, c'est-à-dire le positionnement des acteurs les uns par rapport aux autres au cours du temps.

c. Cadre d'analyse

Vu l'échelle du problème, notre analyse se cantonnera à un nombre restreint d'acteurs. Notre choix s'est porté sur des zones géographiques ayant un rôle prépondérant dans l'approvisionnement et l'utilisation de terres rares à l'échelle mondiale. Bien que nous reviendrons de manière plus large sur la répartition spatiale des producteurs et des consommateurs de terres rares, nous pouvons d'ores et déjà mentionner ici nos trois grands territoires :

- **La Chine**, pour son rôle d'exportateur et sa situation quasi monopolistique.
- **Les États-Unis**, pour leur ancienne position de leader de la production mondiale, pour leur dépendance aux exportations chinoises, et pour le cas de la mine de *Mountain Pass*.
- **L'Union européenne**, pour sa dépendance totale aux importations et ses projets d'exploitation.

Néanmoins, ces régions ne peuvent pas d'emblée être considérées comme des acteurs en elles-mêmes. Les états qui en assurent la gestion ne peuvent pas être pris pour seuls protagonistes. En effet, les flux de matière entre elles et en leur sein sont orientés, captés ou influencés par de nombreuses entités, qu'il s'agira de nommer durant l'étude du contexte et l'analyse des trajectoires.

Comme nous le verrons également par la suite, les terres rares sont utilisées dans de nombreux secteurs économiques, parfois fortement stratégiques (comme dans le cas de l'armement). Néanmoins, comme précisée dans la question de recherche, notre analyse ne portera pas sur l'ensemble de ces applications. Nous nous axerons principalement sur l'aspect « environnemental » du problème sera étudié, à travers le secteur des « technologies vertes » ; nous définirons ce terme plus précisément par la suite (voir point 3.c). Néanmoins, aborder ces technologies dans leur ensemble dépasse le cadre de notre travail. Dès lors, nous parlerons essentiellement du cas de la production d'énergies renouvelables (principalement éoliennes) et des véhicules électriques ou hybrides pour illustrer notre analyse.

En choisissant de nous focaliser ces technologies en particulier, nous restreignons également les métaux concernés par notre investigation. Néanmoins, nous avons acquis la conviction, à travers nos lectures, que nous

ne pouvons aborder les enjeux des terres rares dans le cadre du développement des technologies vertes à travers des cas plus spécifiques. Nous posons dès lors l'hypothèse que, dans notre cas, bien qu'il existe des spécificités propres à chaque technologie et aux métaux qui y sont associés, elles partagent toutes de grands enjeux communs, et que ce sont eux qui nous intéressent.

Les stratégies possibles que nous étudierons se répartissent selon le schéma présenté dans la Figure 1 ci-dessous.

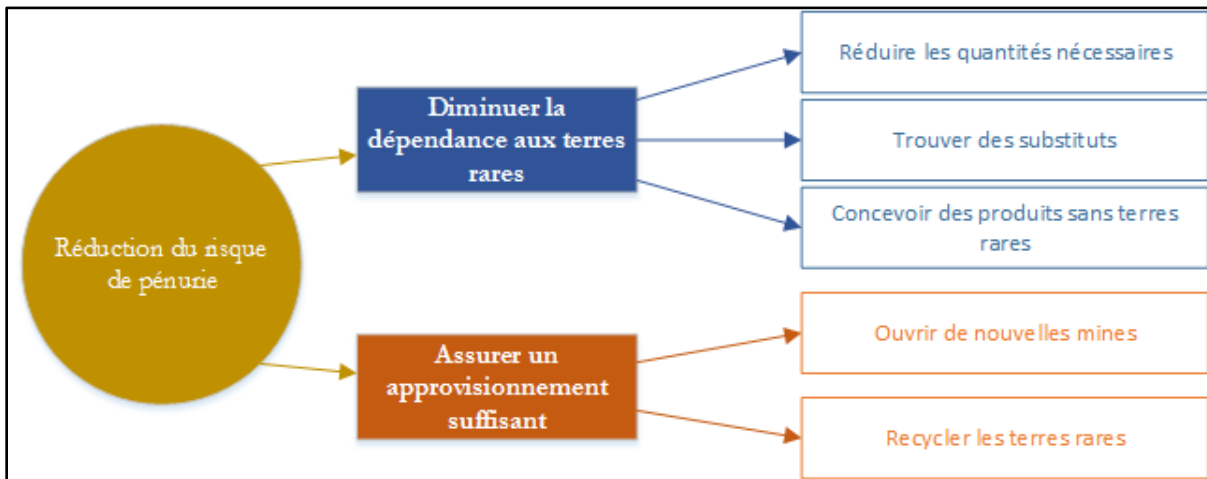


Figure 1 : Pistes possibles pour faire face aux risques de réduction (Stegen 2015, p. 4 schématisé par Thibaut Fraiteur)

Face à un risque d'offre trop faible par rapport à la demande, dans le futur, deux grandes orientations sont possibles. La première consiste à réduire la demande, selon trois manières différentes : réduire les quantités de terres rares nécessaires, trouver des matériaux pouvant les substituer dans les produits (sans en changer la conception), ou modifier ceux-ci de manière à ce que leur conception ne nécessite plus aucun de ces métaux. La seconde voie consiste à augmenter l'offre, de manière à ce que l'approvisionnement soit assuré. Dans ce cas, deux possibilités s'offrent à nous : l'ouverture de nouveaux sites de production de REE, et le recyclage des métaux présents dans des produits en fin de vie (Stegen 2015, p. 4-6).

d. Sources

Comme nous l'avons précédemment expliqué, nous allons aborder le sujet sous différents aspects et en fournir une analyse. Nous aurons principalement deux grands types de sources.

D'une part, nous allons avoir recours à de la documentation émise par les différents acteurs que nous rencontrerons tout au long de notre travail, de manière à identifier leurs choix et à fournir une sorte d'analyse discursive (p. ex. rapports, sites internet, textes de loi, etc.)

D'autre part, l'analyse que nous produirons s'appuiera sur de la littérature scientifique et sur des données émises par des instituts de recherche. Nous en tirerons une série d'informations :

- **Des données chiffrées** : nous les utiliserons de manière à objectiver la situation. Dans le cas des terres rares, celles-ci sont à prendre avec énormément de précautions, dans la mesure où il s'agit d'informations sensibles qui peuvent être sujettes à manipulation, ou incomplètes. Il est parfois difficile de connaître la signification exacte des chiffres : les volumes peuvent être exprimés en REO ou en REE.
- **Des revues de la littérature** : elles nous fourniront des points de vue larges, essentiellement pour décrire le contexte de notre problématique.
- **Des analyses issues de publications *peer-reviewed*** : elles viendront compléter notre travail pour tenter de produire une analyse aussi complète que possible.

Il s'agira de faire une mise en commun de ces publications et d'en croiser les analyses. De cette manière, nous cherchons à fournir une large revue de la littérature sur le sujet tout au long du travail. Notre démarche est donc essentiellement bibliographique.

PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS

1. Nature et propriétés des métaux.

Les « terres rares » désignent un groupe d'éléments métalliques composé des lanthanides (15 métaux), auxquels s'ajoutent le Scandium et l'Yttrium, présentés dans le tableau 1. Ce groupe se divise en deux catégories : les terres rares légères et les terres rares lourdes (CNUCED 2014, p. 3), selon leur numéro atomique ; les éléments considérés comme « lourds » ayant un numéro atomique supérieur à 64.

Ces métaux, regroupés pour la plupart au bas du tableau périodique des éléments, présentent la particularité d'avoir des configurations électroniques (responsables de leurs réactivités chimiques) très proches. Les électrons qui entourent le noyau d'un atome s'organisent en couches, qui peuvent accueillir un nombre variable d'électrons. La périphérie de ce nuage détermine la réactivité chimique de l'élément. Si dans la plupart des cas, les électrons remplissent progressivement les différentes couches, ce n'est pas le cas pour les terres rares. Effectivement, l'orbitale la plus extérieure (de type « s »), peut accueillir deux électrons, alors que celle située juste en dessous (de type « d » ou « f », selon les atomes), peut en accueillir bien plus. Or, la stabilité de celles-ci dépend de leur taux de remplissage : elle est maximale lorsque l'orbitale est pleine. Dès lors, les électrons préfèrent remplir en priorité la couche « s » la plus périphérique, laissant les orbitales inférieures incomplètes. C'est cela qui explique les similarités de propriétés chimiques, du fait de la présence systématique de cette orbitale « s » remplie pour chacun de ces éléments, ainsi que leur grande capacité à céder et à accepter des électrons dans leurs orbitales « d » ou « f » sans que cela n'influe significativement sur la stabilité du nuage électronique (McQuarrie et al. 1992).

Ce sont ces propriétés physico-chimiques qui ont donné à ces éléments le qualificatif de « rare », du fait de la difficulté de les isoler sous forme pure, surtout dans le passé (mais encore de nos jours malgré l'amélioration des techniques) (CNUCED 2014, p. 4 ; Stegen 2015, p. 3). Leurs configurations électroniques en ont également fait des matériaux de base de composants électroniques (Mancheri 2012, p. 462).

Cet adjectif « rare » n'est cependant pas justifié dès lors que l'abondance de ces métaux dans la croûte terrestre est prise en compte. Le Tableau 1 ci-dessous reprend ces informations pour la plupart des terres rares. En comparant ces données à celles de l'or (0,0004 ppm), de l'argent (0,075 ppm), du plomb (14 ppm) et du cuivre (60 ppm), on constate effectivement leur présence importante (USGS 2014, p. 1). Néanmoins, les stocks économiquement et techniquement exploitables ne représentent qu'une faible partie des quantités présentes sur terre, comme nous le verrons dans le point suivant.

Tableau 1 : Terres rares et abondances naturelles (Sources : CNUCED 2014, p. 3 ; USGS 2014, p. 1)

	Numéro atomique	Nom	Symbole	Abondance dans la croûte terrestre (ppm)
Terres rares légères	57	Lanthane	La	39
	58	Cérium	Ce	66,5
	59	Praséodyme	Pr	9,2
	60	Néodyme	Nd	N/A
	61	Prométhium	Pm	N/A
	62	Samarium	Sm	7,05
	63	Europium	Eu	2,0
Terres rares lourdes	64	Gadolinium	Gd	6,2
	65	Terbium	Tb	1,2
	66	Dysprosium	Dy	5,2
	67	Holmium	Ho	1,3
	68	Erbium	Er	3,5
	69	Thulium	Tm	0,52
	70	Ytterbium	Yb	3,2
	71	Lutécium	Lu	0,8
	39	Yttrium	Y	N/A
	21	Scandium	Sc	33

Bien que les métaux lourds soient présents dans de nombreux minéraux, la production mondiale repose essentiellement sur deux sources :

- La **monazite**, un phosphate.
- La **bastnaésite**, un fluorocarbonate.

Toutes deux contiennent environ 70% d'oxyde de terres rares, principalement du cérium, du lanthane, du praséodyme et du néodyme. Celles-ci sont régulièrement associées à d'autres éléments. Ainsi, les terres rares sont souvent un sous-produit de la production d'autres matériaux ; c'est le cas de la mine de Bayan Obo en Chine, initialement exploitée pour le fer qu'elle contient (Campbell 2014). La monazite peut contenir entre 4% et 12% de thorium, ainsi que de l'uranium, pouvant rendre son exploitation dangereuse (Jordens et al. 2013, p. 99-100). Bien que les REO y soient exploitées ensemble, leurs proportions peuvent varier d'un gisement à l'autre (Campbell 2014).

Quoique les terres rares soient présentes dans près de 250 minéraux différents et qu'elles soient présentes en grandes quantités dans la croûte terrestre, leurs concentrations sont souvent insuffisantes pour être commercialement exploitables ; la quantité de métaux présents n'est pas suffisamment importante pour que le coût d'exploitation dépasse la valeur de la matière extraite, si bien que les activités n'y sont pas rentables (Jordens et al. 2013, p. 97).

2. Usage des terres rares

Les terres rares furent exploitées pour la première fois au 19^e siècle en Suède, où elles servaient à la fabrication de manchons pour les lampes incandescentes (Gavin 2013, p. 255). Deux siècles plus tard, leur champ d'application s'est grandement élargi. Il peut être partagé en deux catégories (ERECON 2015, p. 20) : d'une part, elles peuvent être utilisées dans des étapes de processus industriels, sans pour autant être incluses dans des produits finaux. C'est par exemple le cas dans certains procédés chimiques, parmi lesquels le craquage du pétrole, ou dans le polissage de certains verres. D'autre part, elles peuvent se retrouver incluses dans les composants d'un produit final ; il s'agit de produits à haute valeur ajoutée (Mancheri 2012, p. 460). C'est le cas lorsqu'elles sont utilisées dans des batteries, des turbines d'éolienne, ou encore des écrans LCD ou des appareillages électroniques. Elles y sont cependant présentes en quantité relativement faible.

Elles peuvent ainsi être considérées comme des « épices technologiques », comme le suggèrent Ming Hwa Ting et John Seaman (2013, p. 236) : « Les épices sont utilisées avec parcimonie en cuisine, contrairement aux ingrédients courants comme la viande ou les pommes de terres ».

Le Tableau 2 ci-dessous reprend, pour l'ensemble des terres rares, quelques usages à titre illustratif. La Figure 2 présente l'estimation de la répartition du volume mondiale de terres rares par secteur d'usage.

Tableau 2 : Exemple d'utilisation des terres rares (Source : EPA 2012, Lynas Corp, Mancheri 2012)

Nom	Exemples d'application
Lanthane	Batteries, catalyseurs pour le raffinage du pétrole, appareils photo et caméras, systèmes de communication.
Cérium	Catalyseurs, polissage, alliages métalliques
Praséodyme	Aimants (amélioration de la résistance à la corrosion), pigments, filtres photographiques
Néodyme	Aimants pour ordinateurs, lasers, catalyseurs pour le craquage, moteurs électriques
Prométhium	Sources de rayonnement bêta, catalyseurs pour le craquage
Samarium	Aimants à haute température, systèmes de guidage et de contrôle
Europium	Écrans LCD, éclairages fluorescents, additifs pour les verres, systèmes de visée et de contrôle d'armement militaire.
Gadolinium	Agents de contraste pour en IRM, catalyseurs pour craquage
Terbium	Systèmes de guidage, systèmes de visée et d'armement militaires
Dysprosium	Aimants à forte puissance, lasers, moteurs électriques
Holmium	Aimants les plus puissants connus
Erbium	Lasers, colorant de verre
Thulium	Aimants puissants
Ytterbium	Fibres optiques, panneaux solaires, alliages
Lutécium	Rayons X
Yttrium	Céramiques, alliages métalliques, communication micro-onde pour l'industrie des satellites, écrans d'ordinateur, senseurs de température.
Scandium	Alliage pour l'industrie aéronautique

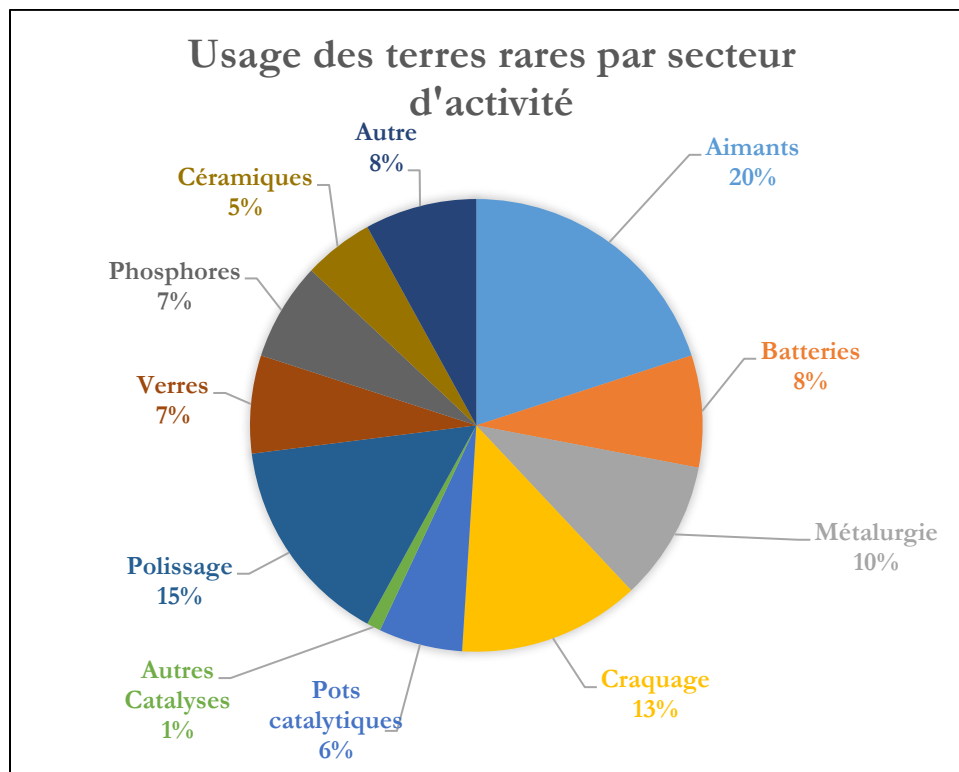


Figure 2 : Répartition des usages des terres rares par secteur d'activité en 2012 (Source : ERECON 2014)

Ce tableau, non exhaustif, montre la variété des secteurs ayant recours à ces métaux à l'heure actuelle. Parmi ceux-ci, deux méritent d'être soulignés. Tout d'abord, les usages militaires ; dans un rapport de 2012, l'Agence pour la Protection de l'Environnement américaine, l'EPA, signalait que près de la moitié de ces métaux (8 sur 17) étaient utilisés dans des équipements du Département de la Défense des États-Unis.

Ensuite, les terres rares ont aussi de nombreuses applications liées au secteur des technologies « vertes », qui sera défini, dans le cadre de notre travail, comme étant les trois types de technologie suivante :

- La production d'énergie renouvelable éolienne et photovoltaïque.
- Les véhicules 100% électriques (muni uniquement d'une batterie ou d'une pile à combustible) et hybrides.
- L'éclairage basse-consommation.

Ce choix de définition se base sur la littérature traitant du sujet (entre autres EPA 2012, p. 6-7 ; CNUCED 2014 p. 25-26 ; DOE 2011 p. 14 ; ERECON 2014, p. 14) ; ces applications sont régulièrement mentionnées lorsque les technologies « vertes » ou « propres » sont évoquées. Il est intéressant de souligner que ces usages sont aussi mis en avant sur les sites d'entreprises de production de terres rares. C'est le cas de *Lyans Corp.*, *Greenland Mineral*

and Energy LTD. ou encore *Namibia Rare Earth Inc.* D'un autre côté, ces mêmes entreprises se montrent beaucoup plus discrètes concernant des usages non pacifiques dont nous avons précédemment parlé.

Ces secteurs jouent un rôle important dans le contexte des questions environnementales actuelles, entre autres dans le cadre de la transition énergétique, des réductions d'émission de CO₂ et du développement durable, de manière plus générale. Ils sont actuellement en croissance et donc la demande en terres rares devrait continuer à augmenter à l'avenir.

C'est le cas des énergies éoliennes. Ce secteur est en effet lié aux terres rares du fait de sa consommation importante en aimants permanents. Il en existe principalement de deux types. D'une part, les aimants NdFeB¹, qui sont les plus forts qui existent à l'heure actuelle ; il n'existe aucune technologie qui les surpasse. (ERECON 2015). D'autre part, les aimants SmCo², moins puissants. Ces derniers présentent néanmoins la particularité de ne pas perdre leur pouvoir magnétique lorsque leur chaleur augmente, ce qui en fait des composants intéressants pour des applications de niche, tels que l'armement. De plus, ils ont la particularité d'être fragiles, ce qui en limite la taille, et ce qui empêche leur intégration dans certaines applications (Stegen 2015).

Bien qu'ils ne soient pas présents dans l'ensemble des éoliennes installées ou en vente sur le marché, les aimants NdFeB présentent différents avantages pour ces technologies :

- Ils permettent un gain d'efficacité de 20%, ce qui se traduit par une diminution des coûts d'installation (pour une puissance donnée) et par un retour sur investissement plus rapide.
- Du fait de leur puissance, ils permettent de miniaturiser la technologie. En effet, ils produisent un champ magnétique plus intense dans un espace plus restreint. Les éoliennes peuvent donc être plus petites et plus légères, ce qui implique une économie de matériaux pour l'ensemble de la structure.
- Le mécanisme des technologies utilisant des aimants permanents utilise moins de parties mobiles, ce qui en augmente l'efficacité, mais également la fiabilité, ce qui est intéressant pour les parcs *off-shore* où les entretiens sont moins aisés à réaliser.

Ces aimants contiennent également d'autres terres rares en plus faibles quantités : du dysprosium, dont la teneur peut s'élever jusqu'à 11% (ERECON 2014), mais également du gadolinium ou du terbium (Moss et al. 2013). Une éolienne peut ainsi contenir plusieurs centaines de kilos de terres rares.

À l'avenir, la demande mondiale en terres rares est amenée à augmenter au cours du temps. Ainsi, une étude menée par la *Curtin University* et IMCOA (cité par ERECON 2014) qu'en 2017, elle sera 20% plus élevée qu'en 2014, et 50% plus élevée en 2020, dépassant ainsi les 200 kt de REE. Le secteur éolien y sera pour quelque chose. Il connaît actuellement une croissance importante (avec un taux de 22% en 2014, essentiellement grâce

¹ Un alliage fait de néodyme, de fer et de bore.

² Un alliage fait de samarium et de cobalt.

à la Chine, responsable d'un peu moins de la moitié de la puissance installée dans le monde cette année-là), soutenue par les différents cadres législatifs à travers le monde (entre autres grâce aux mesures prises pour lutter contre le réchauffement climatique) (GWEC 2016). Selon le *Global Wind Energy Council*, la puissance installée entre 2015 et 2020 passera d'un peu plus de 400 GW à 1TW. De plus, la proportion de terres rares dans ces nouvelles installations devrait être de 20% durant cette même période, et montera jusqu'à 25% dans la décennie suivante.

L'industrie de la production d'énergie n'est pas la seule à profiter des propriétés intéressantes des aimants permanents. Ils sont, pour les mêmes raisons que dans le cas des éoliennes, présents dans les moteurs des véhicules électriques et hybrides. Ces technologies tirent profit des mêmes avantages qu'apportent les aimants NdFeB, essentiellement la réduction de la taille et du poids. Mais ces véhicules nécessitent également des terres rares pour la confection de leurs batteries. Leur nombre est amené à augmenter à l'avenir. Néanmoins, leur influence sur la demande dépendra des technologies choisies, puisque tous les composants qui existent à l'heure actuelle sur le marché ne consomment pas les mêmes quantités de matières premières (ou n'en contiennent pas du tout). Ces choix seront influencés par une série de facteurs : sécurité, réglementations, préférences des acheteurs, performance, coût (ERECON 2015, Stegen 2015, Widmer et. al 2015).

La production d'aimants NdFeB permanents reste cependant fortement localisée en Asie. En 2013, la Chine produisant 75% de la masse totale fabriquée dans le monde, suivie par le Japon (22%) (Humphries 2013). L'Europe assure également une petite part de la production (ERECON 2015).

À l'heure actuelle, il est estimé que la production de ces technologies vertes avoisine 20% de la demande mondiale (Mancheri 2012).

3. Réserve et production des terres rares

a. Réserves mondiales

Il est difficile de trouver une valeur précise concernant les réserves mondiales de terres rares, ou pays par pays. En effet, les enjeux industriels, économiques et stratégiques étant relativement importants, comme nous le verrons par la suite, il est compliqué de vérifier les déclarations des différents acteurs. Les chiffres présentés ici doivent donc être considérés avec beaucoup de précautions.

L'*US Geological Survey*, source régulièrement citée dans la littérature, estimait en 2012 que les réserves de base mondiales étaient de 110 Mt d'oxydes de terres rares. Cette estimation est assez proche de celles formulées depuis les années 90 par cette même institution, mais elle a été revue à la hausse en 2015, à hauteur de 130 Mt (USGS 2012 et 2014).

Ces chiffres sont à prendre avec beaucoup de précautions. Nous ne disposons pas à l'heure actuelle d'autres données. Bien que quelques auteurs et organismes citent ces mêmes informations (par exemple Blakely et al.

2012, p. 3 ; CNUCED 2014, p. 6), nous notons que beaucoup d'auteurs abordent plutôt les chiffres de production annuelle. D'autres donnent un ordre de grandeur, comme l'ERECON : « Les réserves disponibles dépassent la production mondiale par trois ordres de grandeur » (ERECON 2015, p. 16, traduction personnelle).

Selon le même rapport de l'USGS, la majeure partie de ces réserves³ se partageraient entre un nombre restreint d'acteur. En 2012, la répartition était environ la suivante :

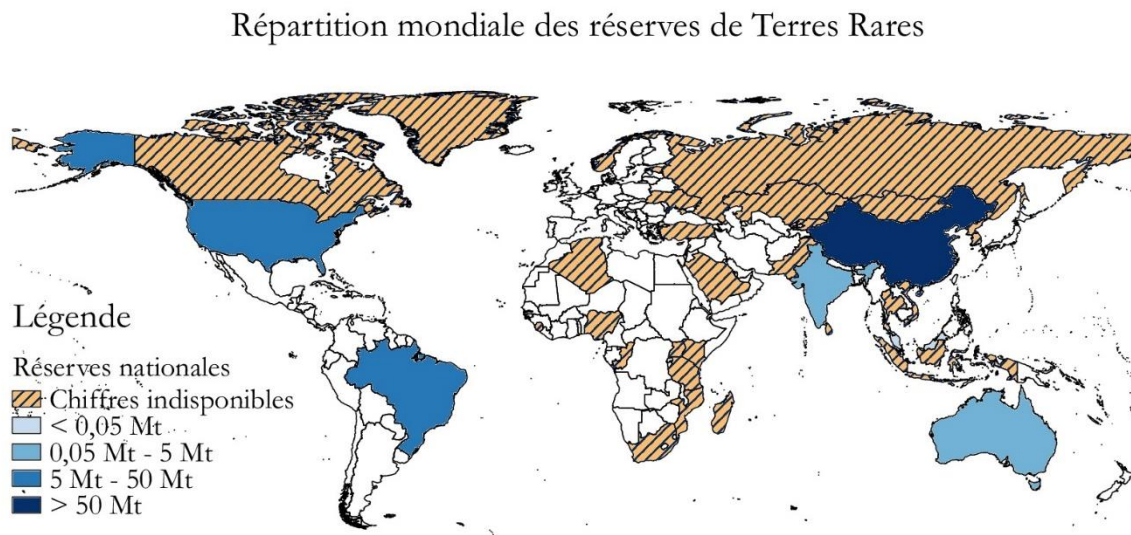


Figure 3 : Répartition mondiale des principales réserves de terres rares (Source : USGS 2015, Chen 2010 ; Cartographie : Thibaut Fraiteur)⁴

Cette carte nous indique qu'il existe 34 pays dans le monde, répartis sur tous les continents, qui disposent de réserves de terres rares. Selon l'USGS, en 2015, ces réserves représenteraient environ 130 Mt. Les principales réserves se retrouveraient en Chine, qui en détiendrait un peu plus de 44% (avec 55 Mt). Les autorités chinoises réfutent cependant ces chiffres. En effet, une note datant de 2012 émanant du Bureau de l'Information du Conseil d'État de la République Populaire de Chine avance le chiffre d'environ 23%.⁵ Une autre publication indique que ces réserves s'élèveraient au moins à 25 MT, soit une proportion comparable à celle avancée par les autorités chinoises.

³ Ce terme doit ici être compris comme défini par l'USGS : « *Reserves may be considered a working inventory of mining companies' supply of an economically extractable mineral commodity* » (USGS 2014, p. 191)

⁴ Les chiffres sont exprimés en Mt d'oxydes de terres rares.

⁵ Notons que le document cité ne mentionne à aucun moment de chiffres absolus pour les réserves, et n'en donne aucune définition. Il est dès lors difficile de comparer ce chiffre à d'autres données.

b. Production mondiale

La situation est cependant beaucoup plus claire concernant la production annuelle mondiale de terres rares. La Figure 4 ci-dessous montre l'évolution de la production mondiale, ainsi que les productions chinoises, américaines et du reste du monde.

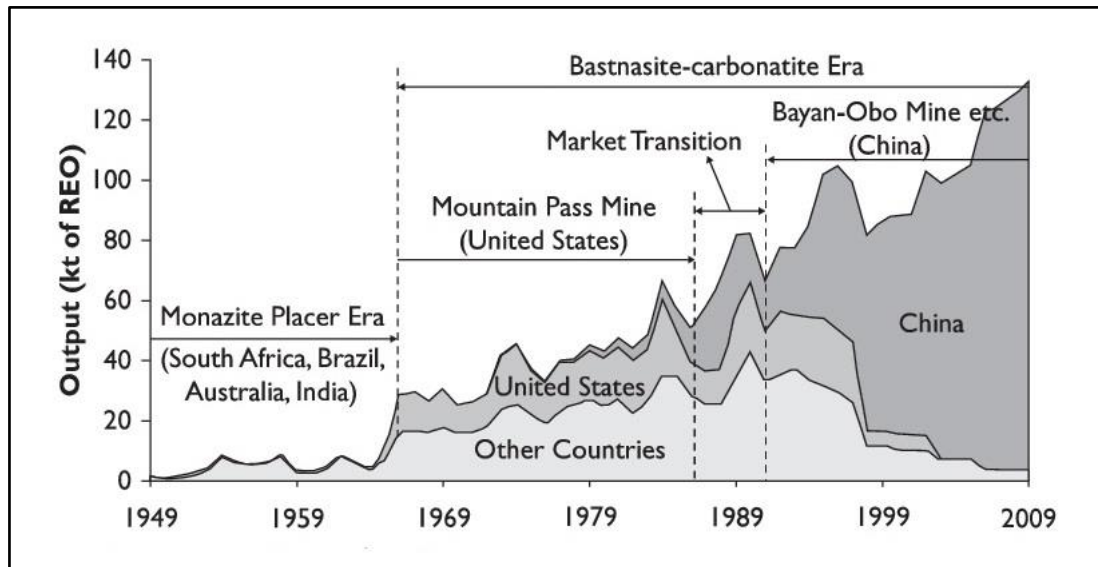


Figure 4 : Production mondiale de terres rares de 1949 à 2009 (Source : Mancheri 2012)

Le graphique montre la situation de domination de la Chine, qui a acquis dès la fin des années 90, une position de quasi-monopole. Auparavant, de 1966 à 1984, la place de leader était occupée par les États-Unis, qui produisaient environ deux tiers de ressources, essentiellement grâce à sa mine de *Mountain Pass*, en Californie (CNUCED 2014, p. 10). La production chinoise a, quant à elle, commencé dans les années 80, et a surpassé celle de son rival américain en 1988, comme nous le verrons par la suite.

De nouveau selon l'USGS (2016), la production mondiale de terres rares est de 124 kt. Ce chiffre est à mettre en comparaison avec les réserves estimées pour cette même année, que nous avons présentées au début de ce paragraphe (130 Mt). Ces chiffres confirmeraient l'affirmation de l'ERECON selon lequel les réserves dépasseraient la production de trois ordres de grandeur.

Nous pouvons aussi signaler ici que l'essentiel des terres rares consommées à travers le monde provient d'exploitations minières. En effet, le taux de recyclage des terres rares est très faible ; on avance le chiffre de 1% (CNUCED 2014, p. 20 ; Campbell 2014, p. 24). De surcroît, en 2010, la Commission européenne reconnaissait qu'il n'existait pas de procédés de recyclage économiquement viables pour ces métaux à l'heure actuelle. Ce faible taux pourrait s'expliquer par l'absence d'incitation économique à développer ces techniques, du fait du manque de compétitivité de ces méthodes vis-à-vis des exploitations minières, mais la question du recyclage sera abordée plus en détail dans la troisième partie du travail.

c. Impacts environnementaux liés à l'exploitation

L'exploitation des terres rares engendre une série de problèmes environnementaux, qu'il nous paraît important de mentionner ici. Un cas plus spécifique est présenté dans le point 1 de la seconde partie du document.

Tout d'abord, la création et le fonctionnement d'une mine, de manière générale, s'accompagnent d'une série d'impacts, subis par les habitants, la faune et la flore locales. Lors de l'installation, le terrain est défriché, ce qui entraîne une disparition de la faune et de la flore, ainsi qu'une déforestation dans certains cas, qui peut se traduire par une modification de l'écoulement des eaux, entraînant des risques d'inondation. L'exploitation du site s'accompagne aussi d'émissions de poussières, nocives pour la santé des travailleurs et des riverains. L'extraction de métaux nécessite également de grandes quantités d'eau. Le pompage intensif peut se traduire par un assèchement, parfois critique, des nappes phréatiques ou des rivières (Bihouix & de Guillebon 2010, p. 67-71).

Il y a également des problématiques spécifiquement liées aux terres rares. Tout d'abord, il existe un risque lié à la présence de thorium dans certains minerais (comme la monazite, que nous avons citée précédemment). Cet élément radioactif peut contaminer l'eau et les sols. De plus, la séparation et la purification des REO nécessitent d'avoir recours à des produits toxiques (tels que des acides forts, dans le cas des terres rares lourdes). Les déchets ainsi produits doivent donc être gérés de manière adéquate pour éviter toute contamination des milieux (Campbell 2014, p. 22).

d. Exportations chinoises

La Figure 5 ci-dessous montre la répartition des exportations chinoises entre pays importateurs.

Bien que ces données aient pu évoluer durant ces 5 dernières années, elles permettent de mettre en évidence les zones géographiques dépendantes des terres rares, vu la position monopolistique de la Chine. Le nombre de pays concernés est ici restreint. Le Japon est le principal importateur, puisqu'il captait en 2011 plus de la moitié des exportations. Les États-Unis et l'Union européenne (principalement la France, l'Italie, l'Allemagne et les Pays-Bas) sont à un même niveau, avec environ un sixième des exportations. Puis viennent Hong Kong et le reste du monde (China Internet Information Center 2012).

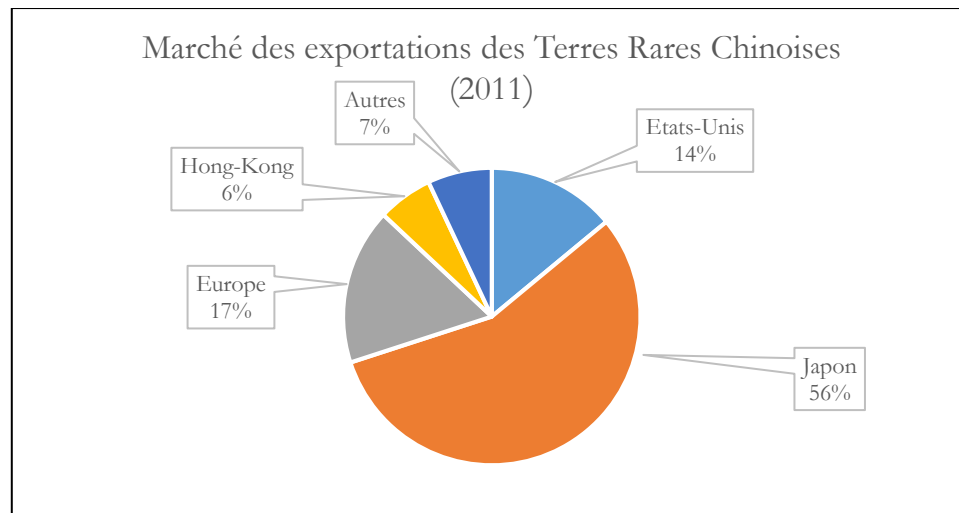


Figure 5 : Répartition des exportations des terres rares chinoises entre pays importateurs (Source : China Internet Information Center 2012).

4. Discussion : Introduction à la problématique

Dans cette partie du travail, nous avons mis en avant une série de points caractéristiques des terres rares, de leurs usages et de leur exploitation, qui peuvent paraître paradoxaux.

Ce sont des métaux abondants sur terre, mais pour lesquels il existe peu de gisements économiquement exploitables. Leurs configurations électroniques leur confèrent des propriétés intéressantes pour une série d'applications technologiques, mais elles les rendent difficiles à isoler et à les purifier. Elles sont très utilisées dans le développement des « technologies vertes », mais leur exploitation présente de grands risques pour l'environnement.

De plus, bien que de nombreux pays disposent de réserves, la Chine, après avoir pris l'avantage sur les États-Unis, en assure désormais presque à elle seule la production mondiale, et exporte vers un nombre restreint de pays.

Comme nous le verrons par la suite, la Chine a depuis longtemps mené une gestion planifiée de ses ressources minières. Après en avoir encouragé le développement, l'État y contrôle depuis 2006 la production, l'exploitation et l'utilisation globale (China Internet Information Center 2012), afin de consolider son marché intérieur de la production et de la transformation en matières premières ou en produits finis, ainsi que de contrôler les prix (Morisson & Tang 2012). Pour ce faire, elle a mis en place une série de mesures législatives visant à assurer la mainmise de l'état sur la gestion des ressources, entre autres à travers un système de quotas à l'exportation qui a amené la Chine à réduire progressivement ses échanges avec l'étranger. Ces restrictions ont atteint un point charnière en 2010, lorsque les spéculations sur des risques de rupture de l'approvisionnement ont amené les vendeurs de terres rares et les entreprises de transformation à stocker les métaux, créant ainsi une bulle spéculative (Morisson & Tang 2012, p. 23 ; ERECON 2015 p. 15). L'augmentation des prix et le monopole

chinois ont amené les importateurs à développer des stratégies pour varier leurs sources d'approvisionnement en terres rares, devenus des métaux critiques. Leurs craintes face à l'amenuisement des exportations chinoises se sont traduites, le 13 mars 2012, par le dépôt d'une plainte conjointe auprès de l'OMC par les États-Unis, l'Union européenne et le Japon contre les quotas d'exportation chinois. Au terme de la procédure, les plaignants ont obtenu gain de cause, l'Organisation mondiale du Commerce ayant reconnu l'irrégularité des pratiques chinoises au regard du Protocole d'accession de la Chine. (OMC 2014)

La suite du travail est consacrée à une explication plus approfondie des changements qui se sont produits durant la seconde moitié du 20^e siècle et jusqu'à aujourd'hui autour de la question des terres rares, de manière à mettre en avant les différents enjeux et acteurs qui interagissent autour de cette question, pour en arriver aux trajectoires d'adaptation prises au sein des pays importateurs.

DEUXIÈME PARTIE : PROBLÉMATIQUE

1. L'ère *Mountain Pass*

a. La domination américaine

Comme nous l'avons vu précédemment, les États-Unis ont dominé la production mondiale de terres rares durant plusieurs décennies, entre 1965 et 1995. Si la production de REO dans le pays remonte à 1885 (Castor 2008, p. 337), c'est à cette époque qu'elle prend son essor : les mines américaines fournissent alors les deux tiers de la production mondiale (CNUCED 2014, p. 10).

Durant cette période, c'est la mine de *Mountain Pass*, en Californie, qui assure la majeure partie de l'approvisionnement. Un gisement de terres rares y fût découvert en 1949, lors d'opération de prospection d'uranium (Molycorp 2015). Il est exploité par l'entreprise *Molycorp*. Il s'agit d'un dépôt de bastnaésite, contenant de fortes concentrations de REE. Son exploitation à échelle industrielle eut à l'époque une grande importance, puisqu'elle permit un approvisionnement à bas coût et en grandes quantités de métaux, ouvrant ainsi la porte à de nouvelles applications (Hedrick 1997, p. 472).

Des terres rares sont également extraites des sables de *Green Cove Spring*, en Floride, entre 1952 et 1993, par *RGC Minerals Ltd.*, une filiale de l'entreprise australienne *Renison Goldfields Consolidated Ltd.* (Hedrick 1994).

b. Fermeture de *Mountain Pass*

L'hégémonie américaine ne dura cependant pas. En effet, le fonctionnement de la mine et des opérations de séparation de *Mountain Pass*, schématisé dans la Figure 6 ci-dessous, générait de grandes quantités d'eau salée, contenant du thorium et de l'uranium, qui, au sortir des installations de précipitation du lanthane, était acheminées vers un bassin d'évaporation.

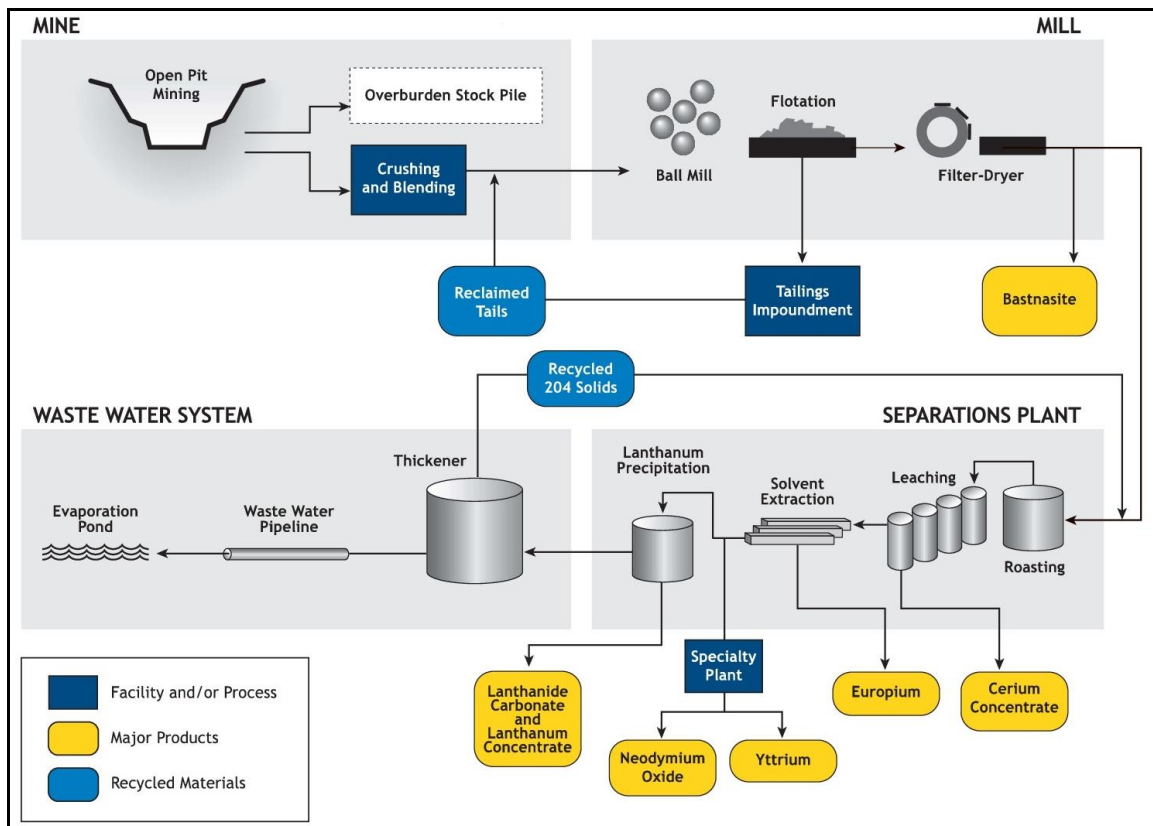


Figure 6 : Schéma de la production minière à Mountain Pass (Molycorp 1999 cité par Tetra Tech 2001)

Les opérations au sein de l'installation sont séparées en 4 parties distinctes : (Tetra Tech 2001, p. 1-3)

- **La mine** (*mine*) : la roche y est extraite et broyée.
- **Le broyeur** (*mill*) : les roches broyées sont réduites en particules de plus petite taille. La bastnaésite est ensuite séparée des autres minéraux par flottaison, filtrée et séchée.
- **L'installation de séparation** (*separation plant*) :
 - La bastnaésite concentrée y est tout d'abord chauffée (*roasting*)
 - Les lanthanides sont ensuite dissouts dans une solution d'acide et un concentré de cérium est obtenu par lixiviation (*leaching*).
 - Une extraction complémentaire est réalisée par la suite pour récupérer l'europium, l'yttrium et de l'oxyde de néodyme (*solvent extraction*).
 - Le lanthane est ensuite récupéré par précipitation (*lanthanum precipitation*).
- **Le système des eaux usées** (*waste water system*) : les eaux usées sont d'abord concentrées (*thickener*) puis acheminées vers un bassin d'évaporation. Lorsqu'elles fonctionnaient à plein régime, les installations produisaient un peu moins de 200 m³ d'eaux usées par heure (Morisson & Tang 2012, p. 3).

Cependant, ce pipeline long d'environ 11 miles (18 km) a explosé plusieurs fois durant les années 90, lors d'opérations de maintenance, déversant les eaux radioactives dans le désert. *Molycorp* fut contraint à de nombreuses reprises de nettoyer les dégâts engendrés par ces incidents (Morisson & Tang 2012, p. 3).

À partir de 1995, l'augmentation des normes environnementales en Californie et les restrictions de plus en plus fortes menèrent l'État californien à refuser de plus en plus de licences minières. Or, en 2002, la mine rencontra des problèmes de stockage de déchet, et ses demandes de permis d'expansion lui furent. De surcroît, l'émergence de terres rares chinoises sur le marché international, moins chères, força *Molycorp* à mettre fin à l'exploitation de *Mountain Pass* (Gavin 2013, p. 256 ; Campbell 2014, p. 22 ; Morisson & Tang 2012, p. 3) ; l'usine de séparation ferma ses portes en 1998 et les activités d'extraction cessèrent en 2002 (Castor 2008, p. 338).

c. *Molycorp* et l'Asie

En 2005, la *China National Offshore Oil Corporation* (CNOOC), détenue par l'État chinois, a cherché à acquérir *Unocal Corporation* (UCL), une entreprise pétrolière et gazière dont *Molycorp* était devenue une filiale, et qui était dès lors propriétaire de la mine de *Mountain Pass*. Elle dut cependant se rétracter suite à la vive opposition que cette offre d'achat suscita auprès des leaders politiques américains qui voyaient d'un mauvais œil que du pétrole de l'Oncle Sam se retrouve aux mains de l'État chinois. Bien que cela ne fût pas exprimé publiquement par l'acheteur, il se peut que le gouvernement chinois n'ait pas été intéressé que par les ressources en énergies fossiles de la compagnie américaine, mais qu'il ait également cherché à mettre la main sur la mine de terres rares de l'entreprise (Morisson & Tang 2012). C'est finalement *Chevron* qui racheta, UCL la même année.

Trois ans plus tard, *Molycorp Minerals LLC*, une compagnie privée, racheta *Mountain Pass* à *Chevron* pour y relancer l'exploitation des réserves de minerais et du gisement (nous reviendrons sur cet épisode plus tard dans le texte). Elle acquiert *Neo Material Technologies* en 2012. Il s'agit d'une entreprise leader dans la transformation de terres rares en poudre pour la fabrication d'aimant, qui détient des installations en Thaïlande et Chine. Elle est issue d'une fusion qui eut lieu en 1995 entre *AMR Technologies, Inc.* (une entreprise Canadienne) et *Magnequench*, une entreprise dont l'un des actionnaires était la *China National Non-Ferrous Metals Import & Export Corp.*, une compagnie détenue par l'État chinois, et qui attribuait, dans les années 80, des licences d'exportation de terres rares. L'entreprise détenait à l'époque une usine dans l'Indiana, qui fût fermée en 2002 et dont les activités furent délocalisées en Asie, et entre autres dans l'usine de Tianjin (au sud-est de Pékin), construite deux ans plus tôt. Dès lors, *Molycorp* exporte sa production vers la Chine, aux dépens de l'économie américaine (Morisson & Tang 2012, *Molycorp* 2015).

Molycorp s'était également associé à *Daido Steel & Mitsubishi Corporation* pour fonder *Intermetallics Japan*, une entreprise de production d'aimants permanents à base de néodyme, de fer et de bore (aimants NeFeB), très utilisés, entre autres, pour la production d'éoliennes et de véhicules hybrides ou électriques. Les installations de production, installées au Japon, à *Nagatsugawa*, devaient commencer leur production en 2012. En 2015,

cependant, *Molycorp* a vendu les 30% de part de l'entreprise qu'elle détenait, de même que *Mitsubishi*, pour les vendre à *Daido*, qui est ainsi devenu propriétaire à 100% de l'entreprise.

Nous reviendrons plus en détail sur les évolutions récentes au sein de l'entreprise *Molycorp* dans la troisième partie du travail.

2. L'ère Bayan-Obo : Le monopole de la production chinoise

a. Introduction

L'histoire de la production chinoise de terres rares est plus longue et plus complexe que celle des États-Unis. Le gouvernement utilisa en effet cette ressource à des fins stratégiques et de développement, de la même manière que le pétrole fût utilisé par les pays du Moyen-Orient ; en 1992, Den Xiaping, alors leader chinois, déclara d'ailleurs : « Il y a du pétrole au Moyen-Orient, il y a des terres rares en Chine » (He 2014, p. 240).

La Chine doit son rôle de leader mondial de la production grâce à trois facteurs principaux : sa dotation en ressources (aujourd'hui estimées par le gouvernement chinois à 25 Mt, comme nous l'avons vu), le coût faible de son travail assurant une forte compétitivité de ses mines, ainsi qu'une main-d'œuvre qualifiée dans ce domaine.

b. Les débuts de la production chinoise

L'histoire de la production des terres rares en Chine a largement été influencée par l'état chinois, à travers des mécanismes législatifs et de régulation. En effet, elle fût planifiée de longue date (Mancheri 2012), dans une optique de développer la croissance économique (He 2014, p. 240).

Durant les années 70, la Chine passa d'une économie planifiée à une économie de marché. C'est à cette période qu'elle commença à exporter des terres rares vers l'étranger, poursuivant ainsi deux objectifs : acquérir des devises étrangères, et nouer des liens avec les pays occidentaux ; jusqu'en 2004, plus de 70% des terres rares chinoises étaient exportées (He 2014, Mancheri 2012).

La stratégie de développement poursuivie reposait sur les institutions locales. Celles-ci avaient pour mission de mettre sous pression les leaders régionaux pour qu'ils développent leurs économies, de manière à mettre ceux-ci en compétition ; l'attribution de promotions au sein du parti reposait sur les performances des responsables en poste. Certaines régions parmi les plus reculées, telles que la Mongolie-Intérieure (où se trouve la principale mine chinoise, celle de Bayan-Obo), disposant de peu de leviers d'action, se sont alors orientées vers l'exploitation de leurs ressources naturelles et ont soutenu l'implantation d'entreprises minières locales. Cette expansion s'explique également par l'absence de protection de la propriété intellectuelle dans le pays, qui permit aux compagnies privées d'utiliser les procédés de séparation issus de la recherche et du développement des entreprises gérées par l'état, à travers du transfert de personnel, mieux payé dans le privé. Le développement de

l'industrie minière compétitive de la Chine lui permet de prendre le pas sur les États-Unis dans les années 90 (He 2014).

c. L'instauration des régulations

La situation chinoise à la fin du 20^e siècle est caractérisée par un manque de régulation du marché chinois, ainsi que d'une surcapacité de production (Mancheri 2012, Ting & Seaman 2013). C'est également à cette époque que la valeur stratégique des terres rares est mise en avant par le gouvernement central pour le développement de son économie.

Dès 1999, une série de systèmes de régulation fut instaurée par l'état pour faire face aux problèmes de surconsommation des ressources naturelles, causées par une production excessive, par la contrebande et les activités minières clandestines (Mancheri 2012, He 2014). Par la suite, en 2003, ces mesures s'élargirent pour faire également face aux problèmes environnementaux croissants, causés par les exploitants, peu soucieux de leurs impacts sur les populations locales, dont les coûts furent internalisés par le gouvernement : l'état a forcé ainsi les entreprises minières à assumer les dépenses de réhabilitation des milieux naturels. Il a également pris le contrôle des grandes industries minières, de manière à disposer de leviers de contrôle sur l'industrie de la transformation (He 2014).

Néanmoins, l'objectif principal poursuivi par l'état chinois était de développer son industrie nationale de transformation des terres rares en produits à haute valeur ajoutée. En conséquence de quoi, dès les années 2000, la demande en terres rares augmenta en Chine, pour passer d'environ 1% de la production nationale en 1988 à près de 60% en 2008 (Mancheri 2012, p. 440).

La panoplie de mesures prises peut se résumer en deux catégories.

Tout d'abord, il y a les quotas de production et d'exportation : l'état alloue la possibilité à certaines entreprises de produire et/ou d'exporter certaines quantités de métaux. Ces mesures ont eu pour effet de maintenir la production à des niveaux permettant d'assurer une certaine pérennité à l'industrie minière chinoise d'une part (Mancheri 2012), et d'autre part d'assurer la compétitivité du pays sur le marché international, en maintenant une offre suffisante pour garder les prix assez bas, tout en assurant un approvisionnement peu cher du marché national, soutenant le développement d'industries de transformation des métaux en produits à haute valeur ajoutée (He 2014, Ting & Seaman 2013, Gavin 2013). De plus, le système d'allocation de quotas d'exploitation et d'exportation a mené à la fermeture de nombreuses exploitations ne respectant pas les nouvelles normes environnementales. L'évolution de ces quotas au cours du temps comparés à la production nationale est reprise dans la Figure 7 ci-dessous.

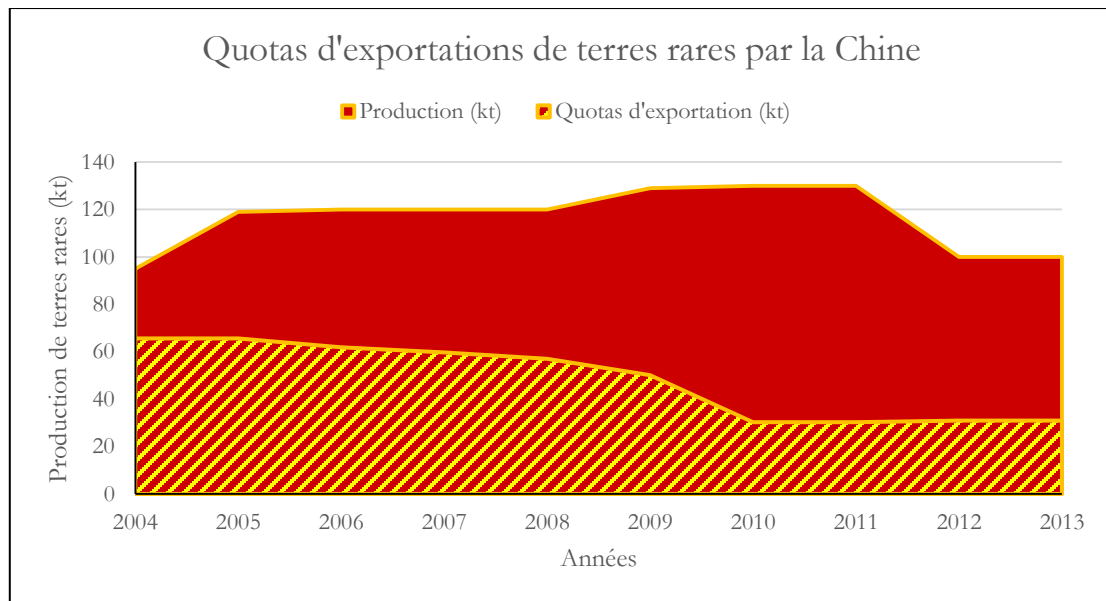


Figure 7 : Quotas d'exportation des terres rares, comparées à la production chinoise (Sources : Garvin 2013, USGS 2015)

D'autre part, il existe de droits d'exportation sur les terres rares. Ces taxes, qui équivalaient à entre 15 et 25% du prix des matières, ainsi que les quotas, visent à augmenter les prix des matières premières à l'étranger, et de créer une distorsion entre le marché intérieur chinois et le reste du monde. Cela participe une fois de plus, avec les quotas, à soutenir le développement de l'industrie chinoise, mais également à encourager la relocalisation d'industries étrangères en Chine, pour qu'elles puissent contribuer à la croissance locale et la création d'emplois. Néanmoins, ces politiques pourraient avoir un impact à long terme sur les entreprises minières chinoises : empêchées de vendre librement leur production sur le marché international, elles pourraient voir leurs revenus et leurs investissements réduits, ce qui pourrait nuire à l'avantage chinois au niveau international (Gavin 2013).

Durant les années 2000, la croissance de la production chinoise a été soutenue par le développement des technologies vertes, ainsi que la production de matériel électronique, ainsi que par des investissements passifs. De plus, le système de taxation avantageux et les quotas ont permis à la Chine de devenir le premier producteur mondial d'aimants permanents ; elle est presque exclusivement la seule à en produire, alors que 90% des aimants permanents dans le monde provenaient des États-Unis, du Japon et d'Europe dans les années 90 (Mancheri 2012, p. 453).

Comme le montre la Figure 7, les quotas d'exportation chinois ont diminué au cours du temps. La plus forte baisse a été enregistrée entre 2008 et 2010, où ils sont passés en deux ans de 56,939 kt (47% de la production nationale) à 30,258 kt (23% de la production nationale). Cette baisse soudaine s'est traduite par une augmentation spectaculaire de la plupart des prix des terres rares, tel qu'on peut le voir dans la Figure 8.

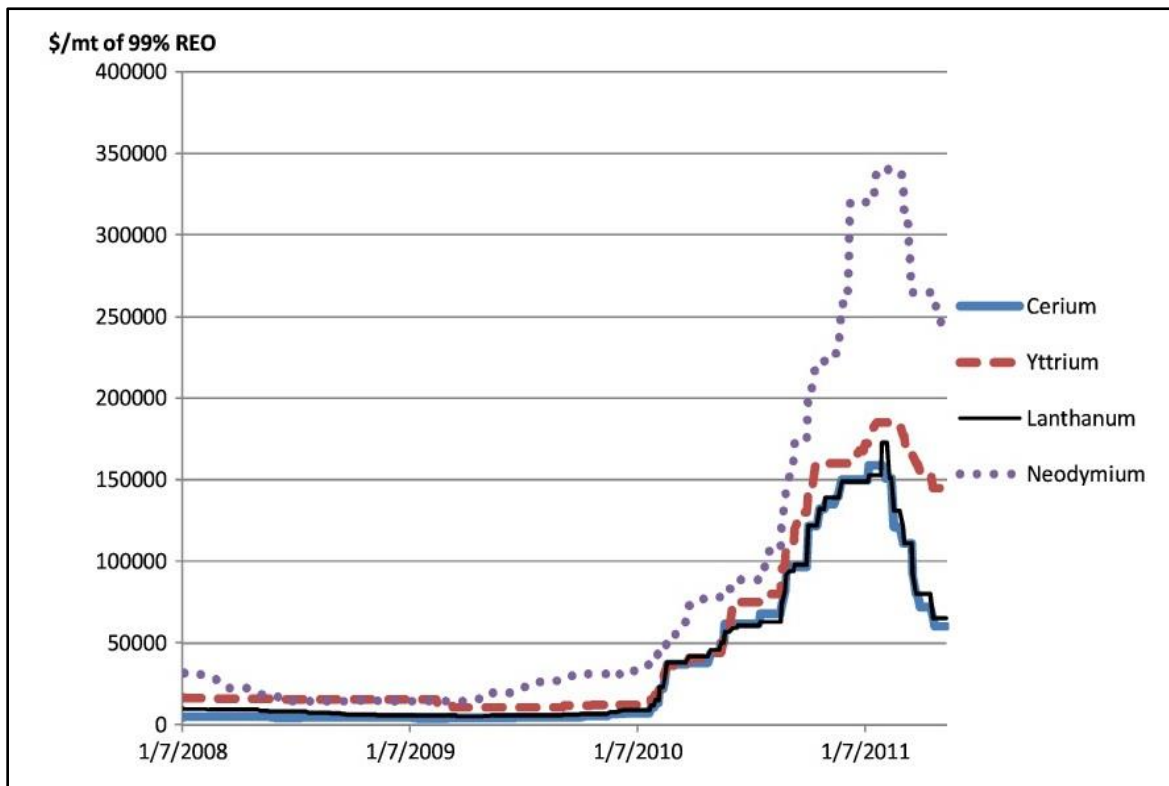


Figure 8 : Évolution des prix de terres rares choisies entre 2008 et 2010 (Source : Ting & Seaman 2013, p. 237)

Selon Garry Campbell (2014, p. 26-27), le prix des terres rares est influencé par différents facteurs de production. Tout d'abord, elles servent de matière première à la fabrication de marchandises, et leur prix d'achat représente une part relativement faible du prix de ces objets. Ainsi, à court terme et dans la mesure où les variations restent raisonnables, le prix des terres rares a peu d'influence sur la demande. Ensuite, comme nous l'avons expliqué, les REE sont produites conjointement. Dès lors, leur extraction, et donc l'offre sur le marché de chacune de ces matières, peut être influencée par la demande d'un autre, et mener à des sur- ou sous-production. Dans le même ordre d'idée, elles peuvent être aussi exploitées parallèlement à d'autres métaux. Ainsi, dans la mine de Bayan Obo, en Mongolie-Intérieure, les terres rares sont des sous-produits de la production de fer. La demande pour le principal métal peut donc avoir une influence sur la quantité de REE commercialement exploitables, ou exploitées. Enfin, la relation entre l'offre et la demande est relativement inélastique à court terme, puisque la création de nouvelles sources d'approvisionnement peut prendre beaucoup de temps et d'investissement (Ting & Seaman 2013, p. 237).

Ces caractéristiques permettent d'expliquer l'augmentation drastique des prix qui s'est produite à partir de 2010 ;

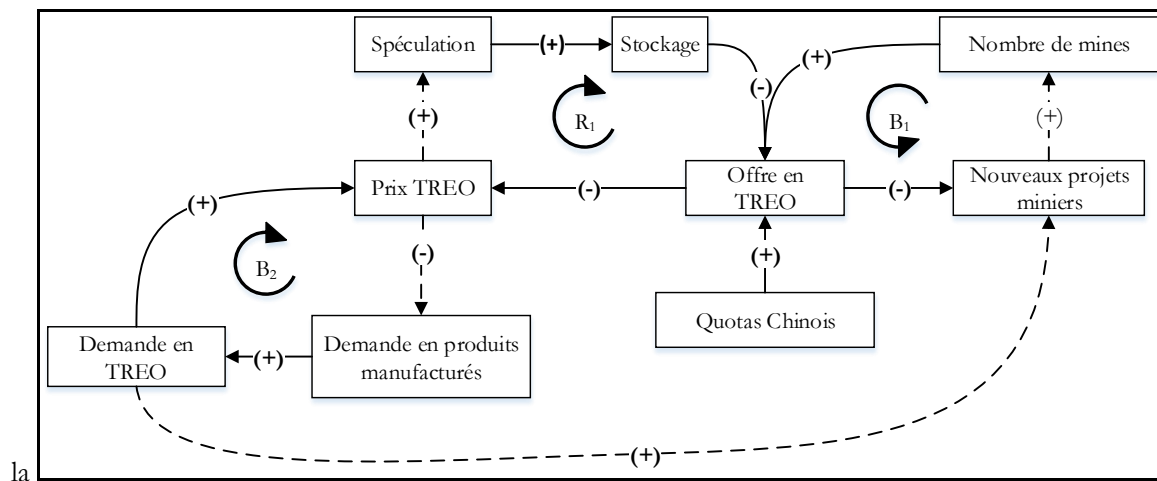


Figure 9 ci-dessous décrit la manière dont elles interagissent entre elles, sous forme d'un schéma de boucle.⁶

La diminution subite des quotas d'exportation imposés par la Chine a fortement diminué l'offre en terres rares sur les marchés internationaux. Cela a eu pour effet une augmentation des prix, qui s'est traduite par un stockage des métaux, à la fois par spéculation, mais également pour faire face aux incertitudes sur l'approvisionnement. Ce projet, organisé par le ministère chinois de la Terre et des Ressources, qui persiste à l'heure actuelle, a permis de constituer des réserves dont le volume s'élèverait à 100.000 t d'oxydes de terres rares. Cela a également participé à la flambée des prix (comme décrit par la boucle R₁), du fait de la création d'une bulle spéculative (He 214, p. 248 ; Mancheri 2012, p. 248 ; Campbell 2014, p. 26). Les importateurs disposant de très peu de marge de manœuvre pour trouver de nouvelles sources d'approvisionnement à court terme (du fait de la très faible inélasticité entre l'offre et la demande, du fait des délais importants nécessaires au développement de projets miniers), les prix ont continué à augmenter (Ting & Seaman 2013). Ce n'est que lorsque ceux-ci sont arrivés à un niveau suffisamment élevé que la demande a diminué, diminution également liée au ralentissement de l'économie mondiale (Campbell 2014).

Exprimé selon les boucles du système, nous pouvons comprendre que la diminution des quotas chinois a activé la boucle de renforcement R₁. Un délai a été nécessaire pour que l'augmentation des prix influe sur la demande et que la boucle d'équilibrage B₂ en enrayer l'envolée. Néanmoins, la période de temps écoulée n'était pas suffisante pour que la boucle B₁ puisse contrebalancer le système à court terme. Il est à noter que le schéma ne reprend pas les effets liés à la crise économique, ayant une influence sur les produits manufacturés.

⁶ Les schémas de boucle se lisent de la manière suivante : chaque case représente un paramètre ; les flèches représentent une relation directe entre deux variables ; un trait en pointillé signifie que la relation est retardée dans le temps ; un signe (+) à côté d'une flèche indique une relation positive (les deux variables évoluent dans le même sens) ; un signe (-) à côté d'une flèche indique une relation négative (les deux variables évoluent dans des sens opposés) ; les flèches « B » (*balance*) symbolisent les boucles d'équilibrage du système ; les flèches « R » (*reinforcement*) symbolisent les boucles de renforcement du système.

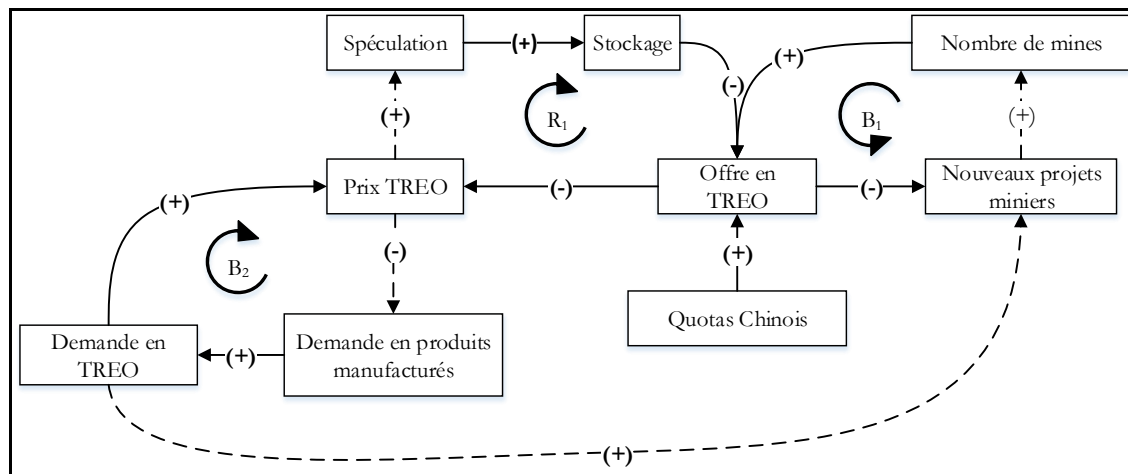


Figure 9 : Système d'évolution des prix des terres rares (Thibaut Fraiteur)

d. Les terres rares comme arme diplomatique : l'exemple Sino-Japonais

Parallèlement à ces enjeux commerciaux et de développement, nous pouvons décrire brièvement la manière dont les terres rares sont également un enjeu de sécurité et de diplomatie en Asie, à travers le cas des relations entre la Chine et le Japon.

Comme nous l'avons vu, le Japon est un grand importateur de terres rares produites en Chine. Néanmoins, en septembre 2010, la Chine a suspendu ses exportations nippones, parallèlement aux mesures de restriction liées aux quotas d'exportation, que nous avons précédemment mentionnées. Évoquant des actions non coordonnées entre différentes entreprises minières, les autorités de Pékin se sont défendues de toute manipulation. Ces restrictions faisaient cependant suite à un conflit maritime autour des îles Senkaku/Diaoyu⁷, dans les eaux desquelles un capitaine de bateau de pêche chinois percuta deux bateaux de garde-côtes et fût détenu durant 7 jours, détention qui amena les autorités chinoises à prendre des mesures administratives empêchant le chargement de cargaisons de terres rares vers le Japon, diminuant les exportations de 75% (Ting & Seaman 2013, p. 234-235 ; Blakely et al. 2012, p. 8).

Incertains face aux exportations chinoises, les Japonais se sont tournés vers de nouvelles sources d'approvisionnement, moins conventionnelles que l'exploitation de ressources terrestres, qui ont fait l'objet de recherches, parmi lesquelles l'exploitation des fonds marins, notamment autour des îles de *Minamitorishima* et *Okimotorishima*. Le gouvernement japonais y a autorisé l'érection de digues, officiellement pour éviter tout problème d'érosion. Néanmoins, ces constructions pourraient être les prémices à l'installation de ports pour

⁷ Situés en mer de Chine Orientale et sous contrôle japonais (qui les nomme *Senkaku*), ces territoires sont revendiqués par la République Populaire de Chine (qui les nomme *Diaoyu*).

l'exploitation de fonds marins, ainsi qu'à la création d'une Zone économique exclusive japonaise dans ces eaux. La Chine ne l'entend cependant pas de cette oreille. Elle considère en effet que ces îles sont des rochers. Or, selon l'alinéa 3 de l'article 121 de la Convention des Nations Unies pour le Droit de la Mer (1982), « les rochers qui ne se prêtent pas à l'habitation humaine ou à une vie propre n'ont pas de zone économique exclusive ni de plateau continental ». De plus, elle a également des vues sur ces possibles ressources (Ting & Seaman 2013, p. 247). Ces ressources en terres rares sont donc, dans ce cas, source conflit potentiel entre les deux pays.

3. Plaintes auprès de l'Organisation mondiale du Commerce

a. Introduction

Les mesures de restriction sur la production et l'exportation, ainsi que les quotas d'exportation, que nous avons précédemment abordés, ont amené les pays importateurs de terres rares à déposer une plainte auprès de l'Organisation mondiale du Commerce. Ainsi, le 13 mars 2012, les États-Unis, le Japon et l'Union européenne, qui représentent, à eux seuls, 87% des importations de terres rares chinoises en 2011 (China Internet Information Center, 2012 ; OMC 2014), estimant que la Chine violait les règles du commerce international, et ont demandé l'annulation de ces différentes mesures.

Ce n'est cependant pas la première fois que la Chine est visée par une plainte concernant ses politiques de commerce international, puisqu'une plainte similaire fut déposée en 2009, concernant d'autres matières premières.

b. Règles de l'OMC relatives aux mesures de restriction d'exportations

En devenant membre de l'OMC en 2001, la Chine s'est soumise à un « protocole d'accès », dans lequel a été mentionné, dans l'article 11, que la Chine ferait en sorte que « les redevances ou impositions douanières appliquées ou administrées par les autorités nationales ou infranationales soient conformes au GATT⁸ de 1994 » (OMC 2001).

Or, différents articles de cet accord portent sur le type de mesures mises en œuvre par les autorités chinoises sur le commerce international de terres rares, à savoir.

- **L'article VIII** où il est stipulé que les taxes en lien avec les importations et exportations « doivent être à la hauteur du service rendu et ne peuvent pas représenter une protection indirecte de produits domestiques ou à une taxation d'importation ou d'exportation à des fins fiscales ».
- **L'article XI** qui interdit toute forme de restriction sur les exportations et importations entre membres de l'OMC

⁸ Le GATT est l'Accord général sur les tarifs et le Commerce (*General Agreement on Tariffs and Trade*)

Il est également inscrit, dans l'article X.3.a du GATT, que les mesures prises par les pays signataires doivent être appliquées de manière « uniforme, impartiale et raisonnable ». (OMC 1994, traduction personnelle)

Des exceptions existent cependant à ces règles. Elles sont énoncées dans l'article XX. Dans le cas qui nous intéresse, celui-ci précise que l'accord ne pourra pas être appliqué pour aller à l'encontre de mesures « relatives à la conservation de ressources naturelles finies » ou « nécessaires à la protection de la vie ou de la santé humaine, animale ou végétale. Néanmoins, il est précisé d'une part que ces mesures ne doivent pas être « un moyen de discrimination arbitraire et injustifiable » entre pays membres de l'OMC, et que l'exception relative aux ressources finies ne s'applique que dans le cas où les « mesures sont mises en œuvre conjointement à des restrictions sur la production et la consommation » au sein du pays. (p. 37-38, traduction personnelle).

c. Plainte de 2009

Préalablement à la plainte relative aux terres rares, l'Union européenne et les États-Unis avaient déjà déposé une plainte auprès de l'OMC concernant des mesures prises sur les exportations de matières premières, comparables à celles appliquées pour les terres rares (bien qu'elles ne soient pas concernées dans ce cas), mais dont les conclusions sont intéressantes dans notre cas.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'une des motivations de la Chine à implémenter ce genre de restriction sur les exportations est de développer son marché intérieur de la production de produits à haute valeur ajoutée. Or, la 4^e partie du GATT, relative au développement économique, précise à l'alinéa 5 de l'article XXXVI que « l'expansion rapide des économies de pays moins développés au sein de parties sera facilitée par une diversification des structures de leurs économies » (p. 54, traduction personnelle). Cet argument, avancé dans la défense chinoise, a été réfuté par l'OMC, estimant que l'accord ne contenait aucune règle lui donnant le droit d'appliquer ces mesures (Gavin 2013, p. 259).

Les autorités chinoises ont également déclaré, dans leurs défenses, que leurs mesures étaient conformes aux exceptions mentionnées dans l'article XI, qui autorise qu'un pays membre de l'OMC puisse prendre ce type de mesures temporairement, pour faire face à une situation de pénurie de matières essentielles à l'économie du pays. Cet argument n'a pas été retenu lors de l'arbitrage, estimant que les quotas n'étaient pas temporaires et qu'ils ne portaient pas sur des marchandises répondant aux critères requis (Gavin 2013, p. 259).

Enfin, l'OMC a estimé que les échanges visés par les mesures chinoises ne pouvaient pas constituer une exception telle qu'autorisée par l'article XX dans la mesure où elles ne faisaient pas partie d'un cadre plus large de politiques visant à la conservation des ressources naturelles.

Un dernier argument enfin, d'ordre cette fois-ci plus juridique. Comme nous l'avons vu, l'article 11 du protocole d'accès de la Chine à l'OMC la contraint à supprimer ses mesures sur les exportations. L'article précise également que ces quotas ou taxes peuvent être maintenus « si ces taxes et impositions sont appliquées en conformité avec

les dispositions de l'article VIII du GATT de 1994 ». Il n'est ici fait aucunement mention de l'article XX et de ses exceptions environnementales. Dès lors, dans son jugement, l'OMC a estimé que la Chine ne pouvait pas invoquer cet article pour justifier ces mesures, donnant ainsi raison aux plaignants dans cette affaire.

d. Plainte de 2012

C'est cependant sur ce même article XX que les autorités chinoises ont principalement fait reposer leur défense (OMC 2014). En effet, bien qu'ils ne soient pas parvenus, dans la plainte de 2009 à prouver que leurs politiques de contrôle d'exportations avaient des objectifs environnementaux, ils avaient développé entre temps toute une série de mesures, précédemment citées, visant à diminuer globalement les impacts générés par les exploitations, la contrebande et les exploitations illégales. (OMC 2014b, p. B96-B97).

Néanmoins, le jugement rendu en 2014 ne diffère pas de celui rendu en 2009 : vu le protocole d'accèsion de la Chine à l'OMC, celle-ci ne peut invoquer les exceptions inscrites dans l'article XX du GATT de 1994.

Ainsi, ce sont les plaignants qui ont, à nouveau, obtenu gain de cause dans cette affaire. L'OMC a, dès lors, recommandé à la Chine de rendre ses mesures compatibles avec le GATT.

e. Conclusions

Les jugements rendus en 2009 et en 2014 à l'encontre des politiques protectionnistes chinoises présentent la caractéristique intéressante d'être relativement indépendant des situations « concrètes » sur lesquelles portent les plaintes. Si la Chine a voulu faire reposer ses arguments sur l'article XX et ses exceptions, c'est sur une question de droit qu'elle a été déboutée. Dans ses conclusions, l'OMC résout l'affaire en se basant sur une interprétation du protocole d'accès chinois qui implique une impossibilité pour les autorités du pays d'invoquer les exceptions prévues dans le GATT et qui permettrait de justifier ces quotas sur une base environnementale ou sanitaire.

La réitération des conclusions de la plainte de 2009 dans la plainte de 2014 peut laisser penser que jugement fera jurisprudence à l'OMC pour la Chine, du moins tant qu'elle n'aura pas réussi à en démontrer l'invalidité.

Il faut ici souligner que cette question de droit a été soulignée par les plaignants. Il apparaît ainsi que l'Union européenne, le Japon et les États-Unis ont attaqué le problème de manière plus fondamentale, s'assurant ainsi qu'à l'avenir, aucune dérogation ne sera accordée à la Chine au sein de l'OMC quant à l'instauration d'éventuelles politiques protectionnistes. Dès lors, cette plainte dépasse le contexte des terres rares.

4. Quelques évolutions récentes

La plainte auprès de l'Organisation mondiale du Commerce n'est pas la seule réaction qui a été suscitée par les politiques d'exportation de terres rares chinoises. En effet, plusieurs pays du monde se sont lancés à la recherche d'alternatives au monopole chinois. Les événements de 2010 ont été un véritable « *wake-up call* » pour ces pays

et leurs industries (Gavin 2013). Bien que nous analyserons certaines de ces stratégies plus en profondeur par la suite, nous pouvons ici mentionner les grandes évolutions au niveau international.

L'importance accordée par les grands pays importateurs de terres rares se marque par leur dépendance à celles-ci. Ainsi, la Commission européenne (European Commission 2014) et le Centre National pour l'étude des Politiques américains, le NCPA (Norman et al. 2014), ont chacun produit un rapport dans lesquels ils fournissent une analyse de criticité (« *criticality assessment* ») de ces métaux. Bien que les méthodes de travail des deux rapports diffèrent, l'Union européenne et les États-Unis tirent les mêmes conclusions de leurs travaux : le risque de rupture de l'approvisionnement pour certains de ces métaux est important, et les dangers qui y sont liés pourraient être dommageables à l'économie.

Pour réduire ce risque, les pays importateurs et leurs entreprises se sont tournés vers de nouvelles sources d'approvisionnement.

L'un des premiers effets de la politique chinoise a été la réouverture de la mine de *Mountain Pass*, où l'exploitation des stocks de minerais a repris en 2009, et les activités minières en décembre 2010. *Molycorp* y a fait d'importants investissements. Les réserves y sont estimées à 2 Mt de terres rares (principalement *LREE*). C'est également le cas de la mine de Steenkampskraal, en Afrique du Sud, détenue par GWM et *Ganzou Qiandong Rare Earth*, qui contiendrait cependant 100 fois moins de terres rares que la mine californienne) (Gavin 2013 ; Morrisson & Tang 2012).

Mais ce ne sont pas les seuls projets miniers menés dans ce sens à travers le monde. En effet, parmi la trentaine de pays détenant des réserves de terres rares, des exploitations seraient en développement. Le *TMR Advanced Rare-Earth Projects Index* en a répertorié 62 à travers le monde, dont la cartographie est reprise dans la Figure 10 ci-dessous ; les réserves de ces projets ont été regroupées par pays.

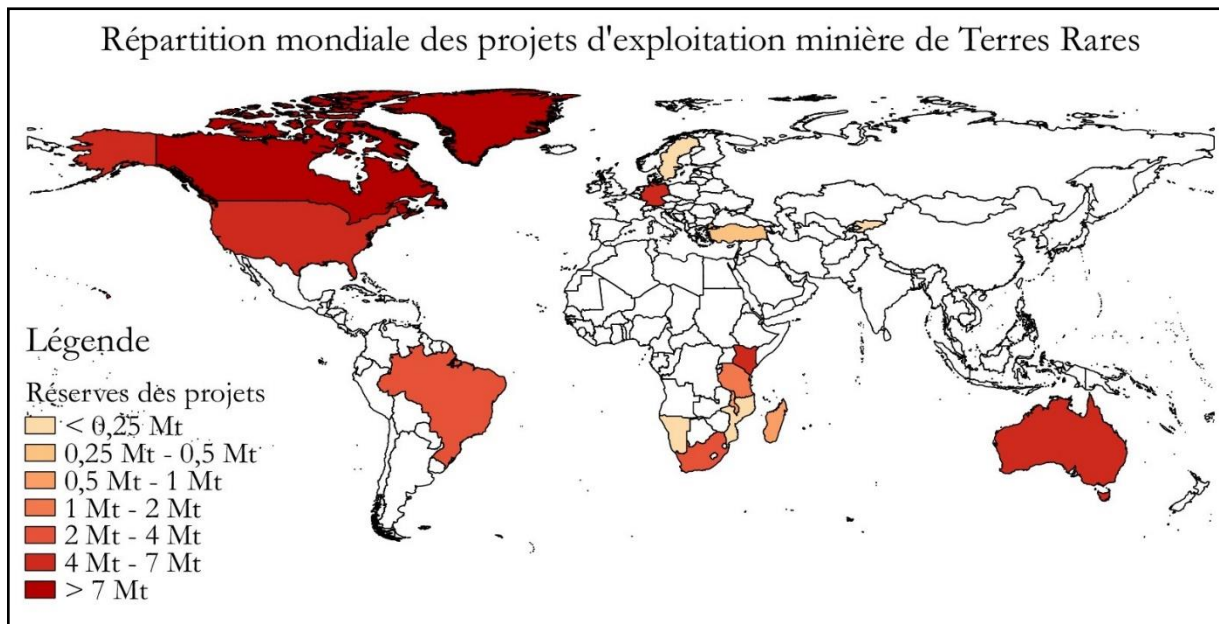


Figure 10 : Répartition mondiale des projets d'exploitation minière de terres rares (Source : Technology Metals Research 2015, Cartographie : Thibaut Fraiteur)

On peut citer les projets les plus importants. En Europe, les mines de *Kvanefeld*, au Groenland (et donc les réserves sont estimées à plus de 6 Mt) et de *Nora Karr*, en Suède (plus modeste, il ne contiendrait que 0,3 Mt), pourraient permettre à l'Union européenne de diminuer sa dépendance aux importations chinoises. Le Canada pourrait également jouer un rôle important à l'avenir, puisqu'il compterait près de 19 projets, parmi lesquels on compte des mines dont les réserves seraient de quelques mégatonnes (celles de la mine de *Thor Lake*, à titre d'exemple, s'élèveraient à plus de 4 Mt). L'Australie et le Brésil ont également de grands potentiels (Gavin 2012, p. 256).

Certains pays se sont également lancés dans l'exploitation de ressources moins conventionnelles. En effet, les fonds marins sont une source potentielle de matières premières. Certaines roches, certains sédiments, ainsi que des nodules présents dans les profondeurs des mers et des océans pourraient être exploitées à l'avenir, bien qu'il n'existe pas, à l'heure actuelle de technologies permettant de telles exploitations. Le Japon pourrait ainsi s'assurer un approvisionnement domestique (Ting & Seaman 2013) ainsi que la France, qui détient un vaste territoire maritime grâce à ses territoires d'outre-mer, qui pourraient être exploités.

Bien que nous reviendrons plus en détail sur ces nouveaux projets, nous pouvons d'ores et déjà souligner que, compte tenu du fait que les réserves chinoises sont amenées à diminuer dans les années à venir (les projections régulièrement citées dans la littérature parlent de 20 à 30 ans avant l'épuisement total des ressources) et que la demande en terres rares devrait augmenter de 8 à 11% par an durant les années à venir, le quasi-monopole chinois de la production semble voué à disparaître, et une nouvelle géographie des terres rares devrait apparaître (Gavin 2013).

Le recyclage est également l'une des voies choisies, bien qu'à l'heure actuelle, les taux sont très faibles ; la CNUCED avance le chiffre de 1% (CNUCED 2014, p. 20). De surcroît, en 2010, la Commission européenne reconnaissait qu'il n'existait pas de procédé de recyclage économiquement viable pour ces métaux à l'heure actuelle. Néanmoins, plusieurs pays ont lancé des programmes de recherche sur ce sujet ; nous pouvons citer ici le Royaume-Uni, les États-Unis, la Corée du Sud et le Japon. Nous reviendrons plus détail sur la question du recyclage dans la suite de ce travail.

5. Discussion

À travers la description de la controverse qui existe entre la Chine, leader mondial de la production de terres rares, et les principaux pays importateurs (les États-Unis, l'Union européenne, et le Japon, entre autres), nous avons pu mettre en évidence la grande variété des acteurs du secteur et des enjeux qui gravitent autour des REE.

Une cartographie en est faite dans la

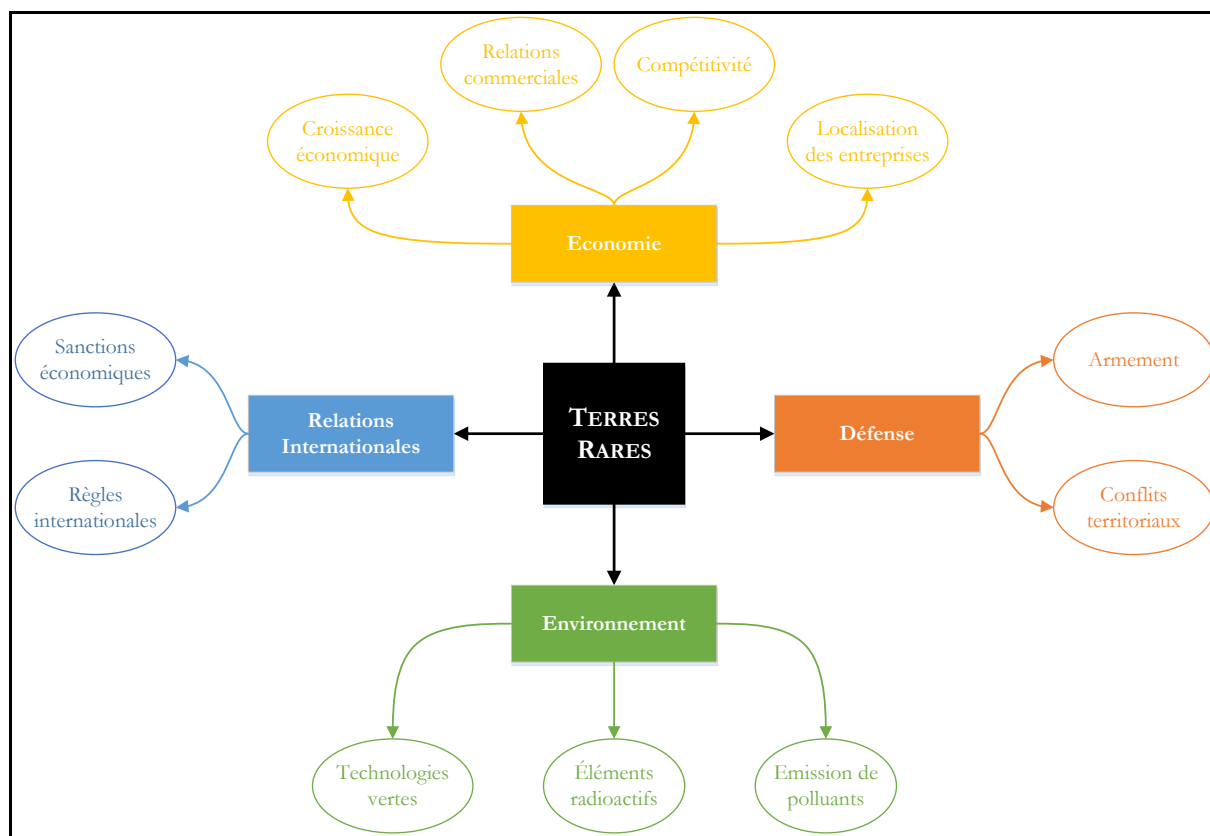


Figure 11 ci-dessous. Bien qu'elle ne soit probablement pas exhaustive, elle nous sera utile, dans la suite du travail, afin de fournir un regard critique sur les trajectoires d'adaptation au sein des différents pays.

Il nous paraît assez clair que certains de ces enjeux ne sont pas directement liés aux terres rares en elles-mêmes, mais que dans certains cas, les questions liées à la ressource sont utilisées par certains acteurs à des fins détournées. C'est clairement le cas dans le conflit territorial qui oppose la Chine et le Japon, où les importations nippones furent perturbées par les mesures de rétorsion de l'état chinois, suite à l'arrestation du capitaine de

l'un de ses navires de pêches, qui percuta des garde-côtes japonais (voir paragraphe 2.d ci-dessus). Mais la question se pose également de savoir si ce n'est pas également le cas dans la résolution des plaintes déposées par les États-Unis, le Japon et l'Union européenne auprès de l'OMC, qui ne semblaient pas porter sur le fond de l'affaire, mais sur une question juridique, qui empêche désormais la Chine de faire appel à l'article XX du GATT de 1994 pour justifier des mesures de restriction des exportations, quels que soient les produits sur lesquels elles porteraient.

Certaines propriétés intrinsèques des terres rares ont eu une influence directe et manifeste sur la production. Il s'agit de leurs propriétés physico-chimiques, qui leur donnent un caractère particulièrement intéressant pour des usages dans le monde de l'électronique, mais qui est également source de difficulté pour leur purification, et donc indirectement source d'impact sur l'environnement, généré par ces processus de séparation. Ces dégradations influent également sur la production de métaux, puisqu'elles suscitent l'opposition des populations locales qui les subissent, et des autorités publiques qui cherchent à en limiter l'influence sur la faune, la flore, et le voisinage.

La nature des roches exploitées mérite d'être également soulignée. Y étant toujours présentes conjointement à d'autres métaux (qu'il s'agisse de terres rares ou pas), elles font toujours l'objet d'une exploitation conjointe, ce qui a des effets sur leurs coûts de production, et donc sur leurs ventes. La nature de ces coproduits peut également être source de problèmes, comme dans le cas du thorium et des contaminations radioactives qui peuvent y être liées.

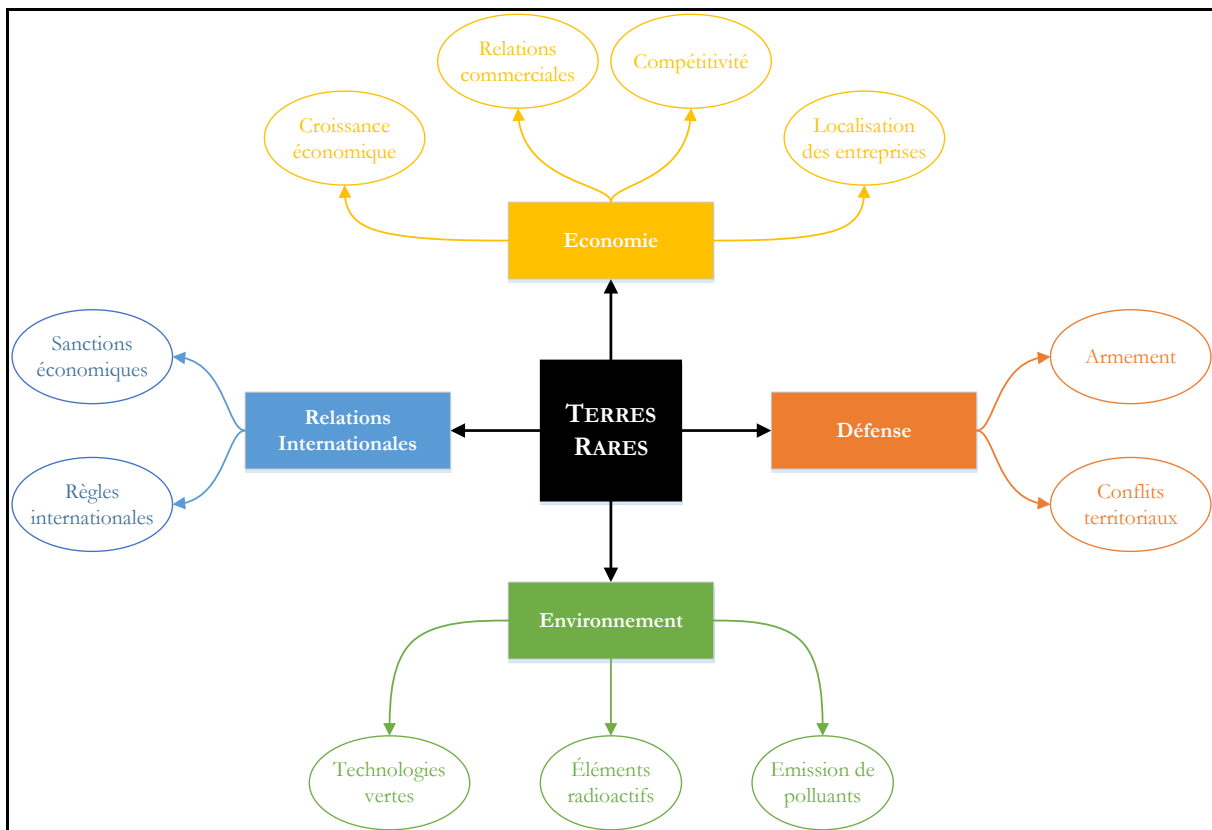


Figure 11 : Cartographie de la problématique autour des terres rares

Il apparaît également que jusqu'à présent, la distribution des réserves ne permet pas d'expliquer la répartition géographique de la production, puisqu'un seul pays détient une situation de quasi-monopole depuis longtemps, alors qu'il y a une trentaine d'états qui disposeraient de réserves à l'heure actuelle. Il faut ici faire intervenir des facteurs politiques et économiques. Le développement de l'exploitation des terres rares en Chine, comme nous l'avons vu, est historiquement lié aux disparités économiques au sein du pays, ainsi que de la stratégie de développement des années 70, qui reposait sur les responsables locaux, mis en compétition sur base de leurs performances économiques pour l'attribution de postes au sein du parti communiste chinois. Et de la même manière que l'industrialisation de la production de REE à *Mountain Pass* a permis le développement d'application de plus en plus large, l'abondance provenant de la production chinoise, conjointement à d'importants programmes de recherche nationaux, a soutenu la croissance du secteur minier national et a encore élargi les champs d'utilisation. Et ce sont également des facteurs politiques qui ont amené l'état chinois à rendre progressivement le contrôle du secteur de la production et à maîtriser les exportations pour développer l'industrie de la transformation au niveau national et à amener les industries étrangères à s'installer en Chine.

La variété des usages qui en sont faits est également un point important à aborder. Dans le cadre d'une demande croissante en terres rares et d'un risque de rupture de l'approvisionnement, la question se pose de savoir si tous les usages qui en sont faits sont traités de la même manière par l'ensemble des pays. En d'autres termes, chaque acteur accorde-t-il de l'importance de la même manière à chaque secteur d'implication ? La Chine et les États-

Unis sont deux grandes puissances militaires et les terres rares semblent stratégiques à cet égard. Ils sont également parmi les pays qui contribuent le plus au réchauffement climatique de par leurs émissions de gaz à effet de serre. Dès lors, pour décarboner leurs économies, ils doivent réaliser d'importants investissements dans les technologies propres. Les États-Unis sont également de grands producteurs de pétrole, ce qui n'est pas le cas de la Chine. Or, ces métaux sont nécessaires aux opérations de craquage des hydrocarbures. D'un autre côté, la Chine est souvent décrite comme « l'atelier du monde », et elle a besoin de matières premières pour alimenter ses industries, entre autres de terres rares pour les secteurs de l'électronique ou des aimants permanents, dans lequel elle est leader.

Dans ce cadre, il nous apparaît difficile de faire la part des choses quant aux motivations de ces différents acteurs. Elles sont probablement diverses ; chacun de ces aspects doit y avoir son importance. Néanmoins, ces protagonistes sont plus complexes qu'il n'y paraît. En effet, bien que nous utilisions de manière abusive ces pays en tant qu'acteurs, il est nécessaire de comprendre que la réalité est bien plus complexe. Derrière « la Chine » ou « les États-Unis », se cachent en fait, comme nous l'avons également vu, une série d'acteurs privés ou publics, qu'il s'agisse de gouvernement, de populations locales, de responsables régionaux, ou d'entreprises privées agissant dans le secteur de l'exploitation, de la transformation et/ou de l'usage final des terres rares, voir du recyclage.

Les relations entre ces différents acteurs au sein même d'un pays ne sont cependant pas comparables d'un cas à l'autre, et évoluent au cours du temps. Nous avons longuement abordé le cas chinois dans cette partie du travail. Le gouvernement de ce pays, depuis le début, a globalement influencé la production et les transformations des terres rares, ainsi que leurs exportations, en jouant à différents niveaux et de différentes manières sur son secteur privé, en partant de politiques de soutien dans les années 70 par les pouvoirs locaux jusqu'à l'instauration de politiques plus intrusives, par des systèmes de plus en plus stricts de taxes et de quotas, ainsi que par l'acquisition d'entreprises. Si bien qu'il est parfois difficile de faire la distinction entre industries et état. Nous pouvons cependant soupçonner que les jeux d'influence au sein du pays sont contrastés, et que les industries et le pouvoir chinois s'influencent mutuellement. Nous y voyons une évolution reposant sur la convergence d'intérêts mutuels économiques.

La situation nous laisse également penser que la vision stratégique chinoise intègre de manière plus importante l'ensemble des enjeux que dans le cas américain, par exemple. Le gouvernement de Pékin a déjà démontré sa capacité à mettre en œuvre des politiques de développement conjointes à différents secteurs et à créer des synergies de développement, comme c'est le cas entre l'industrie de la production et de la transformation des terres rares, ainsi que dans la fabrication de produits manufacturés utilisant ces métaux (ceci incluant vraisemblablement l'industrie de l'armement). Il a également su montrer sa capacité à lutter contre les activités qui échappaient à son contrôle, en réprimant les activités illégales et la contrebande, mais également à consolider son pouvoir en diminuant le nombre d'acteurs, par la fermeture d'exploitation et en favorisant les fusions,

parfois en utilisant des standards environnementaux comme outils. Les intérêts économiques et stratégiques sont donc gérés de manière relativement centralisée.

Ce n'est pas le cas aux USA. En effet, si Washington joue un rôle dans la situation des terres rares au sein du pays, que ce soit de par la plainte à l'OMC ou par les lois prises au sujet de ces métaux, les entreprises privées semblent agir plus librement, et suivant des intérêts qui peuvent apparaître différents de ceux de l'État. C'est ce que montre le cas de l'entreprise *Molycorp*, qui exploite des ressources naturelles aux États-Unis, et qui les exporte dans ses installations en Chine, au Japon et en Thaïlande pour y produire des produits à haute valeur ajoutée qui ne contribuent pas à soutenir l'économie nationale et l'emploi. Cependant, comme dans le cas de la Chine, il faut également souligner que la lecture des événements nous impose de considérer différents niveaux de pouvoir. Ainsi, la fermeture de la mine de *Mountain Pass* au début des années 2000 était le fait de l'État californien.

L'évolution récente de la situation peut également être lue comme étant un changement dans la géographie des flux d'échange entre importateurs et exportateurs. En effet, lorsque la Chine acquiert sa position de quasi-monopole, au début des années 90, elle ne le fait principalement qu'aux dépens d'une entreprise privée, *Molycorp*. Et dans un premier temps, sa production inonde les marchés internationaux de terres rares peu chères (du fait du faible coût du travail chinois et des normes environnementales faibles dans le pays), qui alimentent les entreprises de transformations et d'utilisation finale de ces métaux. Globalement, c'est une situation de « *win-win* » : les chinois assurent la production et en assume les coûts humains et environnementaux, et les industries des pays importateurs profitent de produits abordables. Mais l'état chinois a changé la donne avec ses politiques de développement intérieur, en accaparant une partie des exportations au profit de ses industries nationales, prenant les importateurs au piège, et les forçant à changer de stratégie. Dans ce jeu, la Chine a visiblement pris une longueur d'avance : elle dispose d'un secteur minier expérimenté, et d'entreprises de transformations consolidées. Et bien que ses ressources nationales s'épuisent, il n'est pas exclu à l'avenir qu'elle découvre de nouvelles réserves, qu'elle s'oriente elle aussi vers les gisements marins, ou qu'elle acquière des mines à l'étranger, comme ça aurait pu arriver dans le cas du rachat de *Unlocal Corporation*.

6. Conclusions

Nous avons vu que l'histoire de la production mondiale de terres rares, durant la seconde moitié du 20^e siècle et jusqu'à la première décennie du 21^e est riche et complexe. Elle concerne un nombre important d'acteurs qui se sont mués au cours du temps.

Il est indéniable que la situation de tension actuelle et les risques liés à l'approvisionnement sont fortement liés à la Chine, qui a progressivement pris une position de monopole de la production de terres rares au niveau mondiale, pour ensuite en devenir le premier consommateur. Cette transformation a été rendue grâce à l'intervention de l'État chinois dont la politique, de plus en plus interventionniste, a progressivement intégré des pans entiers de son économie, liés à cette ressource.

En se refermant sur elle-même, elle a de la même manière placé ses principaux acheteurs en difficulté. De grandes puissances économiques se sont retrouvées face au mur et réagissent, depuis maintenant plusieurs années, pour contrer la puissance chinoise.

Le risque de pénurie pour ces pays, et à l'échelle mondiale, reste cependant inquiétant malgré tout, et le futur est incertain. Cela devrait d'autant plus nous inquiéter, puisque les terres rares sont au cœur des technologies qui nous permettront de faire face aux changements climatiques par la décarbonisation de nos sociétés.

La suite du travail visera à fournir un point de vue critique des voies d'adaptation à cette pénurie, qui ont été choisies par les pays importateurs, et principalement par les États-Unis et l'Union européenne. De la même manière que la production de terres rares n'a pas été qu'une question technique, ces stratégies devront être également considérées du point de vue de sciences sociales. Nous utiliserons dès lors le passé pour nous éclairer sur l'avenir.

TROISIÈME PARTIE : TRAJECTOIRE D'ADAPTATION

1. Aux États-Unis

a. Situation sur le marché américain

Alors que dans les années 2000, la Chine était leur premier fournisseur de terres rares, les États-Unis ont diversifié leurs sources de matériaux. Sur la période 2006-2009, les REO chinoises représentaient 92% des importations. Entre 2011 et 2014, elles ne s'élevaient plus qu'à 71%. Suivent ensuite les pays exportateurs suivant : l'Estonie (7%), la France (6%) et le Japon (6%) ; les 10% restants sont assurés par « d'autres » pays, parmi lesquels on pourrait compter l'Autriche et la Russie, qui ont déjà été citées comme fournisseurs par le passé (USGS 2008, 2009, 2011, 2012 et 2016)

Dans le même temps, la consommation nationale (estimée) a augmenté, pour passer de 11 kt en 2011 à 17 kt en 2015 (USGS 2016). La production américaine a également progressé sur cette même période ; elle était inexistante en 2011, mais a progressé à hauteur de 4,1 kt en 2015, avec un maximum de 5,5 kt en 2013, grâce à la réouverture de *Mountain Pass*. Les usages finaux se répartissent selon les grands secteurs d'activité repris dans la Figure 12. L'usage le plus important est la catalyse. Derrière cette appellation se cache la plus grande application finale de terres rares : le craquage du pétrole (Nieto et al. 2013). Il utilise essentiellement du lanthane, mais également du cérium et du néodyme. Le volume total de REE consommé en 2009 s'élèverait à environ 4 kt, ce qui devait représenter environ la moitié de la consommation cette année-là⁹ (DoE 2010, USGS 2012).

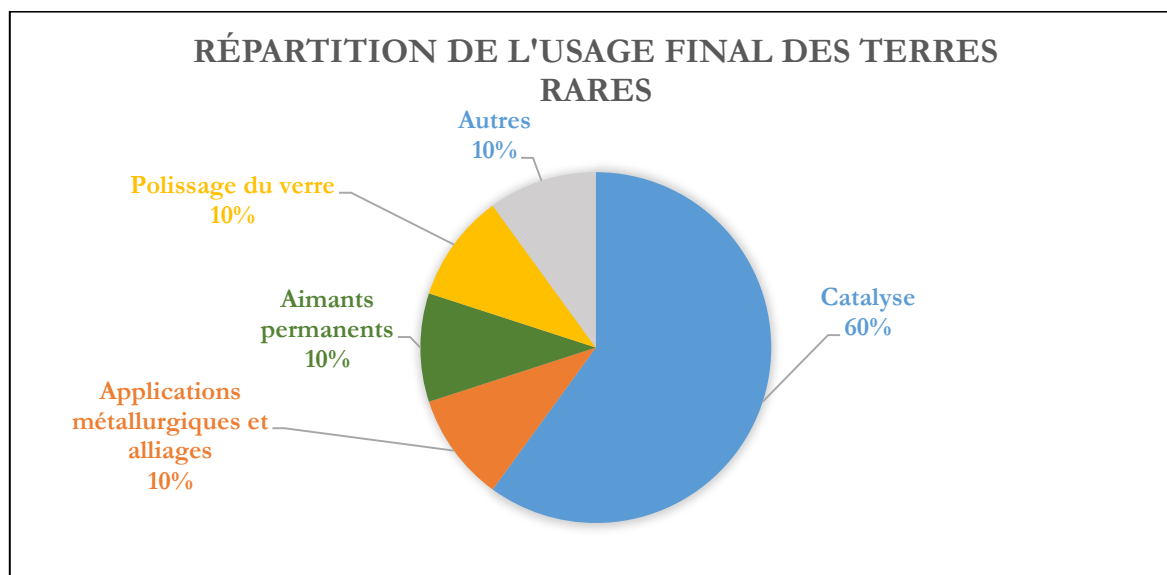


Figure 12 : Répartition de l'usage final des terres rares (Source : USGS 2015)

⁹ Nous ne disposons cependant pas du chiffre exact. Cette estimation repose sur la consommation des années précédentes, en faisant l'hypothèse qu'elle n'a pas fortement varié.

b. Reconstruire la chaîne de production

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, les États-Unis disposaient d'industries de production et de transformation des terres rares qui ont été fermées dans le courant durant les années 2000.

Nous avons déjà longuement abordé le cas de l'entreprise *Molycorp* qui était le principal producteur de minerais jusqu'à la fermeture de *Mountain Pass* en 2002, suite à ses problèmes environnementaux et à son manque de compétitivité face aux produits chinois.

L'industrie de la transformation a aussi souffert de la concurrence Chinoise. Nous avons précédemment mentionné le cas de la fermeture en 2002 de *Magnequench*, dans l'Indiana, dont les activités ont été délocalisées à Tianjin, près de Pékin. D'autres entreprises ont fermé des installations à la même époque : *Vacuumschmelze* et *Hitachi Magnets Corporation* a également cessé leur production d'aimants NdFeB, respectivement en 2003 et 2005 (Martin 2010).

Bien que les États-Unis disposaient encore d'industries consommatrices de terres rares, comme en témoigne le volume de leurs importations, elles avaient ainsi perdu une grande partie de leur chaîne de production, telle que représentée dans la Figure 13 : *Chaîne de production type de produits à base de terres rares* ci-dessous.

Cette chaîne de production représente de manière générale le début du cycle de vie des terres rares. Chaque métal, cependant, selon sa nature et les usages qui en sont faits, suit un chemin qui lui est propre. Ces étapes peuvent être réalisées au sein d'entreprises différentes, en fonction des moyens dont elles disposent. Les REE utilisées dans des processus industriels ne sont cependant pas nécessairement transformées en alliages ou en composants (Martin 2010).



Figure 13 : *Chaîne de production type de produits à base de terres rares (Martin 2010)*

Un rapport du GAO, le *Gouvernement Accountable Office*, l'organe d'audit, d'évaluation et d'investigation du Congrès des États-Unis, expliquait cette réalité dans une présentation de 2010, portant sur le rôle des terres rares dans la chaîne d'approvisionnement du département de la défense. Il y mentionne que les investissements sont trop faibles dans le pays pour assurer l'apparition de nouvelles mines, et que le développement des exploitations minières nationales est nécessaire au développement d'industries de transformation, de manière à fournir des garanties aux investisseurs face à la menace que les industries chinoises représentent au niveau mondial. Il en conclut qu'il est nécessaire de reconstruire la chaîne de production américaine dans son ensemble, et que cela pourrait prendre entre 10 et 15 ans (Martin 2010).

c. *Rare Earths and Critical Materials Revitalization Act*

Dès 2011, le Congrès a voté une loi, en date du 10 février, dont l'objectif est d'établir un programme « de recherche, de développement, de démonstration, et d'application commercial pour assurer un approvisionnement à long terme, sécurisé et durable de terres rares, suffisant pour satisfaire à la sécurité nationale, le bien-être économique et les besoins de production industrielle des États-Unis ». Il s'agit du *Rare Earths and Critical Materials Revitalization Act* of 2011 (Boswell 2011).

Ce programme vise à « soutenir les activités :

- de meilleures caractérisation et quantification de stocks vierges de terres rares en utilisant des recherches géochimiques théoriques ;
- d'explorer, découvrir et récupérer des terres rares en utilisant la science avancée et les technologies ;
- d'améliorer les méthodes d'extraction, de transformation, d'usage, de récupération, et de recyclage des terres rares ;
- d'améliorer la compréhension de la performance, de la transformation, et de l'adaptabilité dans des conceptions d'ingénieries des terres rares ;
- d'identifier et de tester les matériaux alternatifs qui peuvent être substitués aux terres rares pour des applications spécifiques ;
- concevoir et tester des applications qui :
 - utilisent des terres rares recyclées ;
 - utilisent des matériaux alternatifs ;
 - ou vise à minimiser leur contenu en terres rares ;
- à collecter, cataloguer, archiver et diffuser l'information sur les terres rares, incluant les données techniques et scientifiques générées par la recherche et les développements d'activités soutenues dans ce paragraphe, et assister les scientifiques et les ingénieurs à faire un usage maximal des banques de données ;
- et à faciliter le partage d'informations et la collaboration entre les participants. »

Ce programme est mis sous la direction du Secrétaire à l'énergie et du Département de l'Énergie, et est donc géré au niveau fédéral.

On y retrouve l'ensemble des stratégies de réduction des risques de pénurie proposées par Stegen et présentées dans la Figure 1. Il s'agit ici d'une politique d'incitation, contrairement aux politiques chinoises, plus interventionnistes. Le législateur américain se propose ici de financer des initiatives et d'assurer les échanges entre les participants du projet, mais il n'est nullement fait mention d'éventuelles nationalisations de la ressource, ou de création d'entreprises contrôlées par l'État.

Il y est également fait indirectement mention d'un soutien au secteur énergétique. En effet, la section 102 de la loi amende le titre XVII de l'*Energy Policy act de 2005* qui autorise le secrétaire à l'énergie à accorder des garanties de prêts pour des applications, entre autres pour les aimants et les batteries (DOE 2010).

d. « *Mine to Magnet* »

Partenaire du programme de développement du Département de l'Énergie, *Molycorp*, l'entreprise propriétaire de la mine de *Mountain Pass*, s'est lancée dans une stratégie de consolidation verticale, baptisée « *Mine to Magnet* », dont l'objectif est clairement exprimé dans le titre : assurer elle-même l'ensemble des opérations tout au long de la chaîne de production.

Relancer les activités de production à *Mountain Pass* ne s'est pas fait sans mal, puisque l'entreprise a dû modifier ses installations. Bien qu'elle n'ait pas à assumer les conséquences des déversements radioactifs du passé (c'est *Unocal*, alors propriétaire de *Molycorp*, qui en était responsable ; l'entreprise a ensuite récupéré son indépendance lorsqu'elle fut vendue à un groupe d'investisseurs), des modifications furent faites pour réduire l'empreinte écologique des installations, entre autres par l'installation d'un système de recyclage des eaux usées, évitant d'avoir recours à des bassins d'évaporation (Humphries 2013).

Après la reprise des activités minières en 2011, *Molycorp* a alors investi dans des entreprises de transformation. Elle rachète ainsi *Santoku America*, qu'elle renomme « *Molycorp Metals and Alloys* » (MMA), et qui dispose d'une usine à Tolleson, produisant des alliages NdFeB (les plus puissants qui existent) et SmCo¹⁰ pour la fabrication d'aimants, dont elle prévoit de moderniser les installations. Elle s'est également lancée dans la recherche sur le recyclage d'aimants permanents (Humphries 2013). Elle a été rachetée en juillet 2016 par *Eutectix*, fondée en 2014 et spécialisée dans la fabrication d'alliages métalliques.

Molycorp est également devenue actionnaire majoritaire de l'entreprise estonienne *AS Silmet*, devenue « *Molycorp Silmet* », spécialisée dans la production d'oxydes et de métaux à base de terres rares. Ils ont également fait l'acquisition de *Neo Material Technologies*, ce qui avait suscité, comme nous l'avons déjà expliqué, des questionnements quant au fait que *Molycorp* exportait ses métaux vers le marché Chinois.

Selon l'analyste Jack Lifton (cité par Humphries 2013), cette stratégie serait celle qui permettrait d'attirer le plus les investisseurs, car elle les rassurerait face au risque que la Chine puisse prendre la production américaine à revers en coupant ses prix. L'existence d'une chaîne de production domestique permet de réduire les coûts tout au long de la chaîne de production, tout en assurant des débouchés pour les terres rares produites. Les projets de transformation de terres rares seraient donc tout aussi importants que ceux d'exploitation minière, tant pour

¹⁰ Samarium et Cobalt

les entreprises que leurs investisseurs, et donc pour le gouvernement américain, mais se feraient au dépens des entreprises étrangères.

e. Exploitation de nouveaux gisements miniers

Comme nous avons déjà pu le voir sur la cartographie des projets miniers avancés à travers le monde, les États-Unis disposent d'un potentiel parmi les plus élevés répertorié par le *TMR Advanced Rare-Earth Projects Index* (Technology Metals Research 2015). Cinq projets sont repris dans le Tableau 3 ci-dessous.

Il existe d'autres dépôts à travers le pays, mais ces cinq projets seraient les plus avancés. Il est cependant difficile de savoir quand ils commenceront. En effet, si les sites internet des différentes compagnies minières, toutes créées à pour le développement de ces exploitations, fournissent de nombreuses informations, aucun ne donne de date de début de l'exploitation (lorsque le site est fonctionnel). Seul *Mountain Pass* est en activité à l'heure actuelle.

Tableau 3 : Projets de mines avancés selon le TMR Advanced Rare-Earth projects (Technology Metals Research 2015)

Projet	Propriétaire	REO (Mt)
Bear Lodge	Rare Element Resources Ltd.	1,553
Bokan	Ucore Rare Metals Inc.	0,035
La Paz	Formerly AusROC Metals Ltd.	0,056
Mountain Pass	Molycorp Inc.	2,072
Round Top	Texas Rare Earth Resources Corp.	0,573

Le temps de développement de tels projets peut cependant prendre beaucoup de temps. Selon des représentants de l'État Américain et d'entreprises du secteur privé, il faudrait entre 7 et 15 ans pour pouvoir lancer ce genre d'exploitation, une fois que l'entreprise en sécurisé les fonds nécessaires, « principalement à cause du temps que cela prend de se conformer aux multiples régulations nationales et étatiques (Martin 2010).

f. Le complexe militaro-industriel américain

Nous avons déjà mentionné dans la partie introductive que les REE faisaient l'objet d'usages militaires. Aux États-Unis, les terres rares sont aussi un problème de sécurité nationale.

Il existe dès lors plusieurs rapports émis par le GAO et le Département de la Défense (DoD), dont le dernier, datant de 2016, souligne la vulnérabilité de l'armée américaine à un risque de rupture de l'approvisionnement. Les trois différents bureaux du DoD, concernés par l'étude, ont chacun présenté une liste de métaux critiques,

selon leurs propres critères¹¹. Il apparaît que seules deux terres rares sur les 17 qui existent ne seraient pas critiques. Il s'agit du cérium et du prométhium.

Ce rapport souligne également qu'à l'heure actuelle, le Département de la Défense ne dispose toujours d'aucune stratégie pour faire face à une éventuelle pénurie. Le rapport explique que la Chine reste, aujourd'hui encore, le principal fournisseur de matières premières pour les USA dans ce domaine (Mak 2016).

Le budget de la défense américaine représentait en 2014 496,5 milliards de dollars (DoD 2014). Derrière ce chiffre se cache, entre autres, une importante industrie de l'armement qui travaille avec le gouvernement américain, mais qui exporte également ses produits vers l'étranger. En 2013, sa consommation en terre rare est estimée à 5% du volume national. Certains de ces équipements utilisent des terres rares. Le tableau ci-dessous reprend trois exemples. Il faut souligner ici que les applications citées impliquent l'usage d'aimants, mais ce n'est pas toujours le cas.

Tableau 4 : Exemple d'application des terres rares dans le DoD américain (Source : Martin 2010 ; Lockheed Martin 2016, GDBIW 2016, General Dynamics Land System 2016)

Équipement	Producteur	Élément contenant des terres rares	Terres Rares Concernées
Aegis Combat System	Lockheed Martin	Systèmes radars	Néodyme
DDG-51	Bath Iron Work	Moteurs hybrides	Samarium
M1A2 Abrams	General Dynamics Land System	Systèmes de navigation	Néodyme

Comme dans beaucoup de cas, les producteurs d'équipement sont des entreprises américaines, dont les usines sont installées sur le territoire national. Au-delà des questions de sécurité se cachent donc également des enjeux économiques et d'emploi.

Le département de la défense est également un grand producteur de déchets. Un rapport du GAO de 2016 rapporte que le Département de la Défense produit annuellement « des dizaines de millions de livres de déchets électroniques » annuellement. Il s'agit d'ordinateurs, de téléphones portables, mais également des éléments issus de systèmes d'armement. Bien que certains de ces éléments soient recyclés, le rapport souligne que ce n'est pas le cas des terres rares. Il met en avant la difficulté de mener de telles opérations. Différentes raisons sont mises en avant, parmi lesquelles le coût « prohibitif » des opérations de recyclages, qui rend le matériel récupéré économiquement inintéressant, celles-ci étant très intensives en énergie (Mak 2016).

¹¹ La méthodologie utilisée pour déterminer le caractère « critique » de ces terres rares diffère d'un bureau à l'autre.

g. Discussion

Le cas américain est caractérisé par une destruction de sa chaîne de production de produits à base de terres rares depuis sa base, au profit des entreprises chinoises. Elles ont progressivement pris le contrôle de la production de matière première, de leur transformation en alliages et en certains produits manufacturés.

L'évolution récente de son industrie vise à reprendre le contrôle de son approvisionnement et à varier les fournisseurs, par le biais d'une relance du marché des terres rares sur le sol américain. Elle peut compter, pour ce faire, sur le grand acteur historique de son secteur minier pour les terres rares, *Molycorp*, qui a repris ses activités en 2008 et les a élargies, pour produire elle-même ses aimants permanents, en assurant l'ensemble de sa production.

Cette stratégie est celle soutenue par le gouvernement américain, qui par la voie du Département de la Défense, a lancé un programme d'investissement visant à soutenir la recherche et les projets innovants. L'ensemble des stratégies qui peuvent être soutenues dans ce cadre est celui présenté par Stegen (voir Figure 1). Cette stratégie n'est également pas spécifiquement orientée vers les énergies renouvelables. En effet, les usages finaux américains démontrent que la rupture de l'approvisionnement en terres rares ne met pas seulement en danger le développement des énergies renouvelables, mais que le secteur pétrolier en dépend également.

Il semble néanmoins qu'il faudra plusieurs années au marché américain pour se (re)développer. Le frein le plus important pourrait être la Chine, qui pourrait manipuler les prix de manière à les faire chuter sur le marché international et à réduire l'intérêt que présenteraient les investissements à l'étranger.

2. Au sein de l'Union européenne

a. Situation sur le marché européen

Les pays de l'Union européenne sont importateurs de terres rares. Il n'existe aucune mine en Europe, bien qu'il y ait eu, dans un passé lointain des exploitations de REE. À l'heure actuelle, 21 des 28 états membres de l'UE sont importateurs de terres rares. Parmi ceux-ci, en 2014, 5 étaient responsables de 90% des importations. Il s'agissait, par ordre décroissant, de l'Estonie, des Pays-Bas, de l'Allemagne, de l'Espagne et de la Belgique. Ces métaux proviennent principalement des États-Unis (40% du volume importé), de Chine (35%) et de Russie (20%) (Machacek & Kalvig 2016, ERECON 2015)

Cette même année, le marché européen a consommé environ 12 kt de REE. Les secteurs concernés, ainsi que leur part de la consommation, sont repris dans la Figure 14 : *Répartition de la consommation de terres rares au sein de l'UE en 2014* (Source : Machacek & Kalvig 2016) ci-dessous. On peut, dès lors, voir qu'il existe une grande variété de secteurs concernés et d'acteurs. Un quart de la consommation, essentiellement du cérium, est liée à la production de pots catalytiques. Parmi les entreprises concernées, nous pouvons citer *Solway* (en Belgique et en France), qui dispose également d'une des plus anciennes installations de séparation des terres rares au monde à La Rochelle, ou encore *Johnson*

Matthey (au Royaume-Uni). Le craquage est également un secteur important. On peut citer ici de grandes entreprises pétrolières et chimiques, parmi lesquels le géant français *Total*, ou encore *BASF* et *Afton Chemicals* (Machacek & Kalvig 2016). La fabrication d'alliage est également assurée par des entreprises comme *Silmet Rare Earth*, en Estonie, qui est la propriété de Molycorp, ou encore l'anglais *Less Common Metals*, détenu par le Canadien GWMG, qui développe actuellement un projet minier à *Hoidas Lake*.

Les secteurs liés aux technologies vertes sont également présents, puisque 10% de la consommation est utilisée par le secteur des batteries et des aimants permanents. Pour ce dernier, nous pouvons citer quelques entreprises : l'allemand *Vacuumschmelze* (et sa filiale finlandaise *NeoRem*), qui disposait autrefois d'installations aux USA ou encore *Magneti Lubljana*.

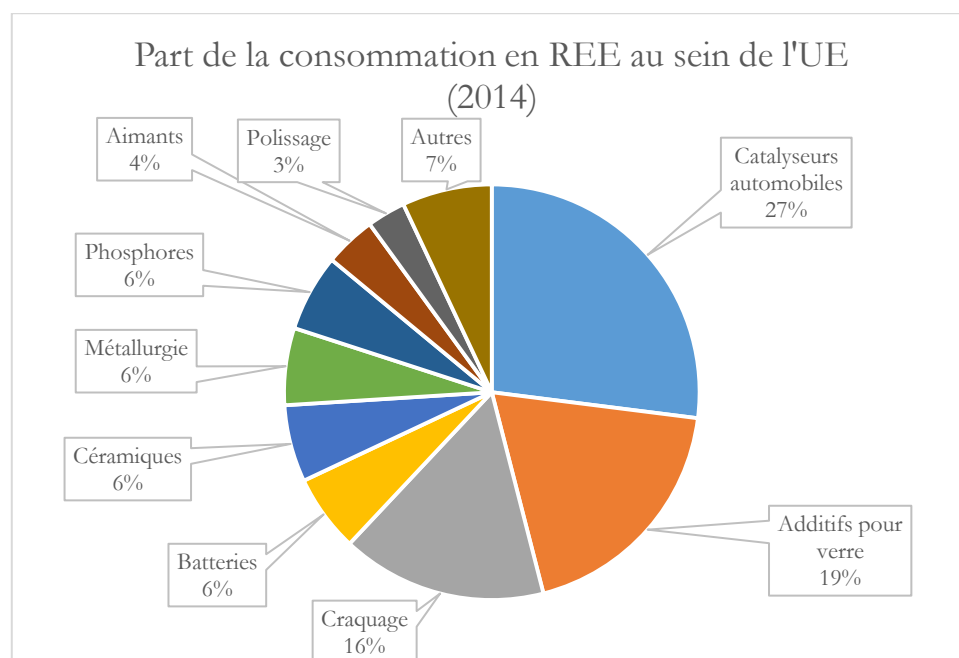


Figure 14 : Répartition de la consommation de terres rares au sein de l'UE en 2014 (Source : Machacek & Kalvig 2016)

b. Mesures européennes

Nous allons ici aborder la question du cadre institutionnel dans lequel s'inscrit le redéveloppement de l'industrie des terres rares au sein de l'Union européenne. Chaque état membre dispose néanmoins de ses propres législations, qui peuvent s'ajouter aux mesures de l'UE. Il pourrait s'agir de programmes de financements, de question de droit relatif aux mines ou à la protection de l'environnement, par exemple. Ces particularités ne seront pas abordées ici.

La *Raw Material Initiative* (RMI) est le principal outil mis en œuvre par les institutions européennes pour faire face au risque de rupture de l'approvisionnement en matières premières nécessaires au développement de l'économie de l'union, parmi lesquelles se trouvent les terres rares. Elle fut lancée par le conseil et le parlement en 2008, et repose sur trois piliers principaux :

- L'accès équitable aux marchés internationaux (pour les entreprises européennes).
- La création d'un contexte adéquat au développement des ressources européennes.
- Le soutien à l'efficacité et au recyclage pour réduire la dépendance aux importations.

L'initiative fût mise en œuvre progressivement à différents niveaux au sein de l'UE, mobilisant ainsi la Commission Européenne, les États membres et le monde des industries. Elle fût aussi intégrée dans différentes politiques, parmi lesquelles le Septième programme-cadre de recherche et de développement (pour la période 2009-2013), et Horizon 2020, son successeur, où la RMI est associé à l'environnement et au réchauffement climatique au sein du cinquième challenge sociétal (Commission Européenne 2015). La RMI présente une liste de matériaux critiques, parmi lesquelles se trouvent des terres rares.

Le premier pilier s'est essentiellement traduit par des mesures diplomatiques. On peut citer deux points importants. D'une part, les relations avec la Chine, principal exportateur. Outre les plaintes auprès de l'OMC en 2009 et 2012, la commission a aussi réalisé deux ateliers de travail avec le Ministère de l'Industrie et des technologies de l'information, en 2011 et 2013, afin d'établir un dialogue. D'autre part, de tels ateliers ont également été menés avec les USA et le Japon, de manière à créer des synergies sur les intérêts communs, et des collaborations, entre autres en termes de recherche (Commission Européenne 2013).

Les second et troisième piliers se sont essentiellement traduits par des programmes de recherche et des partenariats visant à développer et à partager de nouvelles connaissances et techniques, sur les ressources européennes, les méthodes d'extraction et de raffinage, la fabrication d'alliages et d'aimants, et le recyclage des matériaux. C'est dans ce cadre qu'a été développé l'*European Rare-Earth Competency Network* (ERECON), dont les travaux se sont terminés fin 2014, et qui a rassemblé de nombreux représentants du monde de la politique, des industries et des universités pour favoriser le partage de connaissances. Leur rapport, publié en 2015, est d'ailleurs une source régulièrement citée dans notre travail (Commission Européenne 2015).

On peut aussi citer une série de projets de recherche qui ont eu lieu. Le Tableau 5 reprend quelques informations à leur sujet. Nous pouvons en retirer quelques informations. Tout d'abord, chacun de ces projets dispose largement de fonds donnés par l'Union européenne. L'ensemble des exemples ici cités est financé à hauteur de trois quarts de leur coût total. On retrouve également quelques grandes stratégies de diminution de la consommation des terres rares : changement de design, substitution, recyclage. Ensuite, il y a une grande variété d'entités prenant part aux projets : beaucoup d'instituts de recherche et d'universités (européens, mais aussi aux USA), mais également des entreprises privées, dont certaines sont des acteurs du secteur des terres rares au sein de l'UE, que nous avons déjà mentionné : *Vacuumschmelze* (pour le projet DRREAM) ou *Magneti Lubljana* (pour le projet NANOPYME).

Tableau 5 : Exemple de projets de recherche dans le cadre de la RMI portant sur les aimants (Source : CORDIS 2015)

Nom	Mission	Période d'activité	Coût Total (Contribution de l'UE %)	Parties prenantes
DRREAM - D rastically R educed use of R are E arth in A pplications in M agnetocalorics	Analyse du cycle de vie des terres rares dans des applications de réfrigération magnétique	Du 01/01/2013 au 31/12/2015	5,2 millions € (~ 70%)	Imperial College London, Technische Universität Darmstadt, Instituto Nazionale Di Ricerca Metrologica, Vacuumschmelze, CNRS, SATIE, ACPME, INDESIT, Neel Institut, Cambridge, Fraunhofer IFAM
ROMEO - R eplacement and O riginal M agnet E ngineering O ptions	Développer des aimants permanents sans terres rares et améliorer les propriétés des aimants à base de LREE en travaillant sur leur structure microscopique	Du 01/12/2012 au 30/11/2015	5,5 millions € (~ 70%)	Jozef Stefan Institute, Technische Universität Darmstadt, CNRS- Institut Neel, Trinity College Dublin, Vienna University of Technology, Kolektor Group, Siemens, Vacuumschmelze, VALEO, DAIMLER, TEMAS, IFW Dresden, St. Poelten University of Applied Sciences
NANOPYME - N anocrystalline P ermanent Magnets Based on Hybrid M etal-Ferrites	Développer des aimants permanents à base de ferrite pouvant rivaliser avec ceux à base de terres rares	Du 01/12/2012 au 11/30/2015	4,5 millions € (~ 75%)	INSTM, CSIC, Aarhus Universitet, Institut Jozef Stefan, Universidad Complutense de Madrid, Danmarks Tekniske Universitet, Ingenieria Magnetica Apicada SL, Magneti Ljubljana
REFREEPERMAG - R are E arth F ree P ermanent M agnets	Développer des aimants permanents sans terres rares de haute performance	Du 01/05/2012 au 30/04/2015	5,2 millions € (~ 75%)	Technische Universität Wien, Uppsala Universitet, INSAT, Universität Duisburg-Essen, Ruhr-Universität Bochum, CSIC, Leibniz-Institut für Festkörper und Werkstofforschung Dresden, Commissariat à l'énergie atomique

				et aux énergies renouvelables, Magnetfabrik Bonn, Wittenstein Cyber Motor GMBH, University of Delaware, Technisce Universitat Darmstadt
--	--	--	--	---

Parmi les projets ayant vu le jour, nous pouvons également citer EURARE, qui a commencé ses activités en 2013 et qui s'achèvera en 2018. Il dispose d'un budget plus conséquent (près de 14 millions d'euros, financés par l'UE à hauteur de 9 millions) pour rechercher et caractériser les gisements de terres rares en Europe, mais également de développer des techniques de séparation innovantes et respectueuses de l'environnement, ce qui permettrait de reconstruire la base de la chaîne de production de technologies à base de terres rares, actuellement inexistante en Europe, comme nous l'avons vu. De nombreux acteurs, dont le profil est semblable à ceux cités dans d'autres projets, y prennent part. On peut citer la KUL, plusieurs instituts géologiques nationaux (français, anglais, danois, norvégiens), des entreprises du monde de la transformation (telles que *NeoRem*, ou encore *Less Common Metals*), mais également de nombreuses entreprises ayant des projets miniers en Europe (que nous aborderons dans la suite : *Greenland Minerals and Energy Ltd.*, *Tasman Metals Ltd.* ou *Tanbreez Mining Greenland*, filiale de *Rimbal Pty. Ltd.*), mais également des entreprises de transformation (CORDIS 2015). Les résultats de ces projets sont disponibles sur le site du Service communautaire d'information sur la recherche et le développement de l'UE (CORDIS). De manière générale, il apparaît que les projets ont atteint leurs objectifs. Néanmoins, nous ne disposons pas d'informations indiquant que ces résultats ont mené au développement de nouveaux produits ou procédés industriels. Ces initiatives se sont cependant terminées il y a quelques mois, à l'heure où nous écrivons ces lignes ; il est dès lors probablement un peu tôt pour pouvoir tirer des conclusions sur les retombées de ces financements européens.

c. Projets miniers

Certains pays membres de l'Union européenne possèdent des ressources en terres rares qui pourraient permettre d'assurer la demande au sein du continent. Une liste des projets parmi les plus avancés est reprise dans le Tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6 : Liste de projets de mines de terres rares en Europe (Source : Technology Metals Research 2015, ERECON 2015)

Projet	Pays	Propriétaire	REO (Mt)
Storkwitz	Allemagne	Seltenerden Storkwitz AG	0,02
Kvanjefeld	Groenland	Greenland Minerals and Energy Ltd.	7,369
Kringlerne	Groenland	Rimbal Pty Ltd.	28,058
Sarfartoq	Groenland	Hudson Resources Inc.	0,143
Norra Kärr	Suède	Tasman Metals Ltd.	0,188

Parmi ces projets, seuls deux sont jugés comme étant « à un stade avancé ». Il s'agit d'une part du projet de *Norra Kärr* en Suède, et dont la production pourrait commencer au début de l'année 2017. Ce gisement présente la particularité d'être pauvre en éléments radioactifs. D'autre part du projet de *Kvanjefeld*, où les opérations pourraient débuter vers 2018-2019, et qui contiendrait également du zinc et de l'uranium. L'UE disposerait également potentiellement d'un des plus grands gisements au monde avec la mine de *Kringlerne*. Ce projet en est néanmoins à un stade moins avancé (ERECON 2015).

Bien que ces mines ne soient pas encore en activité, et que leur date d'ouverture soit incertaine, elles devraient permettre de répondre à la demande au sein des pays membres. Néanmoins, il faut souligner que contrairement aux exploitations en Chine, les ressources européennes ne sont pas sous contrôles des autorités, ni même d'entreprises européennes. *Greenland Minerals and Energy Ltd.* est une entreprise australienne, tout comme *Rimbal Pty Ltd.*. *Tasman Metals Ltd.*, bien que basée en Europe, a été fondée par des Canadiens. Il n'est donc pas assuré que leur production sera destinée au marché européen. On peut également en douter dès lors que les propriétaires de la mine de *Kvanjefeld* auraient passé un accord (non contraignant) avec *China Non-Ferrous Metal Industry's Foreign Engineering and Construction Co. Ltd.* pour que la séparation des terres rares issues de la mine groenlandaise soit réalisée en Chine, alors même qu'il existe des installations pouvant réaliser cette tâche en Europe (Machacek & Kalvig, 2016).

3. Création de nouvelles mines

L'ouverture de nouvelles mines est un processus compliqué et relativement long. Entre la découverte de terres rares en un endroit et le début des opérations, il peut s'écouler une dizaine d'années (Stegen 2015).

Il est tout d'abord nécessaire de trouver des gisements, ce qui n'est pas le cas de tous les pays, comme nous l'avons vu. Il est également nécessaire que son exploitation soit rentable. Plusieurs facteurs entrent ici en compte (ERECON 2015) :

- La composition du gisement, la proportion de terres rares qu'il contient et la quantité de minerais exploitables permettent, en fonction du prix de vente des métaux, d'estimer la valeur de la mine, qu'elle contienne uniquement des REE ou d'autres matières premières.
- Les coûts de fonctionnement de la mine et des installations de traitement, qui découlent du facteur précédent. Dans le cas des REE, ceux-ci peuvent être influencés par la présence d'éléments radioactifs.
- L'existence d'infrastructures nécessaires au bon fonctionnement des activités du site : production d'énergie, infrastructure de transport, logements pour les travailleurs. Ce facteur est fortement influencé par la localisation de la mine et sa proximité avec de telles infrastructures préexistantes.

L'analyse de ces différents points permet de spéculer sur la rentabilité d'un gisement. Si rassembler suffisamment de fonds et d'investissements, le plus difficile reste, d'une part, de concevoir les installations de traitement et de

séparation, propres à la composition du gisement, mais d'autre part, d'obtenir les permis nécessaires à l'ouverture de la mine. En effet, tant en Europe qu'aux États-Unis, l'ouverture d'une mine est soumise à l'approbation du projet par les autorités locales. Cette étape est celle qui prend généralement le plus de temps (ERECON 2015, Switzer et al. 2015).

L'obtention de ces autorisations n'assure cependant pas l'existence et la persistance d'une mine. Ils peuvent faire l'objet de recours, tout au long de l'exploitation (ERECON 2015). C'est un facteur qui doit d'autant être pris en compte que les activités minières n'ont pas bonne presse auprès des populations locales (Machacek et Kalvig 2016). En Europe, nous pouvons citer l'exemple de la mine d'or roumaine de *Rosia Montana*. Ce projet de mine à ciel ouvert devait initialement débiter en 2007. Il était porté par *Gabriel Ressources Ltd.*, une compagnie détenue majoritairement par le Canadien RMGC, et par l'État roumain (actionnaire à un peu moins de 20%). D'une vaste ampleur, sa réalisation mettait impliquait la destruction du village de *Rosia Montana*. Dès 2003, un groupe d'habitants s'est constitué en association pour combattre la future exploitation, désireux de garder leurs maisons, mais également soucieux de la disparition de vestiges romains menacés par l'installation de la mine, et de l'utilisation de cyanures dans les opérations de traitements et de récupération de l'or, qui se retrouverait dans un gigantesque bassin de décantation et qui menacerait les écosystèmes alentours. Leur cause prit une envergure nationale et internationale, recevant le soutien de politiciens et d'académiques roumains, mais également d'associations internationales telles que *Greenpeace*. La polémique enfla à tel point qu'elle arriva jusqu'au parlement européen. Sous la pression, le gouvernement roumain changea son fusil d'épaule en 2008 et suspendit le permis d'exploitation qu'il avait attribué à *Gabriel Ressource Ltd.* (Deshaies 2009).

4. Se passer de terres rares

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, de nombreuses recherches sont menées à l'heure actuelle dans le secteur du développement de nouvelles technologies qui permettraient de réduire, voire d'éliminer les terres rares dans nos technologies actuelles.

Cette stratégie ne permettrait pas seulement de réduire la dépendance aux REE. Elle peut présenter un intérêt économique. En effet, dans certains domaines ayant massivement recours à ces métaux, le coût engendré par leur utilisation peut être élevé. Des économies pourraient donc être faites par substitution. De plus, l'exploitation des terres rares peut avoir un coût environnemental important. L'empreinte écologique des produits contenant des terres rares pourrait donc être diminuée (Widmer et al. 2015). En outre, le caractère « permanent » de ces aimants peut présenter une série d'inconvénients techniques, entre autres dans le cas des moteurs électriques (Widmer et al. 2015).

a. Avec d'autres métaux

Une possibilité serait de remplacer les terres rares par d'autres métaux. Il existe actuellement relativement peu de substituts. De manière générale, cependant, ceux-ci ne présentent pas des caractéristiques équivalentes à celles des terres rares.

Certains ont été découverts récemment, comme le nitrure de fer, mais on ne sait pas s'ils pourront être produits à l'échelle industrielle et répondre aux besoins techniques du marché (Widmer et al. 2015). D'autres matériaux sont connus, comme la ferrite ou les aimants aluminium-nickel-cobalt, depuis un certain temps déjà et font l'objet d'un regain d'intérêt récent. Il faut savoir que les aimants NdFeB, aujourd'hui largement utilisés, remplacèrent au début des années 80 les aimants SmCo, sur lesquels pesait un risque de rupture de l'approvisionnement ; la République Démocratique du Congo, premier producteur de cobalt durant cette période, faisait face à une situation d'instabilité politique. La découverte des aimants à base de néodyme relaya au second plan la recherche de matériaux alternatifs, aujourd'hui remis au goût du jour, du fait des risques liés aux terres rares, mais dont l'amélioration est également rendue possible par les progrès techniques récents (Kramer et al. 2012).

b. Avec moins de métaux

Une autre possibilité également à l'étude consiste à réduire la quantité de terres rares utilisées dans les objets. Nous prendrons ici, une fois de plus, le cas des aimants permanents.

Une première possibilité consiste à revoir le design des objets dans leur ensemble. C'est l'une des stratégies qui peut être envisagée pour la réduction de la quantité de dysprosium dans les aimants NdFeB, permettant d'assurer ses performances à haute chaleur. En cherchant à diminuer de manière générale la température de fonctionnement, on peut envisager d'utiliser moins de terres rares. Néanmoins, cela s'avère peu envisageable pour certaines applications, comme dans le cas d'éoliennes, souvent exposées au soleil (Stegen et al. 2015).

Une autre possibilité est celle proposée par Hitachi, qui a développé de nouveaux procédés de fabrication permettant également de réduire le recours au dysprosium, sans perte de performance, cette fois-ci. L'entreprise a pour ce faire, mis au point une technologie permettant la diffusion du métal au sein du matériel. D'autres recherches seraient également menées sur l'amélioration des structures des matériaux constitutifs des aimants à l'échelle nanoscopique (Widmer et al. 2015).

c. Avec d'autres technologies

Comme nous l'avons précisé lorsque nous avons abordé les technologies éoliennes utilisant ces terres rares, celles-ci ne sont pas les seules qui existent sur le marché. En effet, dans certains secteurs, l'usage d'aimants permanents n'est pas, en soi, inévitable.

Nous pouvons citer le cas des moteurs électriques ou hybrides. Si certains modèles assez répandus, tels que la *Toyota Prius*, utilisent environ 16 kg de terres rares (Macheri 2012), d'autres compagnies ont opté pour des designs alternatifs. C'est le cas de l'entreprise californienne *Tesla Motors*, dont les véhicules utilisent des moteurs à induction où le champ magnétique du rotor n'est pas généré par un aimant permanent, mais par un courant induit dans un matériau conducteur. Cette technologie est également utilisée par *Toyota* pour le moteur de son SUV RAV4 (Widmer et al. 2015).

Néanmoins, de manière générale, les performances des technologies utilisant des terres rares restent difficiles à égaler, et ne sont pas pertinentes dans certains domaines, particulièrement lorsqu'elles ne sont pas miniaturisables. De plus, l'usage d'autres métaux peut également avoir des conséquences sur l'environnement ou présenter des risques de ruptures comparables au cas des terres rares.

5. Recycler

a. Les acteurs y trouvent leur compte

Les techniques de recyclage des terres rares sont relativement récentes. C'est lors de la crise de 2011 que les pays importateurs se sont lancés dans le développement de projets. En effet, elles permettent une diversification des sources d'approvisionnement, et donc une émancipation des consommateurs de REE vis-à-vis des entreprises minières.

De nombreux programmes de recherche ont été lancés. Nous avons déjà pu en avoir un aperçu dans Tableau 5. Nous pouvons y ajouter deux autres exemples. Tout d'abord, le projet MORE, financé par le Ministère fédéral allemand de la Recherche et de l'Éducation, et qui a pour objectif de développer des technologies de recyclage des moteurs. Différentes universités y prennent part, mais également des entreprises ; c'est le cas de *Vacuumschmelze*, dont nous avons déjà parlé, mais également de *Siemens*, de *Daimler*, ou encore de *Umicore*. Cette dernière fait également partie du réseau EREAN (European Rare Earth Magnet Recycling Network), coordonné par la KUL, auquel prend également part *Rhodia* (récemment racheté par *Solvay*) (CORDIS 2015).

Ces deux entreprises se sont d'ailleurs associées pour mettre au point des installations de recyclage dans l'usine de La Rochelle, initialement consacrée à la séparation des terres rares issues de roches, et dans celle de Saint Fon, près de Lyon. Ils traitent d'une part les rebuts issus des activités principales de l'usine de La Rochelle, mais également de batteries NiMH et d'ampoules basses consommation (Solvay 2015). D'autres entreprises à travers le monde se sont lancées dans de telles activités. On peut citer le géant *Hitachi*, leader mondial des aimants permanents, qui, via sa filiale *Tokyo Eco Recycle Co. Ltd*, recycle les aimants présents dans des disques durs ou des systèmes de refroidissement (Baba et al. 2013, Binnemans et al. 2013).

Ces activités restent cependant limitées à l'échelle mondiale. La plupart des projets de recyclage des REE en sont encore au stade du développement en laboratoire, et le taux de recyclage global est faible (aux alentours de

1% de la production mondiale). Et les technologies actuellement utilisées restent souvent proches de celles utilisées dans les installations de séparation des terres rares dans les minerais (Mc. Lellan et al, 2013).

b. Des possibilités inégales

Envisager la possibilité de recycler des terres rares implique de s'intéresser à leurs cycles de vie. Or, il existe une grande diversité dans les usages de ces métaux, si bien qu'il serait nécessaire de porter un regard particulier à chaque application. Mais nous pouvons ici aborder cette question de manière générale.

Tout d'abord, les objets en fin de vie ne sont pas les seules sources de déchets recyclables. Ceux-ci sont produits tout au long de la chaîne de transformation, depuis la mine jusque dans nos poubelles, si bien que l'ensemble des industries des terres rares ont un intérêt potentiel à mettre en œuvre ces techniques (ERECON 2015).

D'autre part, l'existence de filiales de recyclages implique que les déchets puissent être récoltés. Ces opérations peuvent être plus ou moins aisées selon les cas, selon la difficulté qui peut exister pour mettre en lien les producteurs et les consommateurs de déchets. Les opérations sont théoriquement plus simples lorsqu'elles se déroulent au sein d'une entreprise que dans le cas de déchets électroniques utilisés par le grand public et qui devraient faire l'objet d'une récolte et d'un tri spécifique. Le cadre institutionnel pour jouer ici un rôle important, de par la mise en place d'infrastructures adéquates pour les particuliers ou les compagnies privées, mais aussi en informant les acteurs concernés sur ce sujet (Binnemans & al. 2013, Reuters et al. 2013, EPA 2012, CNUCED 2014). L'absence d'initiatives publiques pourrait donc être un frein, ainsi que l'existence de marchés secondaires (ERECON 2015, Reuters et al. 2013).

Le design joue également un rôle important. En effet, les terres rares peuvent être présentes dans des quantités et dans des proportions variables d'un objet à l'autre. Elles peuvent aussi être fortement disséminées au sein d'un objet, ou concentrées dans un composant spécifique. C'est un paramètre dont il faut tenir compte dans les opérations de recyclage, puisque d'une part, des opérations de séparation des différentes parties des objets peuvent s'avérer nécessaires (Ueberschaar et Rotter 2015), et que d'autre part, le second principe de la thermodynamique rend plus compliqué la concentration de matériaux disséminés. Pour l'expliquer de manière générale, Timothy Gutowski, un chercheur du *Massachusetts Institute of Technology*, prenant le cas de mélanges idéaux entre deux constituants (qu'il nomme 1 et 2). Il a déduit la formule exprimant le travail minimum nécessaire (noté $w_{min,1}$) pour extraire une mole de l'élément 1 d'un mélange qui en contient une concentration constante notée « x ». Il obtient l'équation suivante :

$$w_{min,1} = T_0 \times R \times \ln\left(\frac{1}{x}\right)$$

Où T_0 est la température du mélange (en kelvin, qu'il considère comme constante) et R est la constante des gaz nobles. Dès lors, lorsque x tend vers 0, le travail d'extraction augmente vers $+\infty$. D'une part, il en découle que

plus un matériau est dilué au sein d'une matrice, plus il est difficile de l'extraire. D'autre part, cela signifie qu'il est impossible de récupérer l'un des composants purs sans que des impuretés ne persistent (Gutowski 2008). Notons que cette équation doit être considérée comme une illustration théorique.

c. Nouvelle source d'approvisionnement

L'intérêt du recyclage est qu'il peut, à l'avenir, constituer une source nouvelle d'approvisionnement, particulièrement intéressante pour les pays qui ne disposent pas, à l'heure actuelle, de mines en activité (tels que l'Union européenne ou le Japon) et qui pourraient ainsi s'émanciper des pays exportateurs (Stegen 2015, Reuters et al. 2013). Il pourrait également jouer un rôle de stabilisation des prix. En effet, comme nous l'avons expliqué précédemment, les minerais qui sont exploités contiennent différentes proportions de REE. L'augmentation de la demande en une terre rare peut donc créer une surproduction pour une autre. La création de sources alternatives pour ces métaux peut donc permettre d'équilibrer l'offre (Binnemans et al. 2013).

Il présente d'autres avantages. Outre la réduction des risques de pénurie, et donc de la menace que cela représente pour l'économie, le recyclage a un fort potentiel de création d'emploi, plus intéressant que l'incinération ou l'enfouissement (Reuters et al. 2013). De plus, il permet de diminuer l'impact de la production de métaux sur l'environnement : il contourne le risque de pollution au thorium, il permet de diminuer la pression sur la biodiversité (puisque'il n'est pas nécessaire de construire une de mines), et il permet de diminuer la consommation d'énergie du secteur et les émissions de CO₂ qui y sont associées (mais nous reviendrons sur ce dernier point par la suite) (Reuters et al. 2013).

Cependant, l'utilisation d'objets en fin de vie comme ressource ne peut suffire à combler la demande en terres rares. Et ce pour deux raisons. Premièrement, sur un marché en croissance, le stock de métaux contenus dans les déchets est toujours inférieur à la demande, du fait de la durée de vie des objets. Imaginons un monde où la demande en terre rare croît de 10% tous les ans et que les objets qui en contiennent ont une durée de vie de 7 ans, alors seuls 50% de la demande pourrait théoriquement être comblés par le recyclage (Binnemans et al. 2013, ERECON 2015). Deuxièmement, les méthodes de recyclage génèrent systématiquement des pertes, du fait de la seconde loi de la thermodynamique (Reuters et al. 2013, Ueberschaar et al. 2015, Gutowski 2008).

Il est toutefois nécessaire que les métaux produits trouvent acheteurs ; ils devraient donc être compétitifs vis-à-vis des terres rares issues de l'exploitation minière (Binnemans & al. 2013, Reuters et al. 2013, EPA 2012). Dans le cas des terres rares, ce pourrait ne pas être le cas. En effet, le prix des métaux est resté relativement bas jusqu'à présent, si ce n'est l'épisode de 2011. Les entreprises actuellement présentes dans ce secteur soulignent ce fait à l'heure actuelle comme étant la première difficulté qu'ils rencontrent (Baba et al. 2013, Solvay 2015).

6. Discussion

Nous pouvons tout d'abord mettre ici en exergue les quelques principales différences qui existent entre l'Union européenne et les États-Unis dans leurs stratégies. Si tous deux désirent sécuriser leur approvisionnement en terres rares et reconstruire une chaîne de production domestique complète, les maillons manquants ne sont pas les mêmes. Les USA disposent depuis longtemps d'une mine de grande capacité qu'ils ont facilement pu relancer, mais sans disposer d'industries de transformation. C'est l'inverse de l'UE, où les entreprises ayant recours à des terres rares existent depuis longtemps, mais dépendaient exclusivement des importations de matières premières.

Il apparaît également dans la chronologie des faits que la menace qui pesait sur l'approvisionnement des pays importateurs, causée par les politiques chinoises, a été anticipée. L'augmentation rapide des prix a eu lieu en 2011, mais le problème est soulevé dès 2008 en Europe avec la création de la RMI. Il semble cependant, que la réaction ait tardé, puisque les intentions chinoises étaient claires depuis la fin des années 90, lorsqu'elles ont mis en place leurs quotas, et qu'elles ont favorisé leurs industries locales.

Deux éléments nous semblent expliquer ce retard.

D'une part, les aspects économiques du développement des projets sont un facteur limitant assez récurrent. La création de mines, la recherche d'alternatives ou encore le recyclage est soumis à un impératif de rentabilité et de concurrentialité sur les marchés. Or, la Chine produit encore à l'heure actuelle d'importantes quantités de terres rares peu chères. C'est un élément qui pourrait jouer en défaveur des stratégies d'adaptation européennes et américaines à l'avenir. Malgré le fait que la Chine ne puisse plus restreindre ses exportations, d'autres outils de régulation forts sont encore d'application, telles que les quotas de production ou les systèmes de taxation différenciés. La stratégie d'intégration verticale peut être un bon rempart face aux décisions chinoises puisqu'elle permettrait à des entreprises de s'émanciper totalement de la Chine et de réduire leurs coûts de production tout au long de la chaîne de transformation des terres rares pour rester concurrentielles.

Le second facteur est l'absence de conscience du problème apparent au niveau politique. De part et d'autre de l'Atlantique, les enjeux autour des terres rares ne semblent avoir été intégrés que très tardivement. Nous pouvons mettre en évidence ici que pour l'UE et les USA, l'un des objectifs poursuivis est de créer de la connaissance autour de ces questions, comme dans le cas du projet ERECON en Europe. Cela laisse sous-entendre qu'il y avait un manque de savoir dans les sphères politiques sur les enjeux des terres rares, mais probablement aussi au sein des entreprises qui en dépendent.

Le rôle des institutions publiques nous semble ici jouer un rôle important. Ça a déjà été le cas en Chine. Outre les politiques protectionnistes, l'État chinois a également subventionné la recherche. Si l'Union européenne et les États-Unis semblent vouloir opter pour des choix moins interventionnistes, ils ont largement financé le

développement de technologies, de savoirs et de savoir-faire, en créant des synergies qui permettent à la fois de mettre sur pied des produits et des méthodes innovantes, mais aussi de former des chercheurs, voire des étudiants au domaine des terres rares. Les financements publics permettent également de lever partiellement les limites économiques à l'innovation en faisant reposer en partie les coûts de développement sur la collectivité. Cela n'enlève cependant pas la nécessité d'aboutir à des procédés rentables.

Malgré tout, le temps joue contre les pays occidentaux. Nous l'avons déjà dit : innover, créer à partir de rien, quand il s'agit des terres rares, ça prend du temps. S'il existe des possibilités pour recycler, pour substituer ou pour se passer des REE, elles ne pourront jouer un rôle prépondérant qu'à moyen terme. Le risque auquel nous pourrions faire face est qu'il n'y ait pas assez d'offre pour répondre à la demande à court terme et que cela ne ralentisse le déploiement de technologies, comme les énergies renouvelables.

Mais si l'abondance de terres rares dans le passé a été l'un des facteurs qui ont joué en la faveur du développement d'une série de techniques, entre autres dans le monde de l'électronique, nous avons vu également que les crises sont des occasions d'innover, comme dans le cas de la découverte des aimants NdFeB. Il se pourrait, dès lors, que toute cette histoire soit un mal pour un bien, et que le progrès qui découlerait d'un manque de terres rares nous amène une solution intéressante pour le futur.

DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION

1. Discussion générale

a. Limites de l'analyse et perspectives de recherche

Préalablement à toute discussion et conclusion, il est important de souligner trois points essentiels à la bonne interprétation de notre analyse.

Premièrement, les chiffres que nous présentons doivent être pris avec précaution. Les enjeux liés aux terres rares sont stratégiques à de nombreux égards, et les acteurs impliqués n'ont pas intérêt à faire preuve de transparence. De plus, certaines données sont manquantes comme en témoigne la carte de la répartition des réserves mondiales, qui montre clairement que la majorité des pays du monde qui disposent de réserves ne les ont pas quantifiées, ou n'ont pas transmis cette donnée aux instituts de recherche.

Deuxièmement, notre travail n'est pas exhaustif. Bien que nous ayons cherché à fournir un cadre d'analyse assez large, il s'est avéré nécessaire de restreindre nos recherches. Nous n'avons donc pas pu considérer l'ensemble des acteurs, d'une part parce que nous nous sommes cantonnés à trois zones géographiques principales (la Chine, les USA et l'UE), mais également parce que nous avons essentiellement parlé des entreprises de production et de transformation de terres rares, de l'exploitation des gisements jusqu'à la transformation de REE en composants pour produits finaux. Notre analyse n'a que rarement mentionné le rôle des firmes qui fabriquent ceux-ci. Celui-ci peut donc être sous-estimé. Dans le cas de l'Union européenne, nous nous sommes focalisés sur le niveau communautaire de l'UE, sans nous pencher sur les particularités nationales.

Il pourrait être intéressant de se pencher sur le cas du Japon. D'une part, les relations sino-japonaises houleuses, que nous avons brièvement abordées, peuvent présenter un attrait dans l'étude de la diplomatie autour des terres rares. D'autre part, celles-ci sont également liées à la situation japonaise : le pays ne dispose d'aucun gisement continental, mais pourrait à terme exploiter ses fonds marins. Or, la mer est un objet de conflit entre le Japon et la Chine.

Troisièmement, nous avons pris le parti d'étudier les terres rares dans leur ensemble, sans jamais faire de distinction entre elles. Si cela nous a permis de décrire assez largement les problématiques communes aux REE, nous avons dû gommer leurs particularités propres et leurs différences. Des recherches complémentaires, métal par métal, secteur par secteur, pourraient affiner la recherche ; si nous avons cherché à dépeindre les grands traits du tableau, beaucoup de détails pourraient y être ajoutés.

b. Terres rares, répartition, usages et conflits

Nous avons présenté, tout au long de ce travail, le conflit qui oppose importateurs et exportateurs de terres rares autour des inégalités d'accès aux marchés des matières premières. De nombreux facteurs sont entrés en jeu, mais nous pouvons ici parler un peu plus du rôle joué par l'État chinois comme catalyseur du développement de l'industrie de la production des REE et de leur transformation en produits à haute valeur ajoutée. En prenant progressivement le contrôle de son industrie et en favorisant la recherche, il a déplacé le centre de gravité des industries vers l'Asie.

La Chine n'est cependant pas le seul pays à disposer de ressources. Parmi la trentaine de pays qui disposeraient de réserves, les États-Unis et certains états membres de l'Union européenne ont décidé de soutenir la création de mines sur leurs territoires et de favoriser la reconstruction d'une chaîne de transformation de ces métaux en produits à haute valeur ajoutée.

Alors que les ressources chinoises s'amenuisent, nous pouvons d'ores et déjà entrevoir des changements dans les échanges commerciaux mondiaux et dans les rapports de force qui en découle. La question qui se pose dès lors est celle de savoir si les terres rares deviendront un objet de conflit. Nous avons mentionné que les intérêts économiques et industriels dans ces pays sont aussi des enjeux stratégiques, d'un point de vue énergétique (pour les renouvelables, mais également pour les sources fossiles) et militaire. La Chine a déjà usé de sa position dominante pour influencer le Japon, dans les disputes territoriales entre ces deux puissances. Mais elle risquerait de devenir dépendante de ressources étrangères à l'avenir et être, à son tour, une victime potentielle des politiques de développement économique d'un état. La diplomatie pourrait jouer son rôle, comme cela a été le cas à l'OMC en 2012, mais la résolution de cette plainte a créé une jurisprudence inégalitaire, défavorable à la Chine.

c. Terres Rares, Economie et Environnement

L'électrochoc généré au sein de pays occidentaux durant la première décennie des années 2000 a remis sur l'avant de la scène l'importance de développer de nouvelles voies pour s'approvisionner en terres rares ou en réduire les usages.

Il apparaît que deux possibilités s'offrent à ceux qui désirent répondre à la demande croissante en métaux : l'ouverture de mines et le recyclage. Il est apparu au cours de notre analyse que ces voies n'étaient pas nécessairement compatibles. En effet, durant plusieurs décennies, et jusque récemment, la récupération de métaux dans les déchets n'était pas une alternative compétitive face à une production importante de REE bon marché. Nous pouvons dès lors nous demander si les projets de développement de terres rares ne seront pas tués dans l'œuf par l'ouverture de nouvelles exploitations, qui devraient intervenir d'ici quelques années.

Bien qu'il nous paraisse impossible de nous prononcer catégoriquement sur cette question, nous pensons qu'il y a des raisons de croire que cela n'arrivera pas. En effet, l'un des facteurs de développement des mines chinoises était l'absence de considération pour les impacts générés sur l'environnement. Or, cela a créé des mouvements de mécontentement qui ont forcé le gouvernement chinois à prendre des mesures pour que ces coûts environnementaux soient internalisés par les industries minières. En outre, le cas de la mine de *Mountain Pass* nous indique qu'il est possible de développer des installations minières plus propres. Nous pensons donc que les coûts supplémentaires engendrés par la protection environnementale pourraient peser dans la balance et rééquilibrer les prix entre exploitations minières et recyclage. En plus d'améliorer les conditions environnementales des sites miniers, les normes et la vigilance des citoyens pourraient participer à l'émergence d'alternatives plus écologiques.

De plus, l'augmentation des coûts et le développement de méthodes novatrices ont lancé une dynamique qui ne sera pas sans conséquence à l'avenir. Les investissements réalisés par certaines entreprises au plus fort de la crise de 2011, pour faire face à l'augmentation des prix, pourraient persister dans le temps, voir s'étendre, ce qui mènerait à une croissance du taux de recyclage.

Celui-ci pourrait être soutenu par les pouvoirs publics, en continuant à financer des programmes de recherche qui permettraient de décharger les entreprises du poids des investissements dans la recherche et augmenter les chances de succès de projets de recherche. Nous avons aussi mentionné le rôle important que les autorités publiques peuvent jouer pour favoriser la création de flux de recyclage et l'information des acteurs concernés.

Les industries de production et de traitement de terres rares pourraient jouer un rôle important dans le recyclage. Comme nous l'avons mentionné, ces méthodes pourraient permettre d'éviter des surproductions de certains métaux en équilibrant l'offre. Des stratégies de développement vertical, de type « *mine to magnet* », pourraient intégrer des opérations de récupération pour limiter les pertes tout au long de la chaîne de transformation.

L'ensemble de ces éléments pourrait donner ses chances au recyclage. Néanmoins, nous devons garder en tête que ce n'est pas une solution miracle. Il ne permet pas de récupérer l'ensemble des métaux contenus dans les déchets. De plus, tous les secteurs d'usage ne présentent pas le même potentiel, ou pourraient même être contreproductifs, dans la mesure où récupérer de faibles quantités de terres rares pourrait être trop coûteux en énergie.

d. Terres rares et transition bas-carbone

L'analyse nous a montré que les stratégies de protection de l'approvisionnement en terres rares n'incluaient pas spécifiquement les enjeux d'une transition vers une société bas-carbone, mais adressait le problème de manière plus large. Néanmoins, cela ne veut pas nécessairement dire que la dimension des technologies vertes est exclue de ces politiques.

En effet, il apparaît dans les documents de l'Union européenne et des États-Unis que l'ensemble des entreprises ayant recours aux terres rares n'est pas pris en compte ; que ce soit à travers les financements ou les représentants du secteur privé invités à participer aux travaux (comme dans le cas de l'ERECON), les industries de production et de transformation en composants sont les plus représentées ; les utilisateurs finaux qui intègrent les terres rares dans leurs produits ne sont pas ou peu intégrés (comme les producteurs d'éoliennes ou de voitures électriques). Le problème de l'approvisionnement est donc résolu en s'attaquant à la base de la chaîne de production essentiellement, sauf lorsqu'il s'agit de questions de recyclage.

Cela implique que les stratégies européennes et américaines cherchent à répondre aux risques d'approvisionnement dans leur ensemble, sans donner de priorités à certains usages.

e. Terres rares et avenir

Il est difficile de prévoir quel sera l'avenir des terres rares. De nombreux facteurs entrent en jeu et les choix (techniques, économiques ou législatifs, par exemple) qui influenceront la demande et l'offre en REE à l'avenir sont incertains. S'il semble évident que le secteur va continuer à croître dans les années à venir, cela est moins sûr à long terme, et il paraît évident que l'époque des terres rares prendra fin un jour.

Certes, les évolutions technologiques pourront en diminuer la consommation, voir permettre de s'en passer. Mais ce ne sont pas les seules forces qui entreront en jeu. Les consommateurs (de services ou de biens de consommation) auront aussi un rôle à jouer. Il se pourrait qu'ils en demandent toujours plus ou qu'ils fassent le choix de s'en passer. La question des terres rares est une question qui reste politique, non seulement parce qu'elle est importante pour nos économies, notre système énergétique ou l'armement de nos militaires, mais également parce qu'elle est indirectement liée à des choix de société que nous faisons, et à la manière dont ils se concrétisent matériellement dans nos vies quotidiennes.

2. Conclusions

Notre travail a porté dans les stratégies d'adaptation pour lesquelles les pays importateurs de terres rares ont opté, dans la controverse qui les oppose à la Chine, qui détient une position quasi monopolistique dans la production de ces métaux. Ceux-ci jouent un rôle majeur dans les économies occidentales, où ils interviennent dans de nombreux secteurs technologiques et industriels.

La démarche que nous avons poursuivie a fait reposer notre analyse sur l'étude du contexte qui a amené les États-Unis et l'Union européenne à porter plainte auprès de l'OMC contre les politiques de quotas d'exportation utilisées par le gouvernement chinois pour favoriser le développement de son secteur industriel domestique. Nous avons mis en évidence l'importance que ces métaux ont pris en Chine, et l'intérêt majeur que leur porte le gouvernement national, qui a progressivement pris le contrôle de l'industrie de la production et de la transformation, jusqu'à dominer le marché international.

Nous avons également souligné les particularités des terres rares et la manière dont elles influencent les économies. Leurs propriétés physico-chimiques les ont rendues particulièrement intéressantes pour certaines technologies, mais rendent également leur exploitation et leur recyclage compliqués. La composition des minerais contenant des REE, le fait qu'ils soient présents ensemble, mais dans des proportions différentes, et avec d'autres matières premières (économiquement intéressantes, ou problématique), joue également un rôle dans les techniques d'exploitation, leur impact sur l'environnement, et les problèmes que cela peut causer avec les gouvernements et populations locales.

Nous avons mis en évidence que la controverse autour de l'accès aux ressources était indépendante de la répartition de la ressource à la surface de la Terre, mais qu'elle s'expliquait par les politiques de développement menées en Chine depuis les années 70, et sa volonté de plus en plus forte d'utiliser ses ressources naturelles nationales au profit de son industrie domestique, aux dépens des grands pays importateurs.

Ceux-ci ont récemment mis en place des stratégies pour s'émanciper des entreprises chinoises. Celles-ci impliquent à la fois les milieux industriels, politiques et académiques. L'action des pouvoirs publics vise ici à soutenir le développement de nouvelles sources, par la création de nouvelles mines ou le recyclage. La première option, visiblement possible, au vu des réserves mondiales, est également la solution la plus efficace à court terme, puisqu'il existe plusieurs projets dont les activités d'exploitations pourraient débuter dans le futur, mais le secteur minier des terres rares pourrait faire face à des difficultés légales ou d'acceptation par le public. Le recyclage est envisageable dans le cas des terres rares, mais nécessiterait la mise en place de systèmes de récolte des déchets, et ne semble envisageable que pour certains domaines. Il ne peut cependant pas résoudre le problème à lui seul, et devra nécessairement se faire en parallèle avec le développement d'exploitations minières. Les sources d'approvisionnement en matières premières neuves ou recyclées étant toutes deux épuisables, l'approvisionnement mondial est amené à terme à disparaître.

L'autre volet des mesures prises a pour objectif de diminuer la consommation de terres rares par l'amélioration des techniques de production, voir le développement de technologies n'utilisant pas de terres rares. La première possibilité a déjà montré ses capacités, puisque plusieurs entreprises ont réussi à mettre au point d'objets incorporant moins de REE dans leur design, à performance égale. La substitution reste plus compliquée à l'heure actuelle. La seconde possibilité présente aussi un certain potentiel, puisque les technologies des terres rares ne sont pas les seules qui existent dans certains domaines, comme celui des véhicules électriques. Néanmoins, à l'heure actuelle, se passer des terres rares semble se faire au prix des avantages que fournissent ces métaux.

Bibliographie

- Baba, K., Hiroshige, Y. et Nemoto, T. (2013). Rare-earth Magnet Recycling. Hitachi. Récupéré de http://www.hitachi.com/rev/pdf/2013/r2013_08_105.pdf
- Barry, A. (2013). The Translation Zone: Between Actor-Network Theory and International Relations. *Millennium - Journal of International Studies*, 41(3), 413-429. <http://dx.doi.org/10.1177/0305829813481007>
- Bihouix, P. et de Guillebon, B. (2010). *Quel futur pour les métaux ?*. Les Ulis (France) : EDP Sciences.
- Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A. et Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, 51, 1-22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>
- Blakely, C., Cooter, Joseph, Khaitan, A. et Sincer, I. (2012). Rare Earth Metals & China. *Gerald R. Ford School of Public Policy*, 19. Récupéré de <http://sites.fordschool.umich.edu/china-policy/files/2012/09/Rare-Earth-Metals-China.pdf>
- Boswell, L. *Rare Earths and Critical Materials Revitalization Act of 2011* (H.R. 618). , Pub. L. No. H.R. 618 (2011). Récupéré de <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/BILLS-112hr618ih/pdf/BILLS-112hr618ih.pdf>
- Campbell, G. A. (2014). Rare earth metals: a strategic concern. *Mineral Economics*, 27(1), 21-31. <http://dx.doi.org/10.1007/s13563-014-0043-y>
- Castor, S. B. (2008). Rare Earth Deposits of North America. *Resource Geology*, 58(4), 337-347. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1751-3928.2008.00068.x>
- Chen, Z. (2011). Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. *Journal of Rare Earths*, 29(1), 1-6. [http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60401-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60401-2)
- China Internet Information Center. (2012). Situation and Policies of China's Rare Earth Industry - Information Office of the State Council The People's Republic of China. Foreign Languages Press Co. Ltd. Récupéré de <http://ycls.miit.gov.cn/n11293472/n11295125/n11299425/n14676844.files/n14675980.pdf>
- Commission Européenne. (2013). *Rapport de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Economique et Social Européen et au Comité des Régions sur la mise en oeuvre de l'initiative « Matières Premières »* (No. COM(2013)442) (p. 21). Bruxelles. Récupéré de <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2013/FR/1-2013-442-FR-F1-1.Pdf>
- Commission Européenne. (2016). *Report on Critical Raw Materials for the EU - Report of the Ad Hoc Working Group on defining critical raw materials* (No. Ares(2015)1819503) (p. 41). Bruxelles. Récupéré de <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/10010/attachments/1/translations/en/renditions/native>

- Community Research and Development Information Service (CORDIS). (2015). *EUROPA - CORDIS: Community Research and Development Information Service*. Récupéré le 7 août 2016 de <http://cordis.europa.eu/>
- Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement (CNUCED). (2014). Coup d'oeil sur les produits de base : Edition Spéciale sur les terres rares. CNUCED. Récupéré de http://unctad.org/fr/PublicationsLibrary/suc2014d1_fr.pdf
- Deshaies, M. (2009). L'or controversé de Transylvanie. *Revue Géographique de l'Est*, 49(1). Récupéré de <http://rge.revues.org/1839>
- European Commission. (2010). *Critical raw materials for the EU : Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials* (p. 84). European Commission. Récupéré de <http://www.euromines.org/files/what-we-do/sustainable-development-issues/2010-report-critical-raw-materials-eu.pdf>
- European Rare Earth Competency Network (ERECON). (2015). *Strengthening the European Rare Earths Supply-Chain : Challenges and policy options* (p. 102). Récupéré de <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/10882/attachments/1/translations/en/renditions/native>
- Gavin, B. (2013). China's growing conflict with the WTO. *Intereconomics*, 48(4), 254-261. <http://dx.doi.org/10.1007/s10272-013-0467-6>
- GDBIW. (2016). *GDBIW*. Récupéré le 7 juillet 2016 de <https://www.gdbiw.com/>
- Gutowski, T. G. (2008). Thermodynamics and recycling, A review. Récupéré de <http://web.mit.edu/ebm/www/Publications/RECYCLE%20IEEE%202008.pdf>
- General Dynamics Land System. (2016). *Home*. Récupéré le 7 juillet 2016 de <http://www.gdls.com/>
- Hedrick, J. B. (1994). Mineral Yearbook - Rare Earths. U.S. Geological Survey. Récupéré de http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/740494.pdf
- Hedrick, J. B. (1997). Rare-earth metal prices in the USA ca. 1960 to 1994. *Journal of Alloys and Compounds*, 250(1–2), 471-481. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8388\(96\)02532-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-8388(96)02532-7)
- He, Y. (2014). Reregulation of China's rare earth production and export. *International Journal of Emerging Markets*, 9(2), 236-256. Récupéré de <http://search.proquest.com/docview/1520636113/abstract/519F257762545A5PQ/1>
- Humphries. (2013). *Rare Earth Elements: The Global Supply Chain*.
- Jordens, A., Cheng, Y. P. et Waters, K. E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, 41, 97-114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.017>

- Kramer, M. J., McCallum, R. W., Anderson, I. A. et Constantinides, S. (2012). Prospects for Non-Rare Earth Permanent Magnets for Traction Motors and Generators. *JOM*, 64(7), 752-763,745. Récupéré de <http://search.proquest.com/docview/1030961536/abstract/BD158BFADD464E08PQ/1>
- Latour, B. (2005). *Reassembling the Social: An Introduction to Actor-Network Theory*. New York : Oxford Univeristy Press.
- Lockheed Martin. (2016). *Lockheed Martin*. *Lockheed Martin*. Récupéré le 7 juillet 2016 de <http://www.lockheedmartin.com/>
- Lynas Corporation. (2015). *Our Products - How are rare earths used ?*. *Lynas Corporation*. Récupéré le 4 novembre 2015 de <https://www.lynascorp.com/Pages/How-Rare-Earths-Are-Used.aspx>
- Machacek, E. et Kalvig, P. (2016). Assessing advanced rare earth element-bearing deposits for industrial demand in the EU. *Resources Policy*, 49, 186-203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.05.004>
- Mak, M. A. (2016). *Rare Earth Materials - Developing a Comprehensive approach could help DoD better manage national security risks in the supply chain* (p. 40). Washington, DC : U.S. Government Accountability Office. Récupéré de <http://www.gao.gov/assets/680/675165.pdf>
- Mancheri, N. A. (2012). Chinese Monopoly in Rare Earth Elements: Supply–Demand and Industrial Applications. *China Report*, 48(4), 449-468. <http://dx.doi.org/10.1177/0009445512466621>
- Martin, B. M. (2010, 14 avril). *Rare Earth Materials in the Defense Supply Chain*. Washington, DC. Récupéré de <http://www.gao.gov/new.items/d10617r.pdf>
- McLellan, B. C., Corder, G. D. et Ali, S. H. (2013). Sustainability of Rare Earths-An Overview of the State of Knowledge. *Minerals*, 3(3), 304-317. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.3390/min3030304>
- McQuarrie, C. H., McQuarrie, Donald A. et Peter A. Rock. (1992). *Chimie Générale*. Bruxelles : De Boeck Université.
- Molycorp. (2015). *Molycorp*. Récupéré le 18 juillet 2016 de <http://www.molycorp.com>
- Morrison, W. M. et Tang, R. (2012). China's Rare Earth Industry and Export Regime: Economic and Trade Implications for the United States. Congressional Research Service.
- Moss, R. L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P. et Kooroshy, J. (2011). Critical Metals in Strategic Energy Technologies : Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon EnergyTechnologies. JRC-IET. Récupéré de <https://setis.ec.europa.eu/system/files/CriticalMetalsinStrategicEnergyTechnologies-def.pdf>
- Nieto, A., Guelly, K. et Kleit, A. (2013). Addressing criticality for rare earth elements in petroleum refining: The key supply factors approach. *Resources Policy*, 38(4), 496-503. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.08.001>

- Norman, A., Xinyuan, Z. et Barnett, J. (2014). Critical Minerals: Rare Earths and the U.S. Economy. National Center for Policy Analysis. Récupéré de <http://www.ncpa.org/pdfs/bg175.pdf>
- Organisation des Nations Unies (ONU). *Convention des Nations Unies sur le droit de la mer* (31363). , Pub. L. No. 31363 (1982). Récupéré de http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_f.pdf
- Organisation Mondiale du Commerce (OMC). *Accord Général sur les Tarifs Douaniers et le Commerce* (1994). Récupéré de https://www.wto.org/french/docs_f/legal_f/gatt47.pdf
- Organisation Mondiale du Commerce (OMC). *Accession de la République Populaire de Chine* (01-5996). , Pub. L. No. 01-5996 (2001). Récupéré de <https://docs.wto.org/dol2fe/Pages/SS/directdoc.aspx?filename=r:/WT/L/432.pdf>
- Organisation Mondiale du Commerce (OMC). (2014a, 26 mars). Chine - Mesures Relatives à l'Exportation de Terres Rares, du Tungstène et du Molybdène - Rapport du Groupe Spécial. Récupéré de https://www.wto.org/french/tratop_f/dispu_f/cases_f/ds432_f.htm
- Organisation Mondiale du Commerce (OMC). (2014b, 26 mars). Chine - Mesures Relatives à l'Exportation de Terres Rares, du Tungstène et du Molybdène - Rapport du Groupe Spécial - Addendum. Récupéré de https://www.wto.org/french/tratop_f/dispu_f/431_432_433r_a_f.pdf
- Reuters, M., Hudson, C., van Schaik, A., Heiskanen, K., Meskers, C. et Hagelüken, C. (2013). Metal Recycling : Opportunities, Limits, Infrastructure. UNEP. Récupéré de http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metal_Recycling_Full_Report.pdf
- Solvay. (2015). *SOLVAY latest developments in Rare Earth Recovery from Urban Mines*. Récupéré de <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/14043/attachments/1/translations/en/renditions/native>
- Stegen, K. S. (2015). Heavy rare earths, permanent magnets, and renewable energies: An imminent crisis. *Energy Policy*, 79, 1-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.12.015>
- Switzer, S., Gerber, L. et Sindico, F. (2015). Access to Minerals: WTO Export Restrictions and Climate Change Considerations. *Laws*, 4(3), 617-637. <http://dx.doi.org/10.3390/laws4030617>
- Technology Metals Research. (2015, 19 novembre). *TMR Advanced Rare-Earth Projects Index*. Récupéré le 20 juin 2016 de <http://www.techmetalsresearch.com/metrics-indices/tmr-advanced-rare-earth-projects-index/>
- Tetra Tech. (2001). *Final Report - Human Health and Ecological Risk Assessment for the Mountain Pass Mine* (p. 252). Lafayette, CA. Récupéré de [https://yosemite.epa.gov/oppts/epatscat8.nsf/by+Service/54E026BE19429576852578FF006474E2/\\$File/84020000002.pdf](https://yosemite.epa.gov/oppts/epatscat8.nsf/by+Service/54E026BE19429576852578FF006474E2/$File/84020000002.pdf)

- Ting, M. H. et Seaman, J. (2013). Rare Earths: Future Elements of Conflict in Asia? *Asian Studies Review*, 37(2), 234-252. <http://dx.doi.org/10.1080/10357823.2013.767313>
- Ueberschaar, M. et Rotter, V. S. (2015). Enabling the recycling of rare earth elements through product design and trend analyses of hard disk drives. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(2), 266-281. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-014-0347-6>
- U.S. Departement of Energy (DoE). (2010). *Critical Materials Strategy Summary* (p. 4). United States of America. Récupéré de http://energy.gov/sites/prod/files/10_Critical_Materials_Strategy_Exec_Summary_final.pdf
- U.S. Departement of Energy (DoE). (2011). *Critical Materials Strategy* (p. 196). United States of America. Récupéré de http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf
- U.S. Department of Defense (DoD). (2014). United States Department of Defense - Fiscal Year 2015 Budget Request : Overview. Récupéré de http://comptroller.defense.gov/Portals/45/Documents/defbudget/fy2015/fy2015_Budget_Request_Overview_Book.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2012). *Rare Earth Elements: A Review of Production, Processing, Recycling, and Associated Environmental Issues* (No. EPA 600/R-12/572) (p. 134). Cincinnati. Récupéré de <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100EUBC.pdf>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2008). Mineral Commodity Summaries 2008. U.S. Geological Survey. Récupéré de <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2008/mcs2008.pdf>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2009). Mineral Commodity Summaries 2009. U.S. Geological Survey. Récupéré de <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2009/mcs2009.pdf>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2011). Mineral Commodity Summaries 2011. U.S. Geological Survey. Récupéré de <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2011/mcs2011.pdf>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2012). Mineral Commodity Summaries 2012. U.S. Geological Survey. Récupéré de <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2012/mcs2012.pdf>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2014). Mineral Commodity Summaries 2014. U.S. Geological Survey. Récupéré de <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2015). Mineral Commodity Summaries 2015. U.S. Geological Survey. Récupéré de <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2008/mcs2008.pdf>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2016). Mineral Commodity Summaries 2016. U.S. Geological Survey. Récupéré de <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2016/mcs2016.pdf>

Widmer, J. D., Martin, R. et Kimiabeigi, M. (2015). Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. *Sustainable Materials and Technologies*, 3, 7-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2015.02.001>