

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**L'exploitation des terres rares au Groenland :
Enjeux et risques pour l'environnement**

Mémoire de Fin d'Etude présenté par
BEN LAHOUCINE, Nathalie
en vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Finalité Gestion de l'Environnement Ma120ECTS ENVI5G-T

Année académique : 2013-2014

Directrice : N. Mattielli

Co-directrice : M.F. Godart

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas pu être réalisé sans l'aide précieuse de nombreuses personnes. Je tiens donc à remercier chaleureusement toutes celles et ceux qui m'ont accompagnée tout au long de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent tout d'abord à **Nadine Mattielli** et à **Marie-Françoise Godart**, co-directrices de ce mémoire, pour leurs conseils avisés.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à la Fondation polaire, et plus particulièrement à **Joseph Cheek**, pour m'avoir invitée au Symposium Arctic Futures 2013 et pour m'avoir permise de rencontrer et de discuter de mon sujet avec **Minik Rosing**, président du Service géologique du Danemark et du Groenland.

Un grand merci à **Philippe Henry**, directeur de chez Hydrométal, pour avoir partagé ses connaissances sur le recyclage des terres rares avec moi.

Une pensée particulière est adressée à ma famille et mes amis, qui m'ont soutenue durant toute la réalisation de ce travail.

Que tous ceux qui ont participé à ce mémoire d'une manière ou d'une autre, sans jamais compter leur temps, trouvent également ici l'expression de ma reconnaissance.

TABLE DES MATIERES

Résumé	1
Introduction	1
Chapitre 1 : Les terres rares	3
1. Les terres rares : Qu'est-ce que c'est ?	4
2. Propriétés et utilisations	5
3. Gisements/minerais de terres rares	9
3.1. Gisements primaires	9
3.1.1. Gisements associés aux carbonatites	9
3.1.2. Gisements associés aux roches ignées alcalines	10
3.1.3. Gisements de type oxyde de fer- cuivre- or (IOCG)	10
3.2. Gisements secondaires	10
3.2.1. Placers	10
3.3. Principaux minerais	11
4. Quelques chiffres	12
4.1. Réserves en éléments terres rares	12
4.2. Production de terres rares	14
4.2.1. Le monopole chinois	15
4.3. Demande en terres rares	16
4.4. Croissance des prix	18
5. Problématique : Des matériaux critiques	19
6. Question de recherche et hypothèses	21
7. Méthodologie	22
Chapitre 2 : Les terres rares au Groenland	23
Introduction	24
1. La fonte des glaces arctiques	24
1.1. Recul de la banquise arctique	24
1.2. Fonte de la calotte glaciaire du Groenland	25
2. Des ressources naturelles qui deviennent accessibles	27
3. Les terres rares au Groenland	28
4. Un intérêt croissant pour les terres rares au Groenland	31
Conclusion	35
Partie 3 : Les risques environnementaux	36
Introduction	37
1. Aperçu général des techniques de production des terres rares	37
2. Exemples concrets d'exploitation de terres rares et risques environnementaux associés	40

2.1.	Choix des cas d'étude	40
2.2.	Bayan Obo	41
2.2.1.	Description générale	41
2.2.2.	Méthodes d'extraction et de traitement utilisées à Bayan Obo	41
2.2.3.	Impacts environnementaux	41
2.3.	Mountain Pass	43
2.3.1.	Description générale	43
2.3.2.	Méthodes d'extraction et de traitement utilisées à Mountain Pass	43
2.3.3.	Impacts environnementaux	44
3.	Exemple de projet d'exploitation au Groenland : Kvanefjeld	44
3.1.	Localisation	44
3.2.	Description du projet	45
3.2.1.	L'usine de transformation	46
3.2.2.	La raffinerie	46
3.2.3.	Le port	46
3.2.4.	Le parc à résidus	47
3.2.5.	Les logements	47
3.2.6.	Autres infrastructures	47
3.2.7.	Synthèse visuelle	47
3.3.	Méthodes de traitement utilisées à Kvanefjeld	48
4.	Risques environnementaux liés à l'exploitation de terres rares au Groenland	50
4.1.	Constat général	51
4.2.	Impacts environnementaux des différentes étapes de production	51
4.2.1.	Résidus de flottation	54
4.2.2.	Déchets radioactifs	56
4.3.	Écotoxicité des ETR	56
4.3.1.	Biodisponibilité et bioaccumulation	57
4.3.2.	Écotoxicité	57
5.	L'Arctique et le Groenland : Des régions vulnérables	58
5.1.	Une biodiversité fragile	58
5.2.	Sensibilité aux pollutions	59
	Conclusion	60
	<i>Partie 4 : Discussion</i>	62
	Introduction	63
1.	Un paradoxe flagrant	63
2.	Mise en route d'un projet d'exploitation	64
3.	Rentabilité des mines	64
4.	Perspectives et pistes de solutions	65
4.1.	Recyclage	65
4.2.	Substitution	68
5.	Bref aperçu des aspects législatifs	69
	Conclusion	70
	<i>Conclusion</i>	71

Bibliographie _____ 73

Liste des annexes _____ 82

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Figure 1 : Les éléments terres rares (en vert) dans le tableau de Mendeleïev	4
Figure 2 : Demande mondiale de terres rares pour diverses applications en 2011 et prévisions pour 2016 (en tonnes).....	6
Figure 4 : Réserves mondiales de terres rares en 2013.....	13
Figure 5 : Réserves mondiales d'yttrium en 2013	14
Figure 6 : Production et exportation des terres rares par la Chine, de 2006 à 2011.....	15
Figure 7 : Évolution et prévision de la demande et de la production de terres rares.....	17
Figure 8 : Résultats de l'évaluation des matières premières critiques pour l'Union Européenne	20
Figure 13 : Etendue de la banquise de l'hémisphère Nord en septembre	25
Figure 14 : Évolution mensuelle de la masse de glace du Groenland (en Gigatonnes) estimée à partir des mesures des satellites GRACE	26
Figure 15 : Variation de la masse de glace du Groenland de 2004 à 2013.....	26
Figure 16 : Cycle annuel de fonte de la calotte glaciaire du Groenland en 2012 et 2013 par rapport à la moyenne entre 1981 et 2010.....	27
Figure 17 : Localisation des environnements favorables à l'accumulation d'ETR au Groenland	29
Figure 18 : Estimations des ressources en terres rares pour une sélection de gisements en-dehors de la Chine, conformément au Code JORC.....	31
Figure 19 : Distribution des ETR dans le gisement de Kvanefjeld.....	31
Figure 21 : Aperçu des principales étapes de production des terres rares à Mountain Pass....	43
Figure 22 : Localisation du gisement de Kvanefjeld, Groenland.....	45
Figure 23 : Aperçu des infrastructures clés du projet minier de Kvanefjeld	48
Figure 24 : Principales étapes de traitement des terres rares extraites à Kvanefjeld.....	48
Figure 25 : Etapes de traitement réalisées dans la raffinerie de Kvanefjeld.....	50
Figure 26 : Risques environnementaux associés aux différentes étapes de production des terres rares.....	52
Figure 27 : Représentation schématique du gisement de Kvanefjeld après plusieurs années d'extraction.....	53

Figure 28 : Sites pollués au Groenland, à l'intérieur du cercle polaire arctique.....	59
Figure 29 : Ligne de temps typique d'un projet d'exploitation de terres rares	64
Figure 30 : Taux de recyclage pour une sélection de métaux.....	67

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales utilisations des différents ETR.....	8
Tableau 2 : Demande globale en terres rares et part de la demande chinoise dans la demande globale.....	17

LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS

ACIA	Arctic Climate Impact Assessment
AMAP	Arctic Monitoring and Assessment Programme
BGS	British Geological Survey
BMP	Bureau of Minerals and Petroleum in Greenland
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CNUCED	Conférence des Nations unies sur le Commerce et le Développement
DoE	Department of Energy (US)
ETR	Éléments terres rares
ELAW	Environmental Law Alliance Worldwide
ENDERI	Entreprises, défense et relations internationales
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GME	Greenland Minerals and Energy
GEUS	Geological Survey of Denmark and Greenland
IMCOA	Industrial Minerals Company of Australia
IOCG	Gisement oxyde de fer-cuivre-or
MEP	Ministère de Protection Environnementale
MRN	Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles (Canada)
NAS	The National Academy of Science
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NiMH	Nickel-metal hydride
NSIDC	National Snow and Ice Data Center
PIPAME	Pôle Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations Economiques
POP	Polluants Organiques Persistants
RCP	Representative Concentration Pathway
UE	Union Européenne
UNEP/PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement l'environnement
UNESCO	Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture
USGS	United States Geological Survey

RESUME

Les terres rares sont un groupe de 17 métaux aux propriétés uniques présentes dans de nombreuses applications du quotidien comme les téléphones portables, les ordinateurs, les téléviseurs à écran plat, les voitures hybrides ou les ampoules basse consommation. Bien que les réserves de terres rares sur la planète soient suffisantes, peu de gisements ont la taille, la composition et la concentration nécessaires pour être exploités de façon économiquement rentable. La Chine détient encore aujourd'hui le quasi monopole de leur production.

De nombreux gouvernements ont classé les terres rares sur leur liste des matières premières les plus critiques. En effet, depuis plusieurs années, la Chine a imposé des quotas à l'exportation pour ces éléments et les a progressivement réduits. Or, la demande en terres rares est amenée à augmenter dans les prochaines années en raison de leur utilisation croissante dans diverses applications. Les gouvernements et les industries craignent donc une pénurie de leurs approvisionnements et cherchent de nouvelles sources d'approvisionnement pour satisfaire leurs besoins.

De nombreux acteurs s'intéressent au Groenland, dont les ressources en terres rares sont abondantes et récemment devenues plus accessibles du fait de la fonte des glaces arctiques et de la calotte polaire. Aucune mine de terres rares n'est actuellement en activité sur le sol groenlandais, mais les projets d'exploration sont nombreux et, certains d'entre eux arrivent à des stades avancés, proche des premières extractions.

Le problème réside dans le fait que, partout ailleurs, l'exploitation des terres rares a résulté en de graves dommages écologiques. La question qui se posait ici était donc de connaître les risques environnementaux que le Groenland encourrait s'il venait à produire ces éléments sur son sol.

Tous les auteurs s'accordent sur le fait que la production de terres rares est une activité extrêmement polluante et destructrice de l'environnement. Les rejets nocifs dans l'environnement sont de diverse nature, les plus inquiétants étant les déchets radioactifs. Il y a toutefois un manque de connaissance sur les impacts précis de ces exploitations, et davantage de recherche dans ce domaine serait nécessaire afin de les quantifier.

Des alternatives à l'extraction minière sont-elles possibles ? Il semblerait que le potentiel des principales alternatives à l'extraction des terres rares, à savoir le recyclage et la substitution, soit limité et qu'elles ne suffiront pas à assurer un approvisionnement suffisant en ces éléments dans un futur proche. La mise en route de nouveaux gisements apparaît comme inévitable, d'où l'importance de mettre en place des normes environnementales strictes réglementant ces activités, en attendant que les recherches dans ce domaine évoluent et puissent proposer des solutions efficaces. La question est de savoir si le Groenland sera capable d'imposer des normes de protection environnementale suffisantes face à la pression qui pèse sur ses ressources naturelles.

INTRODUCTION

Les terres rares ? Pour de nombreuses personnes, ce terme n'évoque rien. Pourtant, elles font partie de notre quotidien à tous ! Présentes dans de nombreuses applications telles que les téléphones portables, les ordinateurs, les téléviseurs à écran plat, les voitures hybrides ou les ampoules basse consommation, elles sont parfois indispensables à leur existence même.

Qu'est-ce que c'est ? Il s'agit de 17 métaux aux propriétés uniques regroupés sous le terme général de « terres rares ». Leur nom est plutôt trompeur puisque ces éléments ne sont en réalité ni des terres, ni rares. On les appelle ainsi car, bien qu'ils soient largement répandus dans l'écorce terrestre, leur concentration est généralement trop faible pour qu'ils soient exploitables économiquement. Les terres rares sont donc difficiles à extraire et à traiter et, bien qu'elles soient utilisées dans la plupart des technologies vertes, leur production est extrêmement polluante.

En raison de leurs nombreuses utilisations, leur demande a augmenté ces dernières années et il est prévu qu'elle continue de croître. Leur production est presque essentiellement concentrée en Chine. Or, le pays a récemment imposé des quotas d'exportation sur ces matières premières et les a progressivement diminués. Les gouvernements et les industries ont commencé à craindre pour leurs approvisionnements et, voyant en plus que les prix s'affolaient, se sont lancés dans la recherche de nouveaux gisements hors Chine.

À côté de cela, un autre événement important est en cours : la fonte des glaces arctiques et de la calotte polaire. Alors que la majeure partie du monde s'inquiète d'un tel phénomène, d'autres y voient une opportunité d'exploiter des ressources naturelles autrefois inaccessibles. Il se trouve justement que le Groenland dispose de réserves de terres rares assez importantes. Tous les regards se portent désormais sur cette région du monde.

La question de recherche développée dans le cadre de ce mémoire sera donc la suivante : Quels sont les enjeux et les risques environnementaux liés au développement d'une exploitation de terres rares au Groenland ?

La première partie de ce travail sera exclusivement consacrée aux terres rares et consistera à apporter une meilleure compréhension du contexte dans lequel s'inscrivent ces éléments. Les raisons qui font qu'ils ont particulièrement attiré l'attention ces dernières années seront détaillées, ainsi que les enjeux qui y sont liés.

Ensuite, une deuxième partie mettra l'accent sur les terres rares au Groenland. La situation actuelle concernant la fonte des glaces sera évaluée. Cela permettra d'établir dans quelle mesure les ressources minérales du Groenland sont ou deviendront accessibles. Le potentiel en terres rares du territoire sera également évalué et permettra de déterminer et s'il y a lieu de s'inquiéter d'une possible arrivée en masse de compagnies minières lorgnant sur ces richesses.

La troisième partie aura pour but de faire le point sur les risques environnementaux que pourrait engendrer une future exploitation des terres rares au Groenland. Afin de mieux comprendre les menaces qui pèsent sur le territoire, il était important d'avoir un aperçu général des principales méthodes utilisées pour produire ces éléments. Aucune mine de terres rares n'étant pour le moment en activité sur le sol groenlandais, deux exemples d'exploitations existantes étrangères ayant générés des dommages à l'environnement ont été présentés afin d'avoir une idée des risques encourus et des erreurs à ne pas reproduire. Si aucune exploitation n'a encore atteint les phases d'extraction, un projet en particulier en est tout de même à un stade avancé d'exploration. Celui-ci sera décrit de façon à pouvoir imaginer l'ampleur qu'un projet d'exploitation des terres rares au Groenland pourrait prendre. Les risques environnementaux et la vulnérabilité de l'île seront finalement développés.

Dans une dernière partie, une réflexion sera initiée sur la faisabilité et le réel besoin de développer de nouveaux gisements de terres rares, qui plus est dans des régions aussi fragiles que le Groenland. Le potentiel de différentes solutions alternatives à l'extraction minière des terres rares sera examiné. La capacité du Groenland à réglementer cette nouvelle activité minière et à prendre les décisions adéquates afin de limiter les impacts sur l'environnement sera également discutée.

CHAPITRE 1 : LES TERRES RARES

1. Les terres rares : Qu'est-ce que c'est ?

Les terres rares sont un groupe de 17 éléments chimiques métalliques repris dans le tableau périodique de Mendeleïev (fig. 1). Elles rassemblent 15 lanthanides¹ (le lanthane, le cérium, le praséodyme, le néodyme, le prométhéum, le samarium, l'europium, le gadolinium, le terbium, le dysprosium, l'holmium, l'erbium, le thulium, l'ytterbium et le lutétium) auxquels s'ajoutent deux autres éléments, le scandium et l'yttrium, en raison de leurs propriétés chimiques voisines car ils se situent dans la même colonne de classification périodique. (Degeorges, 2013 ; Jordens et al., 2013 ; Liao et al., 2012 ; Klyuchaner et al., 2013 ; Yang et al., 2013)

atomic number																					
Symbol																					
standard atomic weight																					
1 H 1.007 - 1.009																	2 He 4.003				
3 Li 6.938 - 6.997	4 Be 9.012															5 B 10.80 - 10.83	6 C 12.00 - 12.02	7 N 14.00 - 14.01	8 O 15.99 - 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
11 Na 22.99	12 Mg 24.31															13 Al 26.98	14 Si 28.08 - 28.09	15 P 30.97	16 S 32.05 - 32.06	17 Cl 35.44 - 35.46	18 Ar 39.95
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.87	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.38(2)	31 Ga 69.72	32 Ge 72.63	33 As 74.92	34 Se 78.96(3)	35 Br 79.90	36 Kr 83.80				
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.96(2)	43 Tc	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3				
55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	57 - 71 lanthanoids	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.8	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.3 - 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po	85 At	86 Rn				
87 Fr	88 Ra	89 - 103 actinoids	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn										
Lanthanoids		57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.1	71 Lu 175.0					
Actinoids		89 Ac	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr					

Figure 1 : Les éléments terres rares (en vert) dans le tableau de Mendeleïev (Hatch, 2013)

Les éléments terres rares (ETR²) sont souvent subdivisés en deux sous-groupes selon leur masse atomique : d'un côté les terres rares légères, aussi appelées terres cériques, qui comprennent les éléments allant du lanthane à l'europium, et de l'autre les terres rares lourdes, dites aussi terres yttriques, qui comprennent les autres lanthanides, du gadolinium au lutétium, ainsi que l'yttrium. (Chakhmouradian et Wall, 2012 ; Jordens et al., 2013 ; MRN, 2013) Le scandium n'est, quant à lui, généralement inclus dans aucune de ces deux catégories. (Chakhmouradian et Wall, 2012 ; Jordens et al., 2013) Cette distinction est importante notamment car chaque catégorie possède des niveaux d'utilisation et de demande différents. Les terres rares légères sont ainsi plus abondantes que les terres rares lourdes. Qui plus est, les gisements d'ETR sont généralement soit riches en terres rares légères, soit en

¹ Lanthanides = Les 15 éléments chimiques du tableau périodique dont le numéro atomique se situe entre 57 et 71. (Yang et al., 2013)

² Par facilité, l'acronyme « ETR » sera utilisé pour désigner les « éléments terres rares ».

terres rares lourdes, d'où l'intérêt de connaître le groupe auquel elles appartiennent. (Clamadieu et Butstraen, 2010 ; Schüler et al., 2011) Notons toutefois que cette classification est discutable. En effet, il n'existe pas de définition claire qui fasse consensus quant aux éléments qui appartiennent à l'une ou l'autre catégorie. Il est donc nécessaire d'utiliser ces données avec précaution.

L'appellation « terres rares » provient de l'époque de leur découverte en 1787 : « terres » car c'était le terme utilisé pour désigner les oxydes réfractaires au feu, et « rares » parce qu'elles étaient présentes en petites quantités, laissant supposer – à tort – qu'il devait donc y en avoir peu dans le reste du monde. (Massari et Ruberti, 2013) Ainsi, bien que leur nom suggère le contraire, les terres rares sont pourtant assez abondantes dans l'écorce terrestre. Le cérium est ainsi l'élément le plus répandu du groupe. (Chakhmouradian et Wall, 2012) Il est présent en quantité équivalente au cuivre et est même 4 fois plus abondant que le plomb. (Massari et Ruberti, 2013) D'autres, par contre, sont moins répandues. C'est le cas du thulium et du lutétium, les deux terres rares les moins nombreuses, qui ont toutefois des concentrations 200 fois supérieures à l'or³. (Massari et Ruberti, 2013) La concentration des ETR varie fortement d'un élément à l'autre et constitue généralement moins de 1% de la roche hôte. (Corniou, 2012) C'est là que réside la difficulté : alors que certains ETR sont très répandus, la plupart d'entre eux ne sont pas trouvés en concentration suffisante pour être économiquement exploitables. (Humphries, 2013 ; Jordens et al., 2013) De plus, il existe environ 200 types de roches différentes qui contiennent des terres rares. (Corniou, 2012 ; Jordens et al., 2013) Or, on ne sait les extraire qu'à partir de 3 ou 4 d'entre elles. (Corniou, 2012) Il est donc assez compliqué de mettre un nouveau gisement en production, ce qui amplifie leur « rareté ». Les ETR cumulent aussi d'autres défauts qui les rendent si difficiles à exploiter. Ainsi, la plupart des minerais de terres rares sont liés à des éléments radioactifs, comme l'uranium ou le thorium. (Corniou, 2012) On ne les trouve donc jamais à l'état pur, ils ne sont pas facilement séparables et les processus d'extraction, de séparation et de raffinement sont extrêmement longs et polluants. (Degeorges, 2012)

2. Propriétés et utilisations

Les terres rares, bien que peu connues du grand public, sont pourtant présentes dans une multitude d'applications. En effet, elles sont utilisées dans bon nombre d'objets de notre quotidien, comme les téléphones portables, les téléviseurs à écran plat, ou même les billets de banque. On les retrouve également dans les matériels militaires, pour certains procédés de fabrication industriels et dans les technologies vertes. À titre d'exemple, la fabrication du moteur et de la batterie du modèle de voiture Prius de Toyota nécessite 10 à 15 kg de terres rares, du lanthane en particulier ; les ampoules à basse consommation n'existeraient pas sans terbium, et une turbine d'éolienne de 5 mégawatts utilise près de 800 kg de néodyme et 200

³ Un tableau comparatif de la concentration en ETR, métaux industriels et métaux précieux dans la croûte terrestre est disponible en annexe I.

kg de dysprosium. (Arte, 2014 ; Mampaey, 2012 ; Paillard, 2011) Sans elles, notre mode de vie serait donc probablement très différent de ce à quoi il ressemble actuellement.

Les différents ETR possèdent des propriétés très voisines les unes des autres. « *En effet, leur structure électronique est identique en ce qui concerne leurs couches externes d'électrons, ce qui leur confère des propriétés chimiques très proches.* » (Clamadieu et Butstraen, 2010) Cependant, « *chaque élément diffère du précédent en ceci qu'il possède un électron supplémentaire dans sa couche profonde d'électrons. Il s'agit là d'une propriété tout à fait spécifique à ces éléments : cette propriété est à l'origine du caractère irremplaçable des terres rares dans nombre de leurs applications.* » (Clamadieu et Butstraen, 2010)

La configuration des électrons dans la structure atomique confère donc aux terres rares des propriétés particulièrement intéressantes, dont les principales sont leurs propriétés électroniques, optiques, magnétiques ou encore catalytiques. (Massari et Ruberti, 2013) Ces propriétés physiques et chimiques uniques les rendent indispensables au fonctionnement d'une gamme sans cesse croissante d'applications. Bien qu'utilisées en très petites quantités, elles améliorent considérablement la performance des produits dans lesquels elles sont présentes et sont bien souvent essentielles à leur existence même. (Golev et al., 2014) Leurs propriétés rendent également possible la miniaturisation (Barreau et al., 2013), enjeu essentiel dans un monde où l'infiniment petit règne en maître. Actuellement, il n'y a pas ou peu d'éléments qui peuvent se substituer aux terres rares et délivrer les mêmes performances.

Selon Kingsnorth (2011, cité par Hatch, 2013), expert réputé internationalement dans le domaine des terres rares, 20% des ETR étaient utilisés en 2011 pour la conception d'aimants permanents, 20% servent à obtenir des alliages métalliques ou à améliorer leurs propriétés et 19% sont utilisés comme catalyseurs. Ce sont donc les trois principales applications des terres rares. La part des aimants permanents dans la demande globale va prendre encore plus d'importance dans les prochaines années puisque les estimations indiquent qu'elle va passer de 21.000 tonnes en 2011 à 36.000 tonnes d'ici 2016, représentant 23% de la demande estimée. (Kingsnorth (IMCOA), 2011, cité par Hatch, 2013) La figure 2 montre les différentes utilisations des terres rares et détaille leur importance dans la demande globale en 2011 et les estimations pour 2016.

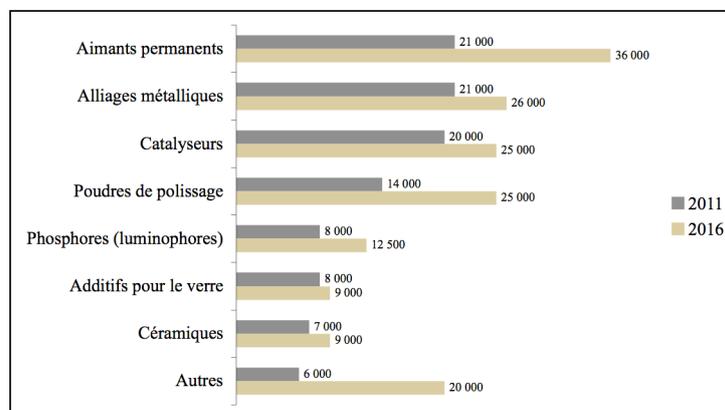


Figure 2 : Demande mondiale de terres rares pour diverses applications en 2011 et prévisions pour 2016 (en tonnes) (adapté de Hatch, 2013)

Les ETR sont donc principalement utilisés pour leurs propriétés magnétiques dans les aimants permanents de type Néodyme-Fer-Bore (NdFeB). Il existe également une autre sorte d'aimant à base de terres rares, moins utilisée, composée d'un alliage samarium-cobalt (SmCo). Dans les deux cas, ce sont des aimants de très petite taille mais extrêmement puissants, caractéristiques indispensables à la miniaturisation. Ils se retrouvent dans de nombreux produits tels que les disques durs d'ordinateurs, les écouteurs ou encore les systèmes de stockage de données comme ceux présents dans les iPods. Les aimants permanents jouent également un rôle déterminant dans les technologies vertes puisqu'ils sont par exemple nécessaires à la fabrication des éoliennes ou encore des moteurs de voitures hybrides et électriques. (BGS, 2011 ; Clamadieu et Butstraen, 2010 ; Côté et al., 2012)

Les terres rares sont ensuite utilisées en métallurgie dans la composition d'alliages. La forme la plus ancienne de cette application est le mischmétal, un alliage de terres rares métalliques (La, Ce, Pr, Nd) surtout présent dans les pierres à briquet mais qui sert aussi d'additif dans les industries de la fonte et de l'acier. Certains ETR rentrent également dans la composition de superalliages résistant à de hautes températures. D'autres sont aussi utilisés, en tant qu'alliages toujours, dans les batteries au nickel-métal hydride (NiMH), nécessaires au fonctionnement de nombreux produits électroniques. (BGS, 2011 ; Clamadieu et Butstraen, 2010 ; Côté et al., 2012)

Les propriétés catalytiques des terres rares sont, elles, essentielles au craquage catalytique en lit fluidisé pour le raffinage du pétrole ainsi que pour les convertisseurs catalytiques utilisés dans l'industrie automobile. Le rôle des ETR dans ces processus est particulièrement important puisqu'ils permettent d'assurer une combustion plus propre et une réduction des émissions. (BGS, 2011 ; Clamadieu et Butstraen, 2010 ; Côté et al., 2012)

Les terres rares sont également nécessaires dans certains procédés industriels : elles permettent notamment de réaliser des polissages de haute qualité, très utiles dans la fabrication des écrans de téléviseurs, par exemple. (BGS, 2011 ; Clamadieu et Butstraen, 2010 ; Côté et al., 2012)

D'autres applications sont, quant à elles, dérivées des propriétés optiques des terres rares. Celles-ci sont ainsi utilisées dans la composition de luminophores, substances qui émettent de la lumière lorsqu'elles sont soumises à une excitation extérieure. Les luminophores à base de terbium produisent une lumière verte tandis que ceux à base d'euporium émettent soit une lumière rouge, soit une lumière bleue en fonction de leur degré d'oxydation. Ces luminophores contenant des terres rares se retrouvent dans les lampes à basse consommation, les écrans plats à cristaux liquides (LCD), les écrans plasma... (BGS, 2011 ; Clamadieu et Butstraen, 2010 ; Côté et al., 2012)

Les propriétés optiques trouvent aussi une utilité dans l'industrie du verre. De nombreux produits, tels que les lentilles optiques ou les appareils photos numériques, contiennent du verre enrichi aux terres rares. Ces dernières confèrent au verre certaines qualités bien spécifiques : elles permettent la coloration ou la décoloration du verre, une modification de

l'indice de réfraction, l'absorption des rayons ultra-violet... (BGS, 2011 ; Clamadieu et Butstraen, 2010 ; Côté et al., 2012)

Loin d'être exhaustive, cette synthèse des propriétés et utilisations des terres rares montre la diversité des applications et la nécessité de sécuriser l'approvisionnement de ces éléments. Chacune de ces applications requiert l'emploi d'ETR spécifiques. (Jordens et al., 2013) Le tableau 3 résume les principales utilisations des différents ETR. « *Etant donné le caractère incontournable des terres rares dans de nombreuses applications, l'enjeu, pour les années à venir, est le développement de gisements hors de Chine, afin de compléter la production mondiale actuelle et de sécuriser un approvisionnement en terres rares indispensable à l'industrie.* » (Clamadieu et Butstraen, 2010)

ÉLÉMENTS	PRINCIPALES UTILISATIONS
Lanthane (La)	Catalyseurs pour automobiles et avions, moteurs hybrides, alliages métalliques, verres optiques, luminophores.
Cérium (Ce)	Catalyseurs automobiles, raffinage du pétrole, alliages métalliques, polissage du verre.
Praséodyme (Pr)	Aimants, alliages métalliques pour les moteurs d'avion.
Néodyme (Nd)	Aimants, lasers, catalyseurs automobiles, raffinage du pétrole, disques durs pour les ordinateurs portables, écouteurs, moteurs hybrides.
Prométhéum (Pr)	Batteries nucléaires, sources de rayons X portables, lasers.
Samarium (Sm)	Aimants
Europium (Eu)	Luminophores, couleur rouge et bleue pour la télévision et les écrans d'ordinateurs.
Gadolinium (Gd)	Imagerie par résonance magnétique (IRM), alliages métalliques.
Terbium (Tb)	Luminophores, aimants permanents, alliages métalliques.
Dysprosium (Dy)	Aimants permanents, moteurs hybrides, lasers.
Holmium (Ho)	Coloration du verre, lasers.
Erbium (Er)	Luminophores, fibres optiques, lasers.
Thulium (Tm)	Appareils médicaux émettant des rayons X.
Ytterbium (Yb)	Lasers, alliages à base d'acier.
Lutétium (Lu)	Catalyseurs pour l'industrie pétrolière.
Scandium (Sc)	Alliages métalliques, éclairage, lasers.
Yttrium (Y)	Efficacité du carburant, lasers, appareils de communication à micro-ondes, alliages métalliques.

Tableau 1 : Principales utilisations des différents ETR (adapté de Christmann, 2011 ; EPA, 2012 ; Hayes-Labruto et al., 2013 ; Humphries, 2013)

3. Gisements/minerais de terres rares

Pour bien comprendre dans quels environnements se forment les terres rares, il est important de revenir sur quelques définitions de base.

Définitions

- **Roche** : « *Tout matériau constitutif de l'écorce terrestre, le plus souvent dur et cohérent, formé d'un assemblage de minéraux présentant une certaine homogénéité statistique.* » (Moureau et Brace, 1993)
 - Les **roches ignées**, aussi appelées roches magmatiques, découlent du refroidissement et de la cristallisation de magmas. (Biju-Duval, 1999)
 - Les **roches métamorphiques** sont des roches qui, comme leur nom l'indique, ont subi une métamorphose, c'est-à-dire une transformation suite à des conditions particulières de température et de pression. (Biju-Duval, 1999)
 - Les **roches sédimentaires** résultent, quant à elles, de « *l'accumulation de minéraux à la surface de l'écorce terrestre* » (Biju-Duval, 1999)
- **Gisement** : « *Lieu où un matériel géologique donné s'est accumulé et que l'on peut exploiter en totalité ou en partie.* » (Berg et al., 2009)
- **Minerai** : « *Roche contenant en proportion notable des minéraux utiles et exploitables pour l'industrie.* » (Berg et al., 2009)
- **Minéral** : « *Corps inorganique simple ou composé, solide à température ordinaire, constituant les roches de l'écorce terrestre.* » (Berg et al., 2009)

Les dépôts de terres rares se produisent dans une large variété de roches ignées, sédimentaires et métamorphiques. (BGS, 2011) Les environnements qui contiennent des terres rares peuvent être divisés en deux catégories : les gisements primaires, associés à des processus magmatiques et hydrothermaux, et les gisements secondaires, issus de processus sédimentaires. Les gisements de terres rares les plus intéressants d'un point de vue économique sont généralement associés à des processus magmatiques et sont principalement liés aux roches ignées alcalines et aux carbonatites. (BGS, 2011)

3.1. Gisements primaires

3.1.1. Gisements associés aux carbonatites

Les carbonatites sont des roches ignées qui contiennent plus de 50% de carbonates. Elles sont considérées comme originaires de magmas venant du manteau supérieur riches en dioxyde de carbone et pauvre en silice. (BGS, 2011) « *Ces carbonatites forment des massifs intrusifs de petite dimension (3 à 5 km) à l'intérieur des complexes alcalins.* » (MRN, 2013) On recense plus d'une centaine d'intrusions carbonatitiques dans le monde. (Castor, 2008 ; BGS, 2011 ; MRN, 2013) Ces gisements sont particulièrement enrichis en terres rares légères concentrées dans des minerais tels que la bastnaésite, l'allanite, l'apatite ou encore la monazite.

Exemple de gisements associés aux carbonatites : Mountain Pass (Etats-Unis), Bayan Obo (Chine).

3.1.2. Gisements associés aux roches ignées alcalines

Les roches ignées alcalines ultrabasiqes ou felsiques (roches riches en potassium et en sodium) constituent elles aussi d'excellents gisements d'ETR. On peut aller plus loin en distinguant d'autres catégories telles que les roches ignées peralcalines qui se caractérisent par des proportions moléculaires en soude et en potasse plus élevées que celles en alumine. (BGS, 2011) Elles sont donc sursaturées en ions alcalins Na et/ou K et sous saturées en alumine. Plusieurs dépôts de terres rares sont associés à ce type de roches. (Castor, 2008 ; MRN, 2013) Ces gisements, bien qu'ils constituent de gros volumes, ne contiennent que de faibles teneurs en ETR (Orris et Gauch, 2002, cités par MRN, 2013), mais sont bien souvent enrichis en terres rares lourdes. (BGS, 2011)

Exemple de gisement associé aux roches ignées alcalines : Le complexe alcalin d'Ilimaussaq, situé dans le sud du Groenland, contient des gisements potentiellement exploitables d'ETR. (BGS, 2011)

3.1.3. Gisements de type oxyde de fer- cuivre- or (IOCG)

On retrouve également parfois des concentrations en ETR dans des gisements de type IOCG, ou dépôts Fe-ETR. Ils se forment à partir d'une large gamme de roches et contiennent des minerais de terres rares tels que la bastnaésite, la monazite, le xénotime, l'allanite, la parasite et l'apatite. (BGS, 2011) Les terres rares y sont exploitées en tant que sous-produits de l'extraction du fer, du cuivre et de l'or. (MRN, 2013)

Exemple de gisements de type IOCG : Olympic Dam (Australie).

3.2. Gisements secondaires

3.2.1. Placers

Les placers sont des gisements sédimentaires, généralement d'origine alluvionnaire. Les minéraux lourds sont transportés par le courant de rivière avec du sable et des graviers, et se déposent dans des sites spécifiques (de moindre énergie) de lits anciens ou récents appelés placers alluviaux. (BGS, 2011) Ces gisements peuvent contenir des concentrations économiquement exploitables d'ETR. Les placers d'âge tertiaire (entre -65 et -2,5 millions d'années) et quaternaire (de -2,5 millions d'années jusqu'à notre ère) sont les plus susceptibles de renfermer des terres rares. Toutefois, des dépôts plus vieux datant du précambrien (de la formation de la Terre à -540 millions d'années), appelés paléoplacers, ont aussi été reconnus comme renfermant des ETR. (BGS, 2011 ; MRN, 2013) Orris et Gauch (2002, cités par BGS, 2011) ont identifié plus de 300 placers contenant des ETR à travers le monde. Les minerais d'ETR que l'on retrouve dans ce type de gisement sont la monazite, le xénotime, l'allanite ou encore la loparite. (Möller, 1986, cité par BGS, 2011)

3.3. Principaux minerais

Les terres rares se retrouvent dans une grande variété de minerais. On en dénombre ainsi environ 200 qui en contiendraient, en association avec d'autres minéraux. Cependant, seul un très petit nombre d'entre eux sont ou pourraient devenir exploitables commercialement. Le potentiel économique d'un gisement de terres rares est fortement influencé par sa minéralogie ainsi que par les processus géologiques qui l'a formé. Les détails à ce sujet ne seront pas abordés dans le cadre de ce mémoire, le but ici étant seulement d'avoir une idée générale des environnements favorables à la découverte de gisements d'ETR. Notons simplement que l'ensemble des terres rares sont généralement mêlées dans les différents minerais mais dans des proportions différentes et avec une prédominance soit des terres rares lourdes, soit des terres rares légères. (Clamadieu et Butstraen, 2010)

Les trois principaux minerais à partir desquels sont actuellement extraites les terres rares sont la bastnaésite, la monazite et le xénotime. (BGS, 2011 ; Jordens et al, 2013 ; Wubbeke 2013)

La bastnaésite est un fluorocarbonate d'une teneur d'environ 70% d'oxyde de terres rares. Elle contient principalement des terres rares légères, notamment du Ce, du La, du Pr et du Nd. (Jordens et al, 2013) Il s'agit de la première source d'ETR à travers le monde (Jordens et al., 2013). La bastnaésite est exploitée aux Etats-Unis, dans le gisement de Mountain Pass, ainsi qu'en Chine dans le gisement de Bayan Obo (Jordens et al., 2013) comme sous-produit d'une mine de fer (Clamadieu et Butstraen, 2010).

La monazite est un orthophosphate de terres rares et de thorium. (Jordens et al., 2013) Tout comme la bastnaésite, elle comprend surtout des terres rares légères, à la différence près qu'on y trouve moins de La et que les concentrations en Nd et en terres rares lourdes sont plus élevées. (BGS, 2011 ; CNUCED, 2014) La monazite contient également de grandes proportions de thorium et des quantités variables d'uranium. (BGS, 2011 ; Humphries, 2013 ; Jordens et al., 2013) La présence de ces éléments radioactifs engendre un risque de contamination non négligeable. La monazite est exploitée en Australie, en Afrique du Sud, en Chine, au Brésil, en Malaisie, en Inde et représente la seconde source principale de terres rares. (Humphries, 2013)

Le xénotime est un orthophosphate d'yttrium avec des teneurs en oxyde de terres rares estimées à 67% approximativement. On y trouve moins de Ce, de La, de Pr et de Nd que dans les deux précédents minerais. (Jordens et al., 2013) Cette source, bien que moins abondante que la bastnaésite et la monazite, est importante car elle renferme de nombreuses terres rares lourdes. (EPA, 2012 ; Jordens et al., 2013)

4. Quelques chiffres

4.1. Réserves en éléments terres rares

Comme indiqué précédemment, ces métaux, même s'ils sont qualifiés de « rares », sont en réalité assez répandus dans l'écorce terrestre. Les réserves mondiales prouvées sont estimées à environ 100 millions de tonnes⁴ (Jordens et al, 2013) réparties dans 34 pays. (Massari et Ruberti, 2013 ; Chen, 2011) Parmi ceux-ci, 6 sont situés en Europe (dont le Groenland), 14 se trouvent en Asie, 10 sont des pays africains, auxquels s'ajoutent les Etats-Unis, le Canada, le Brésil et l'Australie. (Massari et Ruberti, 2013) La figure 3 illustre la répartition des gisements, réserves et mines de terres rares au niveau mondial et met en évidence les pays avec des ressources importantes.

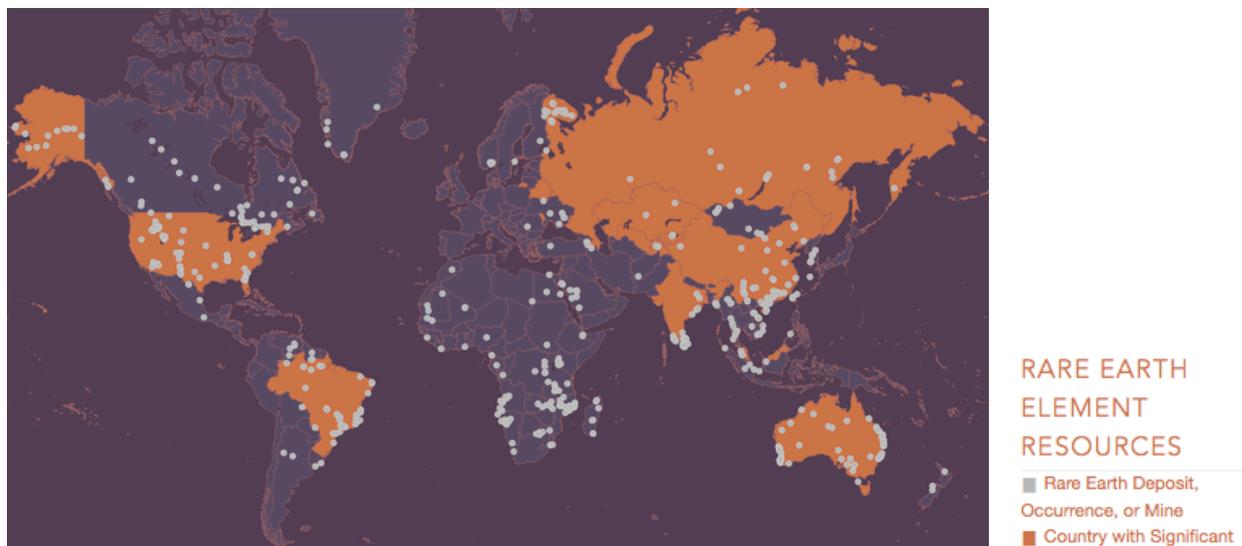


Figure 3 : Répartition mondiale des éléments terres rares (US Department of Energy, 2011)

L'institut d'études géologiques des Etats-Unis (USGS - United States Geological Survey) estimait les réserves mondiales de terres rares à près de 140 millions de tonnes en 2013. (USGS, 2014) Parmi celles-ci, 40% sont détenus par la Chine, 16% par le Brésil, 10% par les Etats-Unis, 2% par l'Inde et 1,5% par l'Australie. Les 30% restants sont répartis entre plusieurs pays dont font partie la Malaisie, le Canada, le Groenland, l'Afrique du Sud, le Malawi ou encore le Vietnam. (USGS, 2014) La figure 4 reprend les données chiffrées des réserves globales de terres rares pour différents pays.

⁴ En comparaison, prenons les réserves mondiales de quelques métaux les plus fréquemment utilisés : Cuivre = 690 millions de tonnes ; Zinc = 250 millions de tonnes ; Or = 54 millions de tonnes ; Argent = 520 millions de tonnes. (USGS, 2014)

Réserves mondiales de terres rares	En tonnes
Chine	55.000.000
Brésil	22.000.000
États-Unis	13.000.000
Inde	3.100.000
Australie	2.100.000
Malaisie	30.000
Autres	41.000.000
Total	136.230.000

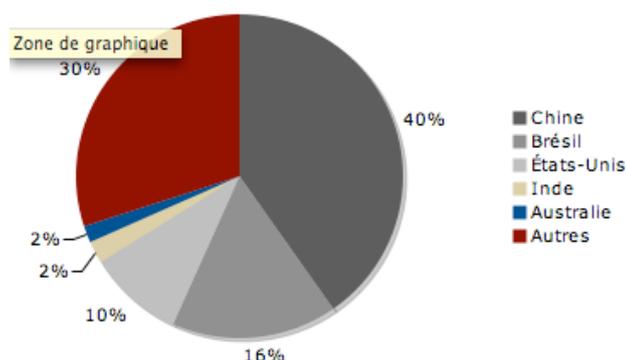


Figure 4 : Réserves mondiales de terres rares en 2013 (USGS, 2014)

En raison d'un manque d'estimations précises, la catégorie « autres » est assez importante et représente une part non négligeable des réserves mondiales. De nombreux pays comme le Canada ou le Groenland disposeraient ainsi de réserves importantes. (Schüler et al., 2011) De manière générale, on recense peu d'exploration et de gisements en Europe.

Il reste donc de grandes incertitudes associées aux réserves de terres rares, tant au niveau de la quantité qu'à celui de la localisation. Les chiffres varient d'ailleurs d'une source à l'autre, ce qui rend difficile la comparaison des statistiques nationales. Les données publiées par l'USGS sont ainsi différentes de celles diffusées par les institutions chinoises ou australiennes. Selon le gouvernement chinois, les réserves du pays ne représenteraient en réalité que 23% des réserves mondiales. (Mampaey, 2012) Ces différences s'expliquent entre autres par un manque d'harmonisation au niveau international de la définition de « réserve ». (Hayes-Labruto et al., 2013 ; Jordens et al., 2012) L'USGS définit la notion de « réserve » comme étant les ressources économiquement exploitables. (USGS, 2014) Celles-ci sont donc susceptibles de diminuer ou d'augmenter en fonction de l'exploitation des gisements actuels, du développement de nouveaux gisements, de la découverte de nouvelles technologies, etc. Entre 2012 et 2013, les réserves sont ainsi passées de 114 millions de tonnes à 140 millions de tonnes suite à l'apport de nouvelles informations de la part des gouvernements brésilien et australien. (USGS, 2014) Il est possible qu'elles continuent à croître en raison de l'exploration et de la découverte de nouveaux gisements. Les chiffres de l'USGS étant largement cités dans la littérature, le choix a été fait ici d'utiliser ces données.

Notons également que ces chiffres donnent un aperçu des réserves de terres rares dans leur globalité. Or, comme nous le verrons par la suite, certains ETR présentent un grand risque de pénurie dans les prochaines années. Il est donc nécessaire de connaître les réserves spécifiques de chaque ETR. Pourtant, on ne trouve aucune estimation pour les terres rares prises individuellement, excepté pour l'yttrium (voir fig. 5). De plus, les gisements de terres rares ne contiennent pas l'ensemble des éléments en quantités équivalentes. La plupart renferment deux éléments en dominance : le lanthane et le cérium. La majorité des gisements comprend également davantage de terres rares lourdes que de terres rares légères. (De Boer et Lammertsma, 2013 ; Schüler et al., 2011) Sachant que la plupart des éléments critiques sont des terres rares lourdes, la prise en compte de ces aspects revêt une importance stratégique.

Réserves mondiales d'yttrium	En tonnes
Chine	220.000
États-Unis	120.000
Australie	100.000
Inde	72.000
Malaisie	13.000
Brésil	2.200
Sri Lanka	240
Autres	17.000
Total	544.440

Figure 5 : Réserves mondiales d'yttrium en 2013 (USGS, 2014)

Malgré des réserves mondiales assez nombreuses, les problèmes environnementaux liés à leur exploitation et la difficulté des processus de séparation limitent grandement leur extraction. (Baldi et al., 2013)

4.2. Production de terres rares

Malgré la présence de terres rares un peu partout dans le monde, ce marché se caractérise par une forte concentration de la production dans un nombre limité de pays. (Remeur, 2013) Entre les années 1960 et 1980, les Etats-Unis assuraient la majeure partie de la production de terres rares. (EPA, 2013 ; Corniou, 2012) En effet, la mine de Mountain Pass située en Californie était le site le plus important de terres rares au monde. Elle a été ouverte dans le début des années '50 par la société Molycorp. (Massari et Ruberti, 2013) A l'époque, la mine fournissait la totalité de la demande aux Etats-Unis et un tiers de la demande globale (EPA, 2013), qui était alors encore relativement faible comparé à aujourd'hui (Corniou, 2012 ; Mampaey, 2012). Vers la fin des années '70, la Chine a commencé à augmenter sa production et est rapidement devenue le nouveau leader. (EPA, 2013) Face à la concurrence chinoise et suite au déversement accidentel d'une quantité importante d'effluents contaminés dans le désert californien, le gisement de Mountain Pass s'est vu contraint de fermer ses portes en 2002. (Corniou, 2012 ; Massari et Ruberti, 2013 ; Wübbecke, 2013) L'adoption de normes environnementales plus strictes a fait augmenter les prix de production devenus non compétitifs face à l'offre chinoise. (Hayes-Labruto et al., 2013 ; Schüller et al., 2011) Notons toutefois que la mine américaine a repris ses activités depuis 2010. (Molycorp, 2013)

Actuellement, la Chine est donc le principal producteur de terres rares. En 2013, 100.000 tonnes d'ETR provenaient de ses mines pour une production globale estimée à un peu plus de 110.000 tonnes⁵. (USGS, 2014) Le pays contrôle ainsi 89% de la production mondiale. En 2010, le monopole de la Chine était encore plus grand puisqu'elle assurait 97% de la

⁵ C'est assez peu comparé à la production mondiale d'autres métaux comme le cuivre (17,9 millions de tonnes en 2013) ou le zinc (13,5 millions de tonnes en 2013). (USGS, 2014)

production ! (Paillard, 2011) La plupart des mines chinoises ne possèdent pas de licence et ne sont pas contrôlées. (Massari et Ruberti, 2013) Les quantités produites illégalement ne sont donc pas reprises dans les chiffres officiels. Cette situation cause également de graves dommages à l'environnement.

4.2.1. Le monopole chinois

La Chine a su éliminer la concurrence et ainsi obtenir un monopole quasi total sur ce marché grâce notamment à de faibles coûts de production. Les contraintes environnementales ont également conduit de nombreux sites à fermer, laissant la Chine, dont les normes environnementales étaient plus laxistes, avoir la main mise sur la production de terres rares. (Christmann, 2011) Le reste du monde est donc devenu presque entièrement dépendant de cet énorme pays pour les approvisionnements en ETR.

Cependant, depuis plusieurs années, le gouvernement chinois a commencé à mettre en place des politiques visant à mieux contrôler la production. (Clamadieu et Butstraen, 2010) A partir de 2006, la Chine a instauré des pratiques visant à limiter ses exportations. Celles-ci ont pris la forme de taxes et de quotas à l'exportation. En 2007, les quotas étaient fixés à 60.173 tonnes d'oxydes de terres rares. Ce montant a progressivement diminué pour atteindre 47.449 tonnes en 2008 et 30.259 tonnes en 2010. (voir fig. 6) En 3 ans, les quotas autorisés ont ainsi été réduits de plus de 50% ! Depuis 2010, ils se sont stabilisés à environ 31.000 tonnes. (Magnier, 2013) Il est important de remarquer que, dans la répartition des quotas, la part des terres rares légères – les plus répandues – augmente et atteint 90% des quotas alors que celle des terres rares lourdes – les plus rares et principalement produites par la Chine – diminue. (Magnier, 2013) Par exemple, pour le premier semestre de l'année 2013, les quotas ont été fixés à 15.501 tonnes, dont 13.563 tonnes pour les terres rares légères et 1.938 tonnes pour les terres rares lourdes.

Figure 6 : Production et exportation des terres rares par la Chine, de 2006 à 2011 (Mampaey, 2012)

	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Official Chinese production quota	86 520	87 020	87 620	82 320	89 200	93 800
USGS reported production	119 000	120 000	120 000	129 000	130 000	112 500
Chinese export quota	61 560	60 173	47 449	50 145	30 259	30 246
Illegal mining	32 480	32 980	32 380	46 680	40 800	18 700
<i>as a % of global production</i>	27%	27%	27%	36%	31%	17%

Sources : China Ministry of Land and Resources, U.S. Geological Survey, Ministry of Commerce of China. Tableau extrait de Marc Humphries, *Rare Earth Elements: The Global Supply Chain*, June 8, 2012, CRS, R41347, <http://www.fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf>

Note : Selon le USGS, la production réelle excède fortement la production officielle en raison des exploitations illégales d'extraction.

En 2009, la Chine a également lancé un plan de développement de l'industrie des terres rares pour la période allant de 2009 à 2015. Celui-ci interdit l'ouverture de nouvelles mines sur le territoire pendant cette période. Ce plan de restructuration prévoit également que les extractions de terres rares soient limitées entre 130.000 et 150.000 tonnes par an, et que les exportations restent en dessous de 35.000 tonnes jusqu'en 2015. (Wübbecke, 2013)

La Chine justifie ces mesures restrictives en invoquant des raisons écologiques. (Rico, 2012 ; Wübbecke, 2013) En effet, alors que les contraintes environnementales dans le reste du monde ont conduit de nombreux sites à fermer, la Chine a continué à exploiter ces métaux. Les autres pays possédant des réserves se sont reposés sur elle pour se fournir en terres rares, à un moindre prix que s'ils avaient exploité leurs propres mines et en déchargeant à l'empire le soin de gérer les dégâts environnementaux générés par ce type d'exploitation. (Mampaey, 2012) La Chine épuise ses ressources pour satisfaire la demande de la majeure partie de la planète et commence à s'inquiéter de la sécurité à long terme de ses propres approvisionnements. (Christmann, 2011)

La Chine motive également ce choix en avançant la nécessité d'éliminer les mines illégales qui nuisent à la préservation des ressources et de l'environnement. (Christmann, 2011)

Derrière ces aspects écologiques se cachent également des enjeux stratégiques. En effet, ces contraintes ne s'appliquent qu'aux matières premières. Les produits à forte valeur ajoutée fabriqués en Chine et contenant des terres rares ne sont, eux, pas soumis à ces restrictions. La Chine chercherait donc à attirer sur son territoire les entreprises étrangères qui ont besoin de ces matières premières et à transférer leurs technologies sur le sol chinois. (Clamadieu et Butstraen, 2010 ; Paillard, 2011)

Quoi qu'il en soit, ces restrictions menacent les approvisionnements des autres pays consommateurs de ces précieux métaux. (Christmann, 2011) Ainsi, en mars 2012, l'UE, le Japon et les Etats-Unis ont déposé une plainte contre la Chine auprès de l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) pour dénoncer ces pratiques sur les exportations. (Wübbecke, 2013) En effet, ils considèrent ces quotas comme une compétition déloyale, les producteurs chinois bénéficiant de prix plus avantageux. (Hayes-Labruto et al., 2013) L'OMC a finalement tranché en faveur des plaignants, jugeant les mesures prises par la Chine injustifiées. (Le Monde, 2014) Les différentes parties pourront toutefois faire appel de cette décision si elles le souhaitent, ce que fera probablement la Chine.

4.3. Demande en terres rares

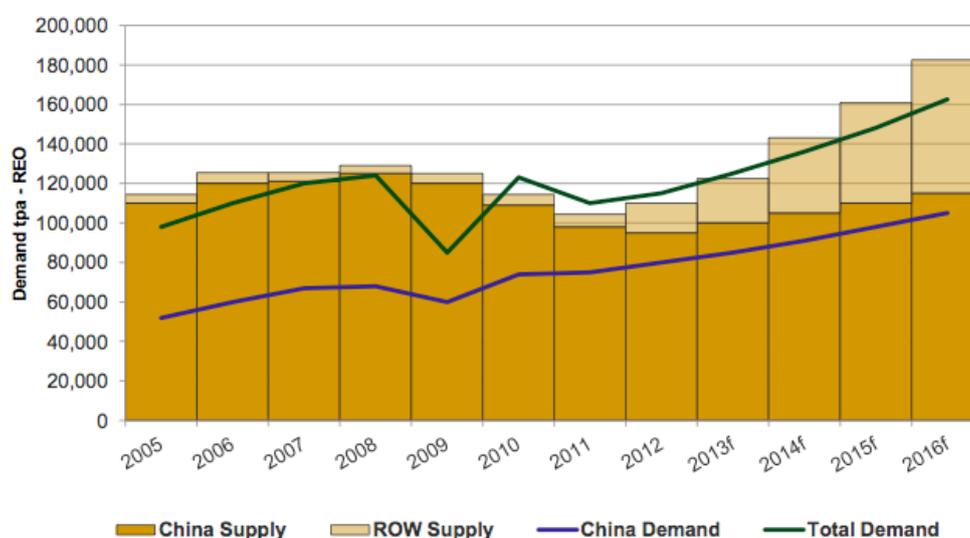
Comme précisé dans un rapport de la Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement (CNUCED, 2014), il est extrêmement difficile d'évaluer la demande en terres rares avec précision. *« En effet, il existe autant d'estimations que de sources d'information, probablement du fait du caractère hautement stratégique de ces produits de base, mais aussi de l'étroitesse de ces marchés en termes de quantité. »* (CNUCED, 2014) La majorité des études s'accordent toutefois à dire que la demande en terres rares devrait augmenter durant les

prochaines années. (Jordens et al., 2013 ; Hayes-Labruto et al., 2013 ; Massari et Ruberti, 2013) Ceci peut s'expliquer entre autres par leur utilisation croissante dans de nombreux produits de haute technologie, et notamment les technologies vertes. (Jordens et al., 2013 ; Hayes-Labruto et al., 2013) En 2010, la demande mondiale était estimée à plus de 130.000 tonnes par an. (Humphries, 2012 ; Massari et Ruberti, 2013) Selon certains auteurs, elle pourrait dépasser les 210.000 tonnes par année dès 2015 (Humphries, 2012). Massari et Ruberti (2013) s'attendent quant à eux à une demande croissante atteignant les 225.000 tonnes à partir de 2015. The Industrial Minerals Company of Australia (IMCOA), largement cité dans la littérature scientifique, évalue toutefois la demande mondiale à un niveau un peu moins élevé que les précédents auteurs. Selon cette source, elle s'élevait à 125.000 tonnes en 2010 (tableau 2) et devrait connaître une augmentation atteignant les 160.000 tonnes en 2016 (fig. 7) et allant jusqu'à 200.000 voire 240.000 tonnes à l'horizon 2020. (Kingsnorth, 2013)

Tableau 2 : Demande globale en terres rares et part de la demande chinoise dans la demande globale (Kingsnorth (IMCOA), 2013)

	2008	2009	2010	2011	2012
Demande globale (en tonnes)	125.000 t	85.000 t	125.000 t	110.000 t	115.000 t
Part de la demande chinoise dans la demande globale (%)	55%	70%	60%	70%	70%

Figure 7 : Évolution et prévision de la demande et de la production de terres rares. Les prévisions sont indiquées par un « f » (forecast) après l'année. (Kingsnorth (IMCOA), 2013)



Contrairement à la production, la demande en terres rares est moins concentrée géographiquement. (Remeur, 2013) Cependant, la Chine représente tout de même un acteur important dans la consommation de ces métaux puisqu'en 2012, la part de la demande chinoise dans la demande globale représentait 70% (tableau 2). Elle devrait atteindre 105.000 tonnes en 2016 (fig. 7), soit 65% de la demande mondiale. (Kingsnorth, 2013) Les autres principaux consommateurs sont les Etats-Unis, l'UE, le Japon et la Corée. (Massari et Ruberti, 2013)

La demande n'est pas la même pour tous les ETR. Huit éléments en particulier revêtent un grand intérêt commercial : le lanthane, le cérium, le néodyme, le praséodyme, le samarium, le dysprosium, l'euporium et le terbium. Ceux-ci devraient ainsi représenter 90% de la production et 93% de la demande estimées pour 2014. (Massari et Ruberti, 2013) En particulier, la demande pour le néodyme et le dysprosium pourrait connaître une croissance respective de 700% et 2.600% d'ici les 25 prochaines années. (Binnemans et al., 2013)

4.4. Croissance des prix

Pendant plusieurs années, les prix des terres rares sont restés stables et relativement bas. (CNUCED, 2014) La Chine fournissait en effet abondamment le reste du monde en terres rares peu chères grâce à des coûts de main d'œuvre réduits et sans se préoccuper des conséquences de cette activité sur l'environnement. De leur côté, les industries et les différents pays du monde ne se souciaient donc pas de chercher d'autres sources d'approvisionnement puisque les coûts n'auraient pas pu atteindre les niveaux de compétitivité acquis par la Chine.

Cependant, entre 2010 et 2011, les prix des terres rares, toutes sans exception, ont connu une très forte hausse ! Deux facteurs en particulier expliquent cette importante augmentation : la demande croissante pour ces éléments ainsi que l'annonce par la Chine de la baisse des quotas d'exportation (Jordens et al., 2013 ; Hayes-Labruto et al., 2013 ; Habib et Wenzel, In press).

Cette rapide croissance des prix a été un véritable accélérateur pour la recherche de solutions alternatives pour maintenir l'approvisionnement en terres rares. Les gouvernements et les industries ont ainsi commencé à rechercher de nouveaux gisements à exploiter en dehors de la Chine (Schüler et al., 2011). D'autres moyens ont également été envisagés, comme le recyclage et la substitution (Habib et Wenzel, In press).

Ces initiatives, ainsi qu'une utilisation plus rationnelle des terres rares et un ralentissement de la demande dû à la crise économique persistante, ont contribué à la baisse des prix à partir de 2012 jusqu'au premier semestre 2013 (Barreau et al., 2013 ; CNUCED, 2014). Pendant le deuxième trimestre, les prix sont légèrement repartis à la hausse, conséquence de la fermeture des mines illégales et de certaines unités de transformation en Chine (CNUCED, 2014).

Dans les prochaines années, il risque d'y avoir ce que plusieurs auteurs appellent un « problème d'équilibre » (Binnemans et al., 2013 ; Golev et al., 2014). Bien que l'ensemble des terres rares se retrouvent dans un même gisement, elles n'y sont toutefois pas présentes

dans les mêmes quantités ; certaines sont plus abondantes que d'autres. Une augmentation de la demande pour un élément spécifique peut donc causer la sur-production des terres rares moins prisées. Certains éléments risquent ainsi de se retrouver en déficit, alors que d'autres seront en surplus.

5. Problématique : Des matériaux critiques

Les chiffres présentés dans les précédents points nous indiquent que le monopole de la Chine vis-à-vis de la production de terres rares ainsi que l'instauration de quotas d'exportation engendrent des risques d'approvisionnement. À côté de cela, la demande globale devrait augmenter suite à l'utilisation croissante de ces éléments dans de nombreux produits, et notamment sous l'impulsion des technologies vertes. Les terres rares sont, à ce titre, considérées dans de nombreuses études comme étant des éléments « critiques ». (BGS, 2011 ; Habib et Wenzel, In press ; Massari et Ruberti, 2013) Ce terme est généralement utilisé pour désigner des éléments pour lesquels la demande va probablement être supérieure à l'offre dans un futur proche. Ce sont des ressources économiquement importantes sujettes à de hauts risques d'approvisionnement. (Chakhmouradian et Wall, 2012)

Il y a actuellement une réelle prise de conscience à l'échelle mondiale de la criticité de ces éléments. L'Union Européenne (UE) et le Département de l'Energie des Etats-Unis (DoE) ont par exemple inclus les terres rares sur leur liste des matières les plus critiques. La Commission Européenne publie ainsi, depuis 2010 et à intervalle régulier, un rapport d'experts fournissant une méthode afin de déterminer les matières premières critiques pour l'Union Européenne. Selon ce document, une matière première est qualifiée de « critique » si elle présente des risques élevés d'approvisionnement et si elle est d'une forte importance économique. (Commission Européenne, 2014) Différents indicateurs sont ensuite utilisés pour mesurer chacune de ces deux composantes. Les éléments pris en compte dans l'évaluation du risque d'approvisionnement sont le niveau de concentration de la production, la stabilité et la gouvernance des pays producteurs, le taux de recyclage et le potentiel de substitution. L'importance économique est, quant à elle, évaluée selon le poids économique des secteurs qui intègrent directement les matières premières étudiées dans leurs processus de production et la place de ces secteurs dans les flux économiques. (Commission Européenne, 2014 ; Gandenberger et al., 2010) Le résultat donne une matrice classant les matériaux à travers les deux éléments d'évaluation, avec une matière définie comme critique si elle dépasse à la fois le seuil d'importance économique et le risque d'approvisionnement. (Commission Européenne, 2014)

Dans son évaluation de 2013, la Commission Européenne classe les terres rares parmi les matières premières les plus critiques⁶, avec un risque d'approvisionnement extrêmement élevé (fig. 8) !

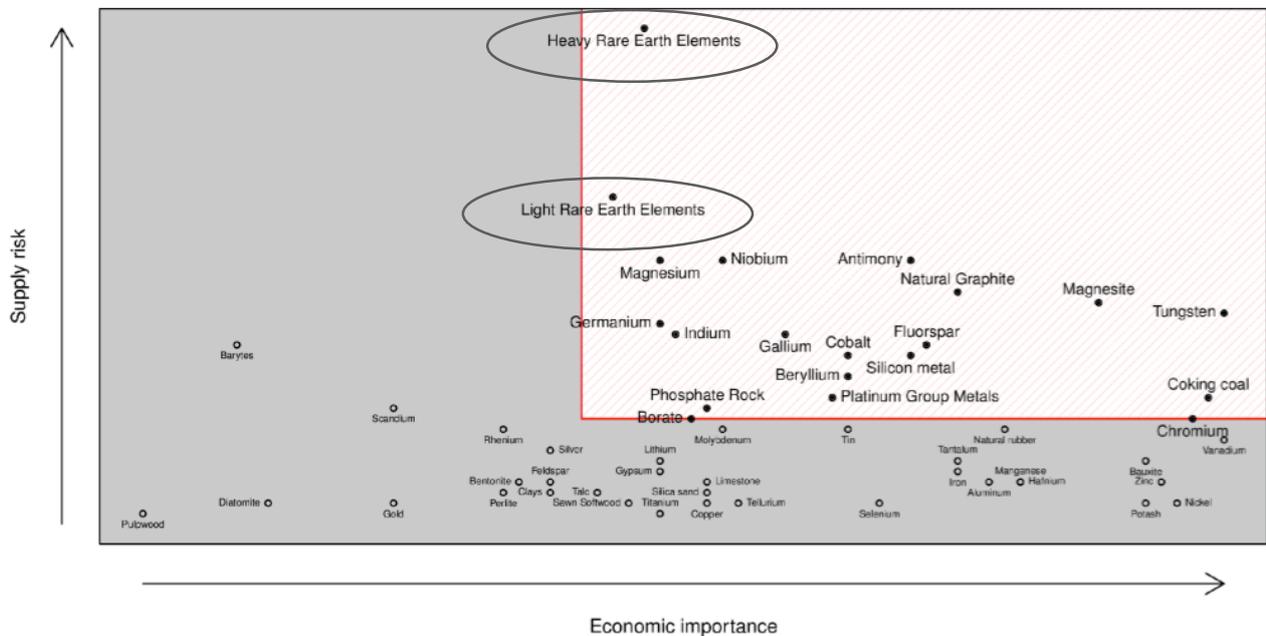


Figure 8 : Résultats de l'évaluation des matières premières critiques pour l'Union Européenne (Commission Européenne, 2014)

Les Etats-Unis s'inquiètent eux aussi de leur approvisionnement en terres rares. Dans un premier rapport publié en 2010 et mis à jour en 2011, le Département de l'Energie des Etats-Unis a évalué la criticité de matériaux-clés pour le développement de technologies vertes. (US Department of Energy, 2011) Parmi ceux-ci, les terres rares se révèlent à nouveau très problématiques. Quatre secteurs des énergies vertes sont particulièrement touchés : les cellules solaires photovoltaïques, les turbines pour éoliennes, les batteries et les aimants pour véhicules électriques et les dispositifs nouveaux d'éclairage utilisant des matériaux luminescents. La méthodologie utilisée dans ce rapport se base sur celle développée par The National Academy of Science (NAS). Celle-ci évalue la criticité des matériaux selon deux dimensions : le risque d'approvisionnement et l'impact qu'aurait une limitation de l'approvisionnement. Une note allant de 1 à 4 est ensuite attribuée aux matériaux pour chacun des deux dimensions. Dans le cadre de cette étude, cette méthodologie a été adaptée afin de rendre compte de préoccupations particulières. La deuxième dimension a ainsi été remplacée par l'importance des matériaux pour les énergies vertes. (US Department of Energy, 2011) Les auteurs présentent leurs résultats sous forme de matrice (fig. 9 et 10).

⁶ Liste complète des 20 matières premières considérées comme critiques pour l'Union Européenne : l'antimoine, le béryllium, le borate, le charbon à coke, le chrome, le cobalt, le gallium, le germanium, le graphite naturel, l'indium, la magnésite, le magnésium, le niobium, les métaux du groupe platine, la roche phosphatée, les terres rares lourdes, les terres rares légères, le silicium métal, le spath fluor et le tungstène. (Commission Européenne, 2014)

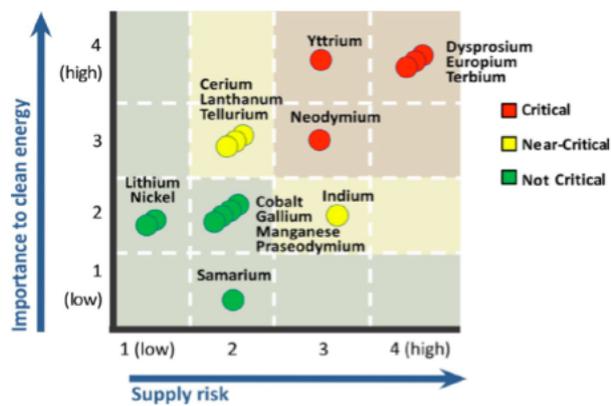


Figure 9 : Matrice de criticité à moyen terme (> 2015) (US Department of Energy, 2011)

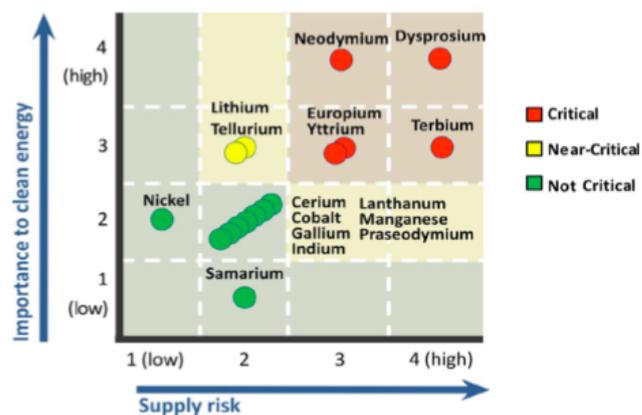


Figure 10 : Matrice de criticité à plus long terme (2015-2025) (US Department of Energy, 2011)

A court terme de même qu'à moyen terme, c'est la disponibilité en terres rares qui semble la plus critique à la production d'énergie renouvelable, et plus particulièrement celle du dysprosium, de l'euporium, du terbium, de l'yttrium et du néodyme. (US Department of Energy, 2011)

La demande croissante de terres rares, les problèmes d'accès à la ressource et l'augmentation des prix a poussé de nombreux pays à chercher de nouvelles solutions afin de réduire leur vulnérabilité et leur dépendance vis-à-vis des importations chinoises de terres rares. L'une d'entre elles consiste à explorer de nouvelles sources d'approvisionnement et à développer de nouveaux gisements hors Chine. On recense ainsi plus de 200 projets d'exploration à travers le monde (voir annexe II). (BGS, 2011 ; CNUCED, 2014 ; Habib et Wenzel, In press ; Wübbecke, 2013) Cependant, seule une infime partie de ces projets arrivera au stade de production, et ce en raison de la difficulté à remplir les critères de succès (teneur suffisante de la ressource dans le minerai, faisabilité économique et technique, gestion des risques environnementaux, etc). (Wellmer et Dalheimer, 2012, cités par Habib et Wenzel, In press)

6. Question de recherche et hypothèses

La forte pression qui pèse sur l'ouverture de nouvelles mines soulève la crainte que celles-ci ne respectent pas certaines normes environnementales. Or, il semblerait que ce type d'exploitation soit extrêmement polluant.

Parmi les sites qui font l'objet de projets d'exploration, le Groenland attire particulièrement les convoitises.

La question de recherche développée dans le cadre de ce mémoire sera donc la suivante : Quels sont les enjeux et les risques environnementaux liés au développement d'une exploitation de terres rares au Groenland ?

Cette question de recherche s'appuie sur diverses hypothèses qui seront discutées dans la suite de ce travail :

- Il existe des gisements de terres rares au Groenland susceptibles d'être exploités.
- La fonte des glaces liée au réchauffement climatique va rendre ces ressources plus facilement accessibles et va attirer les exploitants dans cette région.
- De nombreux pays ont déjà montré leur intérêt pour l'exploitation des terres rares au Groenland.
- L'extraction des terres rares, dans les conditions actuelles, pose de nombreux problèmes environnementaux.
- Le Groenland est un milieu fragile et particulièrement sensible aux risques environnementaux.

7. Méthodologie

Le travail est divisé en quatre grandes parties organisées selon une suite logique. La méthode de travail utilisée a majoritairement consisté en une recherche d'information dans les articles et rapports disponibles via diverses bases de données. Il n'y a pas eu d'étude de terrain. Par contre, les diverses rencontres avec des professionnels du secteur des terres rares lors du Symposium Arctic Futures qui a eu lieu à Bruxelles en 2013 ont permis d'enrichir les données récoltées. De même, une interview avec le directeur d'une société qui recycle des terres rares a été organisée et a permis de compléter les informations recueillies dans la littérature.

CHAPITRE 2 : LES TERRES RARES AU GROENLAND

INTRODUCTION

La course aux terres rares est lancée ! Les gouvernements et les industries sont partis à la recherche de nouveaux gisements hors Chine afin de sécuriser leurs approvisionnements. Ce deuxième chapitre permettra de comprendre les raisons pour lesquelles le Groenland est devenu le centre de tous les intérêts.

1. La fonte des glaces arctiques

1.1. Recul de la banquise arctique

« La banquise est une couche de glace qui se forme sur l'eau. » (Réseau Action Climat France, 2013) Elle fond en été pour se reformer progressivement en hiver. Elle atteint généralement son étendue minimum en septembre et son maximum au mois de mars. (Perovich et al., 2013)

L'Arctique fait face à un réchauffement important depuis le milieu du 20^{ème} siècle. (GIEC, 2013) Cette région du monde se réchauffe davantage et plus rapidement que le reste du globe, ce qui entraîne certaines modifications, notamment en termes de couverture glaciaire. (NSIDC, 2012) Ainsi, l'étendue de la banquise arctique a suivi une tendance à la baisse ces dernières années (fig. 11). Au cours de la période entre 1979 et 2010, cette diminution s'est effectuée à une vitesse se situant entre 3,5 et 4,1% par décennie, ce qui correspond à une perte entre 0,45 et 0,51 million de km² par décennie. (GIEC, 2013)

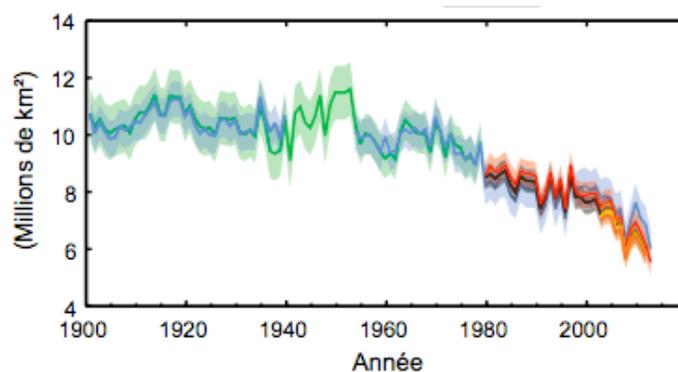


Figure 11 : Étendue de la banquise arctique en été (juillet-août-septembre) (GIEC, 2013)



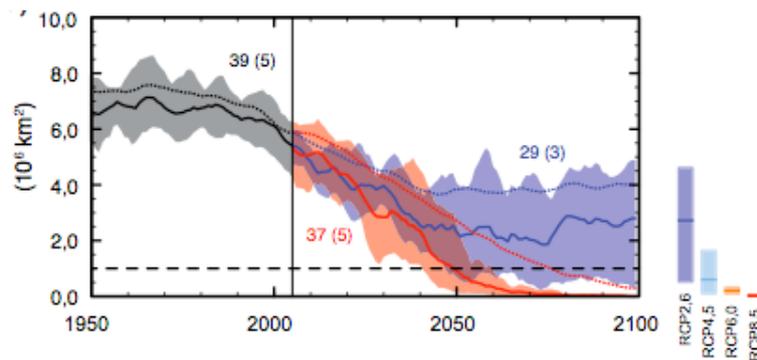
Figure 12 : Étendue de la banquise arctique le 13 septembre 2012 par rapport à la moyenne des minima entre 1979 et 2010 (ligne jaune) (NASA, 2012)

Bien que ce recul de la banquise ait lieu en toute saison depuis 1979, on constate qu'il est beaucoup plus rapide en été. (GIEC, 2013) En septembre 2012, la NASA a annoncé une fonte record de la banquise arctique avec une superficie qui ne s'étendait plus qu'à 3,43 millions de km² (fig. 12). (NASA, 2012) En 2013, la situation s'est un peu améliorée avec un minimum en septembre de 5,10

millions de km². (NSIDC, 2013) Cependant, cette amélioration n'est qu'apparente puisque cela représente malgré tout 1,12 millions de km² en dessous de la moyenne des minima entre 1989 et 2010. (NSIDC, 2013)

D'après les estimations du GIEC, l'étendue ainsi que l'épaisseur de la banquise arctique devraient très probablement continuer à diminuer au cours du 21^{ème} siècle. (GIEC, 2013) Selon le pire scénario du GIEC (RCP8,5), il est même probable que l'océan Arctique se retrouve presque sans glace⁷ au mois de septembre, et ce avant le milieu du siècle (fig. 13). (GIEC, 2013)

Figure 13 : Etendue de la banquise de l'hémisphère Nord en septembre (GIEC, 2013)



1.2. Fonte de la calotte glaciaire du Groenland

À l'inverse de la banquise qui se forme sur l'eau, « *les calottes glaciaires sont les glaciers d'eau douce étendus sur la terre ferme* » (Réseau Action Climat France, 2013). Les deux plus étendues sont celles du Groenland et de l'Antarctique. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéresserons essentiellement à la calotte polaire du Groenland. Celle-ci couvre environ 1,7 millions de km², ce qui représente 80% de la surface du Groenland. (NSIDC, 2014)

Ces dernières décennies ont été marquées par une fonte de la calotte glaciaire du Groenland. Le 5^{ème} rapport du GIEC confirme cette diminution de la masse de la calotte polaire. (GIEC, 2013) Cette tendance à la baisse est mise en évidence dans la figure 14.

⁷ « On considère qu'il n'y a presque pas de glace dans l'océan Arctique lorsque l'étendue de la banquise est inférieure à 106 km² pendant au moins cinq années consécutives. » (GIEC, 2013)

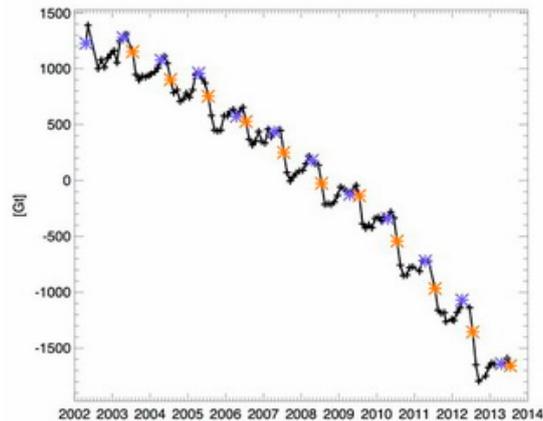


Figure 14 : Évolution mensuelle de la masse de glace du Groenland (en Gigatonnes) estimée à partir des mesures des satellites GRACE⁸. Les croix bleues et oranges désignent respectivement les valeurs pour avril et juillet. (Tedesco et al., 2013)

Non seulement les glaces fondent, mais ce dégel serait également de plus en plus rapide. En 2007, une étude de Fettweis et al. indiquait que la fonte superficielle de la calotte glaciaire du Groenland s'était accélérée ces 25 dernières années, et ce deux fois plus vite que ce qui était envisagé dans les précédentes études ! Les auteurs annonçaient qu'entre 1979 et 2005, la surface du Groenland touchée par cette fonte au moins un jour par an avait augmenté de 42%. (Fettweis et al., 2007)

Plus récemment, le GIEC a lui aussi estimé dans son dernier rapport que la perte moyenne de glace s'était accélérée et avait fortement augmenté au cours des dernières décennies : alors qu'elle s'élevait à 34 Gt par an au cours de la période allant de 1992 à 2001, elle a atteint 215 Gt par an entre 2002 et 2011 ! (GIEC, 2013) La figure 15 montre les variations de la masse de glace du Groenland depuis 2004 jusqu'à 2013.

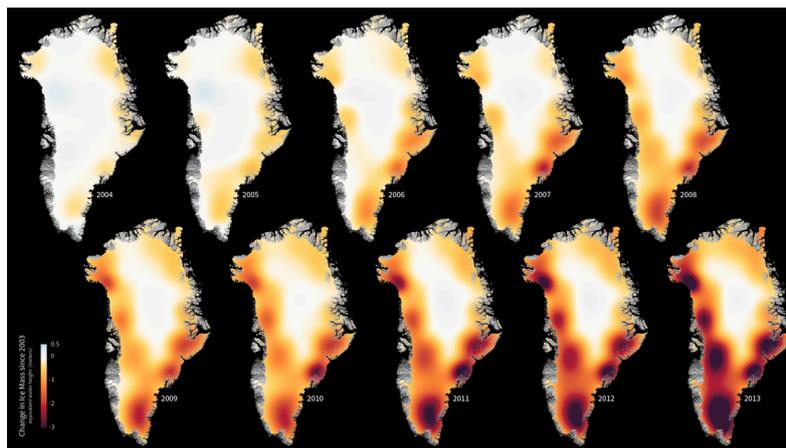


Figure 15 : Variation de la masse de glace du Groenland de 2004 à 2013. Les nuances d'orange et de rouge indiquent les zones qui rencontrent une perte de masse, alors que les nuances de bleu clair indiquent des régions qui ont gagné de la masse. Les zones blanches sont des régions qui rencontrent peu ou pas de changement. (NASA, 2013)

⁸ Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) est une mission satellite lancée en mars 2002 dont l'objectif est d'effectuer des mesures détaillées des variations de la gravité terrestre. (<http://science.nasa.gov/missions/grace/>)

Tout comme la banquise arctique, la calotte du Groenland a battu un record de fonte en 2012. La NASA a ainsi annoncé que 97% de la glace de surface avait fondu à la mi-juillet de cette année-là. (NASA, 2012) L'année 2013 n'a pas été aussi extrême, se rapprochant davantage de la moyenne entre 1981 et 2010. À son pic de fonte, 44% de la glace de surface avait dégelé (fig. 16). Cette valeur se classe tout de même à la 14^{ème} place des fontes records entre 1981 et 2013. (Tedesco et al., 2013)

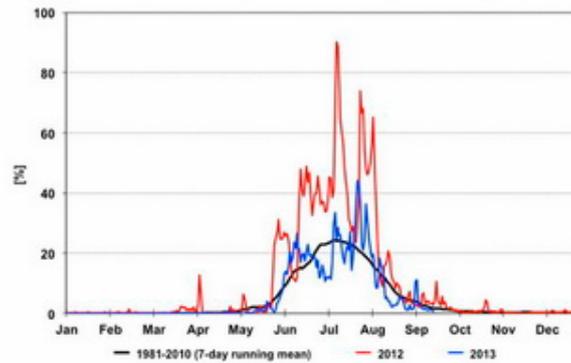


Figure 16 : Cycle annuel de fonte de la calotte glaciaire du Groenland en 2012 (rouge) et 2013 (bleu) par rapport à la moyenne entre 1981 et 2010 (noir). (Tedesco et al., 2013)

Les zones touchées par les fontes estivales se sont également élargies et la perte de glace pourrait être irréversible à certains endroits. Les prévisions du GIEC indiquent que la calotte glaciaire groenlandaise devrait continuer à fondre. En effet, « *l'augmentation de la fonte superficielle de la calotte du Groenland dominera l'augmentation des précipitations neigeuses* ». (GIEC, 2013) La calotte groenlandaise pourrait complètement disparaître d'ici un millénaire pour une augmentation de température supérieure à 1°C (degrés de confiance faible) mais inférieur à 4°C (degrés de confiance moyen). (GIEC, 2013)

2. Des ressources naturelles qui deviennent accessibles

Si la fonte des glaces rencontrée dans la zone arctique inquiète la majeure partie de la communauté scientifique, d'autres acteurs y voient par contre une opportunité de business à saisir. À l'heure où les ressources non renouvelables de la planète commencent à s'épuiser, l'Arctique apparaît comme un réservoir encore plein et largement inexploité. On peut d'ores et déjà se demander s'il est bien raisonnable de poursuivre dans la voie des énergies fossiles, jusqu'à vider la Terre de ses richesses, alors que l'on observe chaque jour un peu plus les impacts de ces exploitations sur le climat.

Le réchauffement climatique, en provoquant la fonte accélérée des glaces arctiques, de la banquise et de la calotte polaire du Groenland, rend accessibles des ressources jadis inexploitées en raison de leur accès difficile, des conditions climatiques extrêmes et des difficultés techniques. Les sols et les fonds sous-marins de cette région du monde renfermeraient de nombreuses ressources naturelles. Certaines d'entre-elles restent d'ailleurs encore à découvrir, la grande majorité du sous-sol arctique n'ayant pas été sondée.

Ainsi, l'Arctique renfermerait d'importantes réserves inexplorées de pétrole, estimées selon l'USGS à 90 milliards de barils. D'après cette même source, les réserves non découvertes de gaz naturel seraient aussi importantes, atteignant 50 trillions de mètres cubes. La région renfermerait également 44 milliards de barils de gaz naturel liquéfié. Cela représente 22% des réserves mondiales non prouvées d'hydrocarbures. La majorité de ces ressources (84%) se trouverait offshore. (USGS, 2008 ; Eiffling et Struge de Swielande, 2011)

Le Groenland en particulier revêt un intérêt majeur. Une partie de ces réserves de pétrole se trouve en effet dans les eaux groenlandaises, à raison de plus de 50 milliards de barils. (USGS, 2008 ; UNESCO, 2010) Outre des hydrocarbures, l'île renferme diverses ressources naturelles en abondance. 10% des réserves mondiales d'eau douce se situent sur son territoire. L'île possède également des réserves halieutiques. Celles-ci pourraient même devenir beaucoup plus nombreuses suite au réchauffement des eaux groenlandaises. La géologie ancienne du territoire le rend aussi extrêmement riche en ressources minières. (Degeorges, 2012 : 30) On y trouve entre autres de l'antimoine, de l'argent, du béryllium, du chrome, du cobalt, du cuivre, des diamants, du fer, de l'or, du palladium, du platine, du plomb, de l'uranium, du zinc... (Degeorges, 2012 ; Duarte et al., 2013) Mais surtout, le sol groenlandais renferme de grandes quantités de terres rares désormais accessibles ! (Degeorges, 2012) L'annexe III donne un aperçu de la diversité des minéraux dont recèle le Groenland et localise quelques gisements de terres rares.

Non seulement le réchauffement climatique permet d'atteindre des matières premières autrefois recouvertes d'une épaisse couche de glace, mais en plus, il libère des voies maritimes, favorisant l'accès à des zones auparavant fort isolées et raccourcissant les distances pour le transport. Les glaces obstruent de moins en moins les routes Nord-Ouest et Nord-Est qui deviennent navigables plusieurs mois par an. Ces routes peuvent être visualisées en annexe IV. Même si de nombreux obstacles persistent encore à l'emprunt de ces nouveaux passages, leur ouverture possible alimente l'intérêt des investisseurs pour cette région du monde. (Eiffling et Struge de Swielande, 2011 ; Arctic Info, 2013)

3. Les terres rares au Groenland

Selon les chercheurs de l'Institut d'études géologiques du Danemark et du Groenland (GEUS) et du Bureau pour les minerais et le pétrole (BMP), l'environnement géologique du Groenland serait particulièrement favorable à l'accumulation d'ETR (GEUS et BMP, 2011), ce qui le rend extrêmement attractif aux yeux des industries minières. Le Groenland disposerait de larges gisements de terres rares et pourrait couvrir, selon certains auteurs, au moins 25% de la demande mondiale durant 50 ans. (Charles et al., 2013 ; Degeorges, 2012 ; Lewis, 2009, cité par BGS, 2011)

En 2010, GEUS et BMP ont mené un groupe de travail pour évaluer le potentiel de terres rares au Groenland afin de fournir au secteur de l'exploration minière une base scientifique et les données nécessaires à une prise de décision raisonnée. (GEUS et BMP, 2011) Plusieurs environnements se sont révélés susceptibles de contenir des ETR. Le Groenland dispose des

milieux favorables suivants : des carbonatites, des intrusions alcalines, des pegmatites, des gisements de type IOCG et des paléoplacers. La figure 18 situe ces différents environnements sur la carte du Groenland.

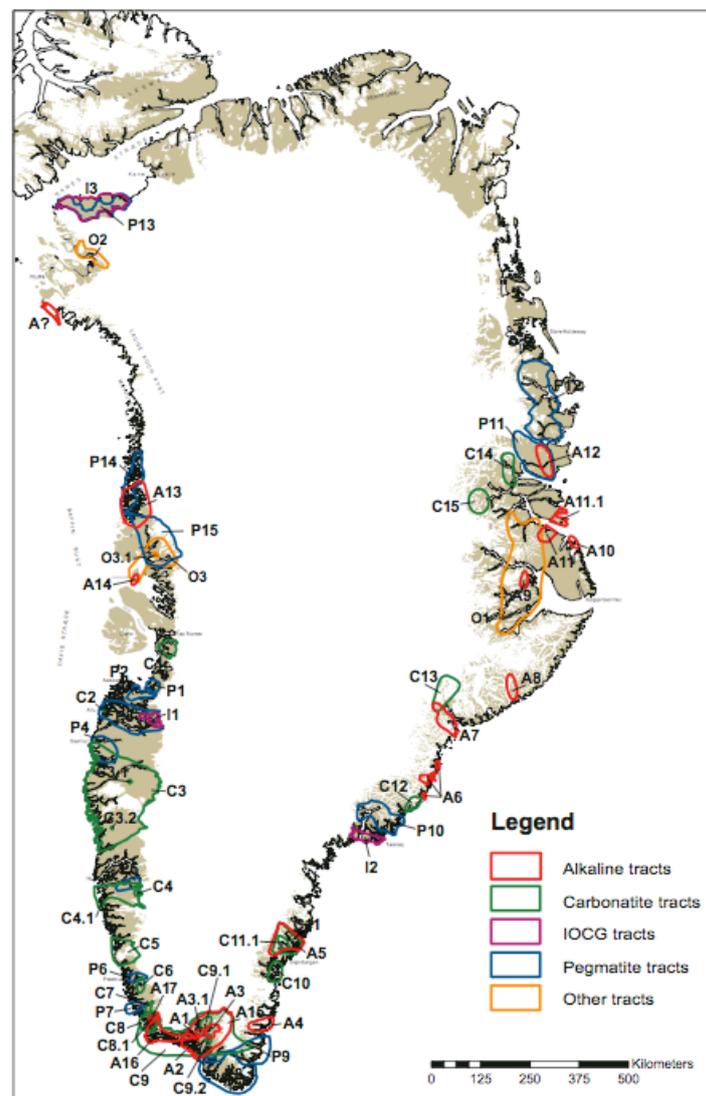


Figure 17 : Localisation des environnements favorables à l'accumulation d'ETR au Groenland (GEUS et BMP, 2011)

Les gisements primaires apparaissent essentiellement dans la province du Gardar au sud du Groenland. Elle comprend des complexes alcalins qui présentent de forts potentiels en ETR, avec notamment le gisement de Kvanefjeld dans le complexe alcalin d'Ilimaussaq, ou les gisements de Kringlern et de Motzfeldt Sø. La province du Gardar contient d'autres intrusions alcalines qui pourraient être intéressantes, comme celles de Grønnedal-Ika, Igaliko, Nunarssuit ou Tugtutôg. Des intrusions alcalines se produisent également dans l'est du Groenland, avec par exemple le complexe de Gardiner et Kap Simpson. À l'ouest, on note des manifestations prometteuses de carbonatites et de pegmatites, parmi lesquelles les carbonatites de Sarfartoq, Qaqarssuk et Tikiusaaq. Il existe actuellement peu de descriptions de dépôts secondaires au Groenland. Citons toutefois le gisement de Milne Land, situé à l'est

du Groenland, qui est de type paléoplacer. (Charles et al., 2013) La carte en annexe III permet de situer géographiquement certains des lieux mentionnés.

Qui dit environnement géologique favorable ne signifie pas forcément que la découverte de terres rares y est assurée. Toutefois, les nombreux terrains prometteurs pourraient révéler la présence de nouveaux gisements encore inconnus, ce qui attire de plus en plus les industries d'exploration minière.

Huit gisements de terres rares sont actuellement connus au Groenland : Kvanefjeld, Kringlern, Motzfeldt Sø, Sarfatoq, Qaqarsuk, Tikiusaaq, Niaqornakassak et Umiammakku Nunaa. Deux d'entre eux pourraient même faire partie des dix plus grands au monde ! (GEUS, 2011) Les caractéristiques géologiques de ces différents gisements varient de l'un à l'autre. Seuls les gisements avec le plus fort potentiel seront davantage développés dans le cadre de ce mémoire.

La partie sud du Groenland en particulier recèle de nombreuses ressources. (Charles et al., 2013 ; Rosing, 2013) La présence du complexe d'Ilimaussaq y est pour beaucoup. Celui-ci date de l'ère Mésoprotézoïque qui s'étend de -1.600 à -1.000 millions d'années. Il est formé par une grande intrusion alcaline stratifiée le long de la côte sud-ouest du Groenland. Il couvre une surface géographique de 17 km sur 8 km avec une hauteur de 1,7 km. (Sørensen, 2001) Son environnement géologique est unique au monde de par les vastes ressources et la variété exceptionnelle de types de roches qu'il abrite. Il est notamment composé d'une couche de roche assez inhabituelle : la lujavrite. Celle-ci est particulièrement enrichie en terres rares, en uranium et en zinc, parmi d'autres métaux. La concentration en terres rares dans les sections supérieures de cette roche peut dépasser 1,5% de terres rares. Avec la profondeur, les teneurs tombent toutefois à des niveaux qui ne sont économiquement pas rentables. (GME, 2012)

Le gisement de Kvanefjeld se situe au nord-ouest du complexe alcalin d'Ilimaussaq. Il s'agit du projet d'exploitation le plus grand et le plus avancé du Groenland. En 2011, les ressources totales en oxydes de terres rares étaient estimées à 6.6 millions de tonnes, dont 0.24 millions de tonnes d'oxydes de terres rares lourdes et 0.53 millions de tonnes d'oxydes d'yttrium. (GEUS et BMP, 2011) Les dernières estimations de GME réévaluent ces ressources à 10,3 millions de tonnes, dont 0.37 millions de tonnes d'oxydes de terres rares lourdes et 0.84 oxydes d'yttrium. (GME, 2012, cité par Pipame, 2013) Selon certains auteurs, il pourrait s'agir de l'un des plus grands gisements de terres rares au monde ! La figure 19 illustre les ressources en terres rares pour une sélection de gisements en dehors de la Chine. L'importance du gisement de Kvanefjeld est manifeste, même face à des projets d'envergure comme celui de Mount Weld en Australie ou Mountain Pass aux Etats-Unis.

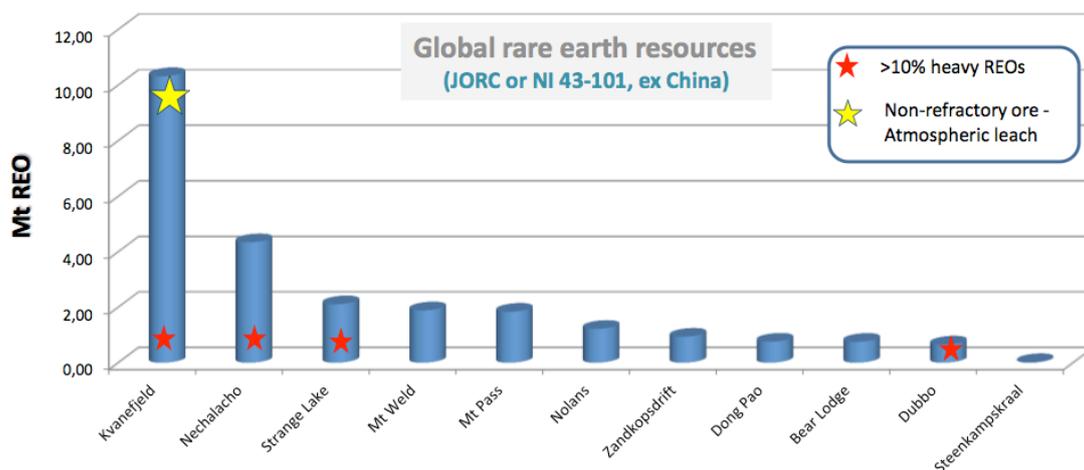


Figure 18 : Estimations des ressources en terres rares pour une sélection de gisements en-dehors de la Chine, conformément au Code JORC (BCC, 2012, cité par GME, 2012)

Comme la plupart des gisements, il est majoritairement enrichi en terres rares légères. Cependant, le gisement de Kvanefjeld est particulièrement intéressant car il renferme également des quantités importantes en terres rares lourdes. Le gisement est dominé par des dépôts de cérium (40%), lanthane (25%), néodyme (15%), yttrium (10%) et de praséodyme (5%). Les autres terres rares lourdes forment les 5% restant.

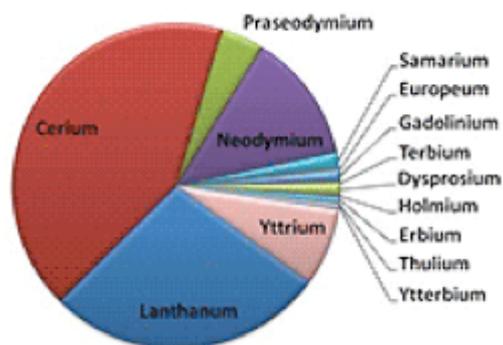


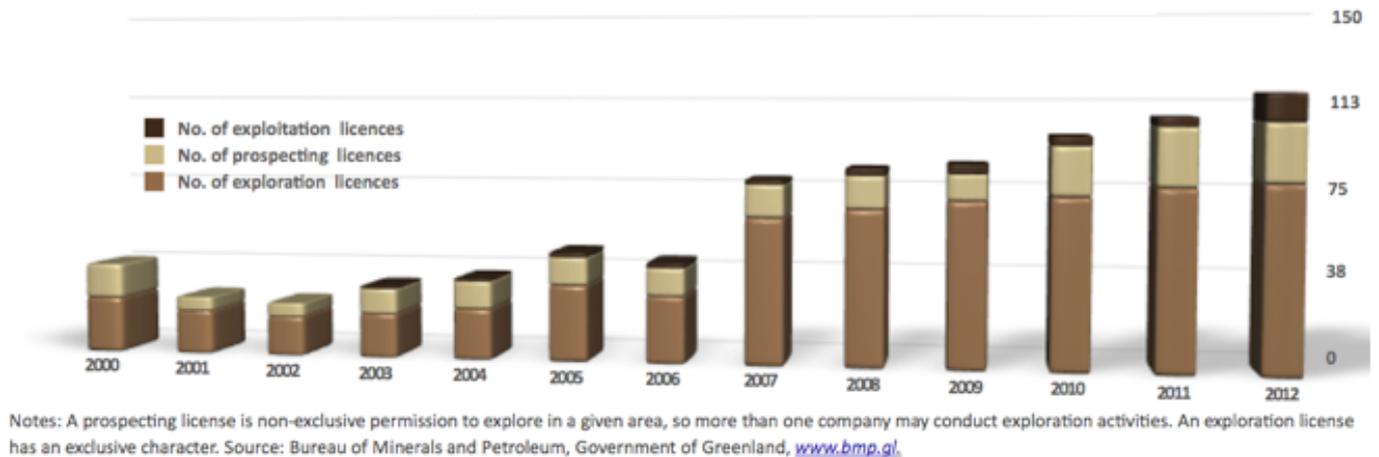
Figure 19 : Distribution des ETR dans le gisement de Kvanefjeld (GME, 2012)

4. Un intérêt croissant pour les terres rares au Groenland

Au vu du potentiel en terres rares du sous-sol groenlandais, le territoire suscite de plus en plus l'intérêt des grandes puissances mondiales. En témoigne le nombre croissant de licences délivrées entre 2000 et 2012 (fig. 21). Le Groenland apparaît comme une alternative sérieuse au quasi-monopole chinois. (Du Castel et Brito, 2014) Cet intérêt est renforcé par la fonte des glaces arctiques et de la calotte polaire. Même si cette dernière recouvre encore la majeure partie du Groenland, l'accélération de sa fonte a dégagé certaines zones plus rapidement que prévu, rendant possible l'exploitation minière dans des régions où elle était auparavant inenvisageable du fait d'une couverture de glace importante. Avec un territoire presque aussi grand que la moitié de l'Union Européenne (Degeorges, 2013) et étant donné le potentiel

géologique de son environnement, l'immensité de glace pourrait encore dissimuler en son sein davantage de gisements de terres rares.

Figure 20 : Nombre de licences accordées dans le secteur minier au Groenland entre 2000 et 2012 (Arctic Info, 2013)



De plus, comme l'indiquait Minik Rosing, président du Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS), dans une conférence donnée lors du symposium « Arctic Futures 2013 », la fonte des glaces ouvre à la navigation de nouvelles routes maritimes commerciales, ce qui attire d'autant plus l'attention internationale sur le Groenland en raison de sa meilleure accessibilité. (Rosing, 2013) Autrefois considéré comme une région périphérique du monde, le Groenland sort de son isolation, acquiert un statut central grandissant et se positionne de plus en plus comme la nouvelle frontière des relations internationales. (Degeorges, 2013) Sa localisation pourrait même être considérée comme stratégique puisqu'il se situe à la croisée des intérêts européens, américains et asiatiques, ce qui suscite les convoitises.

De par la présence dans cette région d'éléments dits « critiques », plusieurs grandes nations, à commencer par l'Europe, ont d'ores et déjà manifesté leur intérêt. L'enjeu est d'autant plus important que l'UE est entièrement dépendante des importations dans ce domaine. (Degeorges, 2013) Or, il se trouve que le Groenland, qui entretient une relation privilégiée avec l'UE, dispose de ces ressources en quantités non négligeables. L'UE y voit donc une opportunité de sécuriser ses approvisionnements en terres rares. Suite à la visite au Groenland en 2012 du vice-président de la Commission européenne, Antonio Tajani, l'UE a signé un accord de coopération pour l'exploitation des ressources minérales du Groenland, parmi lesquelles figurent bien évidemment les terres rares. (Commission Européenne, 2012 ; Degeorges, 2013 ; Du Castel et Brito, 2014) « Pour améliorer l'accès de l'industrie de l'UE aux matières premières à un prix abordable, la Commission européenne souhaite renforcer la coopération avec le Groenland au bénéfice des deux parties, qu'il s'agisse d'infrastructures et d'investissements communs ou de renforcement des capacités en matière de prospection et d'exploitation des matières premières. » (Commission Européenne, 2012) Aucune exclusivité n'est toutefois donnée à l'UE, le Groenland préférant diversifier ses partenaires, dont fait partie la Chine. (Degeorges, 2013 ; Du Castel et Brito, 2014 ; EurActiv, 2013)

La Chine s'intéresse elle aussi au Groenland. En effet, suite à la croissance de sa demande intérieure en terres et face à son inquiétude vis-à-vis de la pérennité de ses réserves, elle pourrait prochainement devenir importatrice de terres rares et voit dans le territoire du pôle nord une opportunité à saisir. (Christmann, 2011) De nombreux acteurs craignent que la Chine ne prenne trop de participations dans les projets qui se développent au Groenland. Une rumeur avait d'ailleurs circulé selon laquelle les activités de Greenland Minerals & Energy (GME) pourraient être vendues à des investisseurs chinois. GME est une compagnie australienne active dans l'exploration du projet minier de Kvanefjeld. En tant qu'entreprise junior, elle n'a pas pour but de mener le projet dans sa totalité. Les possibilités de rachat n'ont bien sûr pas échappé aux différents acteurs. Cette rumeur a finalement été démentie par le directeur de la filiale groenlandaise de GME. En 2009, la Chine avait déjà tenté, sans succès, d'acquérir 51% du capital de Lynas Corporation, une autre compagnie australienne travaillant dans le secteur des terres rares en Australie. (Degeorges, 2012) D'autres signes tendent à indiquer que la Chine a bel et bien des vues sur les ressources minérales du Groenland. Citons la rencontre en avril 2012 entre le Premier ministre du Groenland, Hans Enoksen et le ministre de l'Industrie et des Ressources naturelles, Karl Berthelsen, avec le ministre chinois en charge des Ressources naturelles, Xu Shashi. (Du Castel et Brito, 2014) En juin 2012, l'ancien président chinois, Hu Jintao, s'est même rendu en personne au Danemark pour une visite de quelques jours. Celle-ci a été analysée par de nombreux experts comme une preuve supplémentaire de l'intérêt chinois vis-à-vis de la province autonome danoise. (Du Castel et Brito, 2014 ; Garric, 2012)

Le président sud-coréen Lee Myung-bak a, quant à lui, signé une lettre d'intention ayant pour objet la recherche polaire et l'exploration minière. (Gattolin, 2014) Sa rencontre avec le Premier ministre groenlandais en 2012 n'est pas passée inaperçue puisqu'il s'est rendu directement au Groenland sans même passer par le Danemark et sans la présence du Premier ministre danois, « *ce qui a conféré de facto au Groenland un statut de quasi-Etat dans le contexte de ses relations internationales* ». (Degeorges, 2013)

Le statut du Groenland a en effet connu plusieurs évolutions au fil des ans. Ancienne colonie, le Groenland devint une zone à part entière du Danemark en 1953. En 1979, il obtient une autonomie interne au sein du royaume danois, ce qui lui permet de reprendre le contrôle de certaines compétences. Cette autonomie a ensuite été renforcée en 2009, nouvelle étape qui rapproche de plus en plus le Groenland d'une future indépendance. (Degeorges, 2013 ; Høyem, 2009) Depuis 2010, la gestion des ressources naturelles est ainsi passée dans les mains des groenlandais. Ce changement a eu un impact considérable sur la perception de la société internationale vis-à-vis du Groenland et a intensifié l'intérêt des pays pour cette région du monde. (Degeorges, 2012)

D'autres éléments font que tous les regards se portent désormais vers les ressources en terres rares du Groenland. Depuis les années '80 et jusqu'à récemment, le Groenland avait adopté une tolérance zéro vis-à-vis de l'extraction d'éléments radioactifs. (Du Castel et Brito, 2014) Or, répétons-le, les ETR se retrouvent souvent associés à des dépôts d'uranium ou de thorium. L'intérêt que les pays pouvaient avoir pour les vastes ressources minières du Groenland

étaient de ce fait troublé par un obstacle de taille. En conséquence, plusieurs projets étaient en attente, parmi lesquels celui de Kvanefjeld. Cependant, en octobre 2013, le Parlement groenlandais a pris la décision, à 15 voix contre 14, de lever cette interdiction, ouvrant de la sorte le territoire aux compagnies minières étrangères désireuses d'exploiter ses ressources naturelles. (Du Castel et Brito, 2014 ; EurActiv, 2013) Un accord concernant les modalités d'extraction et d'exploitation de l'uranium devrait être signé d'ici la fin 2014. (Du Castel et Brito, 2014 ; EurActiv, 2014)

De plus, un peu plus tôt, en décembre 2012, une loi a été approuvée définissant les conditions permettant aux entreprises étrangères d'exploiter les ressources naturelles du Groenland. Cette loi permet aux compagnies qui investissent plus de 5 milliards de couronnes dans des projets miniers, l'équivalent de 670 millions d'euros, d'être exemptées du droit social local. Cela les autorise donc à verser à leurs travailleurs étrangers des salaires minimaux plus bas que le minimum autorisé par la législation danoise, ce qui va encourager l'importation de main d'œuvre au détriment de l'emploi local. (Du Castel et Brito, 2014 ; EurActiv, 2013b) Cela inquiète d'autant plus qu'il y a peu de présence européenne⁹, encore moins danoise ou nordique, parmi les sociétés qui explorent actuellement le sous-sol groenlandais. La crainte d'une nouvelle main mise par les chinois sur les ressources en terres rares est donc palpable. La majorité des compagnies qui exercent des activités de prospection au Groenland proviennent du Canada et de l'Australie, mais on retrouve également parmi les prospecteurs des investisseurs chinois. (Commission européenne, 2012 ; Lachmann, 2013)

Par ailleurs, le Groenland adopte une politique qui vise à encourager le développement du secteur minier. L'ancien chef du gouvernement a d'ailleurs déclaré : « *Notre économie ne peut plus exclusivement se reposer sur la pêche. Nous devons mettre en mouvement le secteur minier et l'industrie.* » (Le Monde et AFP, 2013) L'enjeu majeur des élections législatives de 2013 tournait d'ailleurs autour de cette thématique, qui a été décisive dans le choix des électeurs. Globalement, les deux principaux partis de l'île, à savoir l'Inuit Ataqatigiit, parti indépendantiste d'extrême gauche dirigé par le Premier ministre sortant Kuupik Kleist, et le Siumut, parti social-démocrate mené par Aleqa Hammond, se positionnent en faveur de l'exploitation des ressources minières qui gisent dans le sous-sol groenlandais. Là où les avis divergent, c'est que d'un côté, le parti d'Aleqa Hammond veut augmenter les recettes publiques provenant des ressources naturelles et estime qu'il faut taxer les compagnies minières étrangères dès leur implantation sur l'île, alors que de l'autre côté, le parti de Kuupik Kleist ne voudrait prélever les impôts qu'une fois les premiers bénéfices réalisés. D'autres divergences apparaissaient aussi sur la question de l'extraction d'éléments radioactifs : alors que Kuupik Kleist voulait maintenir l'interdiction, Aleqa Hammond était en faveur de la levée de cette interdiction, voyant dans ce type d'exploitation une opportunité d'emploi pour la population. C'est finalement le parti Siumut qui a été élu avec 42,8% des voix, contre 34,4% pour l'Inuit Ataqatigiit. (Commodesk, 2013 ; Enderi, 2013 ; Le Monde et AFP, 2013)

⁹ La part des entreprises de l'UE opérant dans ce pays est seulement de 15 % (elles proviennent du Danemark, d'Allemagne, de la République tchèque et du Royaume-Uni) (Commission européenne, 2012)

Notons également que l'élite politique du Groenland ne comporte qu'un petit nombre de personnes, 44 au total dont 9 ministres, 31 parlementaires et 4 maires. Le nombre de personnes à convaincre et sur qui faire pression est très limité, et il est donc plus facile pour des grandes compagnies et des états de négocier un accès aux ressources du territoire. (Degeorges, 2013)

En définitive, de nombreux éléments expliquent l'intérêt actuel des états et des entreprises minières pour le Groenland. L'île, quant à elle, se trouve dans une position délicate, coincée entre sa volonté de tirer profit de ses ressources naturelles, ce qui lui permettrait de bénéficier d'une plus grande indépendance vis-à-vis du Danemark, et la nécessité de préserver son environnement unique et fragile. (Du Castel et Brito, 2014) Les débats vont d'ailleurs bon train en ce qui concerne la réelle capacité du Groenland à pouvoir gérer lui-même ses ressources et à prendre les décisions adéquates pour gérer les convoitises qu'elles suscitent. (Lachmann, 2013)

CONCLUSION

Depuis la fonte d'une partie de la calotte glaciaire, des ressources minières importantes sont devenues accessibles et exploitables au Groenland. Parmi ces ressources figurent les terres rares, métaux stratégiques et indispensables qui intéressent au plus haut point tous les pays dont la Corée, les Etats-Unis, la Russie, l'Europe et... la Chine¹⁰.

Le gouvernement groenlandais qui a maintenant dans ses attributions, en lieu et place du Danemark, la gestion des ressources minières, a assoupli la réglementation et va délivrer des licences d'exploitation de ces ressources. Une première mine de terres rares pourrait ouvrir prochainement à Kvanefjeld. Le chapitre suivant évaluera les risques environnementaux liés à l'exploitation des terres rares au Groenland

¹⁰ Liste non exhaustive.

PARTIE 3 : LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

INTRODUCTION

Lors du Symposium Arctic Futures 2013, Minik Rosing, président du Service géologique du Danemark et du Groenland, qualifiait les activités d'extraction et de traitement des terres rares comme étant un « messy business », extrêmement coûteux et générant de gros dégâts environnementaux (Rosing, 2013).

Ce troisième chapitre se penchera plus précisément sur les impacts environnementaux que génère la production de terres rares et sur les risques encourus par le Groenland dans le cas où une telle exploitation s'ouvrirait sur son territoire.

Il est important de préciser que, bien que ce genre d'activité minière génère d'autres impacts, économiques et sociaux, positifs ou négatifs, le parti a été pris dans ce mémoire de ne prendre en compte que le point de vue environnemental.

1. Aperçu général des techniques de production des terres rares

Cette section ne développera pas l'ensemble des techniques existantes dans les détails, mais aura pour but de donner un aperçu des principales méthodes utilisées en vue de comprendre le processus général d'extraction et de traitement des terres rares. En effet, il serait difficile de décrire une procédure standard tant les gisements de terres rares sont variés, ce qui résulte en des techniques d'extraction et de traitement très complexes et diversifiées. Rappelons-le, plus de 200 types de roches différents peuvent contenir des terres rares. (Corniou, 2012) Les méthodes de séparation des minéraux doivent donc être adaptées aux spécificités du gisement. Selon Ferron et al. (1991, cités par EPA, 2012), les principaux facteurs affectant le choix de l'une ou l'autre technique de traitement sont :

- Le type et la nature du gisement ;
- Le type et la nature des minéraux utiles contenant des ETR ;
- Le type et la nature de la gangue ;
- Le type et la composition des ETR individuels ;
- L'acceptabilité sociale et environnementale des procédés.

En outre, la suite du travail présentera un cas concret d'exploitation minière de terres rares dont les caractéristiques se rapprochent le plus possible de celles du Groenland. Les procédés mis en œuvre dans ce contexte particulier ainsi que les impacts environnementaux qui ont résulté de cette exploitation seront repris un peu plus en profondeur. Cela permettra de cibler les risques environnementaux dont le Groenland pourrait être victime si les projets en cours de prospection arrivent jusqu'à la phase d'extraction.

De plus, l'un des projets du Groenland ayant atteint un stade avancé d'exploration sera également développé. Cet exemple aura pour but d'avoir une idée de l'ampleur d'un projet d'exploitation de terres rares au Groenland et d'estimer les risques environnementaux qui pourraient y être liés.

La plupart des exploitations minières de terres rares prennent la forme de mines à ciel ouvert. Avant d'atteindre le minerai, ce type d'exploitation nécessite dans un premier temps d'enlever et de stocker ce qu'on appelle les morts terrains – c'est-à-dire le sol et la végétation qui ne contiennent aucune matière utile – ainsi que les déchets de roche – autrement dit la roche qui n'est pas minéralisée ou qui comprend de trop faibles concentrations du minerai à exploiter. (Schüler et al., 2011)

L'extraction du minerai peut ensuite commencer. Cette étape requiert l'utilisation d'équipements lourds. Le minerai est transporté vers les installations de traitements par transport routier. Le recours à cette machinerie lourde et l'acheminement des matériaux créent eux aussi des dommages à l'environnement, avec par exemple des émissions de poussière fugitive.

Le minerai extrait de la roche arrive généralement sous forme de gros fragments. On procède d'abord à un concassage afin de réduire la taille des plus gros morceaux. Ensuite, on effectue un broyage pour obtenir une fine poudre. (Schüler et al., 2011) Ces deux étapes de fragmentation vont permettre de libérer les minéraux utiles pour ensuite les séparer de leur gangue. Cependant, les minéraux contenant des ETR sont fort dispersés dans la roche, en plus d'être mélangés à d'autres minéraux. Un broyage grossier ne suffit donc pas à les séparer complètement. (Gouvernement du Canada, 2013) Il faut donc réduire la matière en particules suffisamment fines de façon à ce qu'il reste le moins d'associations minérales possibles. (BMZ, 1996)

Une fois le minerai broyé, il faut séparer de façon sélective les minéraux qui renferment des ETR des autres minéraux non essentiels. (Gouvernement du Canada, 2013) Cela permet de produire d'un côté un concentré de minerai, et de l'autre un résidu. L'opération fait intervenir divers procédés physiques, c'est-à-dire qu'on exploite les propriétés physiques différentes des minéraux pour les séparer, comme leur taille ou leur densité. Si les différences entre les minéraux utiles et non utiles ne sont pas assez marquées, les procédés de séparation peuvent se révéler très inefficaces. (Gouvernement du Canada, 2013) Au départ, le minerai brut broyé ne comprend que de faibles concentrations en oxydes de terres rares, généralement entre 1 et 10%. Les produits finaux obtenus après séparation sont des concentrés à plus haute teneur en terres rares, entre 30 et 70%. On parle donc de phase d'« enrichissement ». (Schüler et al., 2011) De nombreuses techniques existent pour réaliser cette séparation, mais trois d'entre elles sont particulièrement utilisées : les séparations magnétiques et par gravité sont surtout employées face à des minerais de monazite et de xénotime, alors que la flottation est utilisée pour traiter la bastnéasite. Ces différents procédés ne modifient en rien la structure chimique du minerai. (CNUCED, 2014 ; EPA, 2012)

La séparation magnétique consiste à séparer les minéraux en se basant sur leur sensibilité à l'action d'un champ magnétique, alors que la séparation par gravité exploite les différentes densités des minéraux pour les séparer. (Gouvernement du Canada, 2009) La technique de séparation par flottation est la plus utilisée. Elle est appliquée notamment dans les gisements de Bayan Obo (Chine), Mountain Pass (USA) et Mount Weld (Australie). Elle permet de séparer les minéraux en mettant à profit leurs différentes propriétés superficielles en contact

avec l'air et l'eau. Le principe général consiste tout d'abord à ajouter divers réactifs chimiques à la pulpe, qui est un mélange d'eau et de minerai broyé. Ces réactifs vont rendre les minéraux convoités hydrophobes. On insuffle ensuite de fines bulles d'air dans cette même pulpe. Les particules hydrophobes vont donc privilégier le contact avec les bulles d'air et remonter à la surface. Une mousse va progressivement se former et être évacuée par débordement. Le concentré de terres rares peut ainsi être récupéré. (Blazy et Jdid, 2000)

À l'issue de cette étape, on obtient donc le minéral porteur de terres rares. Cependant, les terres rares se trouvent dans une structure encore trop compacte que pour pouvoir les récupérer. La suite du traitement consiste donc à prendre le concentré obtenu et à faire une attaque chimique. Deux grandes voies sont généralement utilisées : la voie acide ou la voie basique. Une fois l'attaque chimique réalisée, on obtient un concentré chimique de terres rares qu'il est possible de dissoudre pour le faire passer dans la phase suivante de séparation. Ici, on a encore toutes les terres rares entre elles, non séparées, mais exemptes des autres impuretés. Notons également qu'à cette étape, des déchets radioactifs sont libérés ! (Rollat, 2014)

Une fois qu'on a produit un concentré contenant toutes les terres rares, l'objectif est ensuite d'obtenir des terres rares purifiées sous forme de solution. On passe alors à la phase de séparation. Aujourd'hui, cette étape se réalise automatiquement via une extraction liquide-liquide. Pour cela, on utilise des batteries de mélangeurs/décanteurs. On va séparer par solvant les ETR contenus dans une solution aqueuse. Compte tenu de la proximité chimique des terres rares entre elles, leur séparation en éléments individuels est très difficile. Il faut donc renouveler un nombre important de fois cet échange « phase aqueuse / solvant » dont l'effet individuel est faible mais qui, à terme, permet de réaliser la totalité des séparations. Le produit final consiste en des solutions purifiées en chacune des terres rares. (Rollat, 2014)

Il faut ensuite les transformer en oxydes. Pour ce faire, on prend la ou les solutions d'intérêt, à laquelle/auxquelles on rajoute un agent précipitant, par exemple du NaOH, NH₄OH, Na₂CO₃... Une fois filtré, on obtient un « gâteau de filtration » qui contient la terre rare sous une forme solide (hydroxydes, carbonates...). On le passe ensuite dans un four de calcination pour finalement récupérer des poudres de terres rares. (Rollat, 2014)

Bien que les oxydes résultant de ces procédés peuvent être commercialisés tels quels, un traitement supplémentaire est généralement appliqué pour produire des métaux purs de haute qualité. (CNUCED, 2014 ; EPA, 2012 ; Rollat, 2014) Une dernière étape consiste donc à raffiner ces oxydes pour les transformer en métaux rares individuels. Pour ce faire, des techniques d'électrolyse à base de sels fondus ou de réduction métallothermique ou gazeuse sont les plus souvent utilisées. (CNUCED, 2014 ; EPA, 2012 ; Rollat, 2014)

2. Exemples concrets d'exploitation de terres rares et risques environnementaux associés

Plusieurs projets d'exploitation des terres rares au Groenland existent, mais aucun d'entre eux n'a pour le moment atteint les phases d'extraction. Avant que celles-ci n'entrent en production effective, il est important de prendre conscience des menaces que représentent l'extraction et le traitement de ces éléments sur l'environnement fragile du Groenland. L'objectif ici est donc, sur base d'exemples concrets, d'évaluer les risques environnementaux auxquels le territoire nordique pourrait être confronté.

2.1. Choix des cas d'étude

L'idée première consistait à trouver des exemples d'exploitations de terres rares existantes se rapprochant un maximum de la situation groenlandaise, en vue d'évaluer les risques environnementaux que pourrait rencontrer la production de ces éléments au Groenland.

Cependant, force est de constater qu'il est difficile de trouver un cas concret équivalent au contexte groenlandais. En effet, comme déjà répété à plusieurs reprises, les gisements de terres rares à travers le monde sont extrêmement diversifiés. Chacun d'entre eux possède des caractéristiques spécifiques, qui résultent en des impacts sur l'environnement différents. De plus, les milieux favorables à l'accumulation des terres rares au Groenland sont eux aussi très hétérogènes, rendant difficilement possible une généralisation des impacts. Par ailleurs, si la plupart des articles s'accordent pour confirmer que la production des terres rares peut être désastreuse pour l'environnement, les impacts environnementaux ne sont réellement documentés que pour peu de gisements.

Le cas chinois est probablement le plus révélateur des énormes problèmes environnementaux liés à cette activité. Cependant, la plupart des mines ne sont pas comparables à ce qui pourrait se passer au Groenland si les extractions commençaient. Tout d'abord, bon nombre de gisements de terres rares exploités en Chine ne correspondent pas à ceux présents au Groenland. Il s'agit majoritairement d'argiles latéritiques d'ion-adsorption, pour lesquels les méthodes de traitement diffèrent un peu plus des procédés généralement appliqués aux autres minerais¹¹. De plus, les normes environnementales appliquées en Chine sont reconnues être beaucoup plus laxistes que celles pratiquées dans les régions occidentales. Il y a fort à espérer que les normes de protection environnementale seront plus strictes au Groenland, et que les impacts environnementaux ne rattraperont jamais les niveaux de contamination atteints en Chine. Toutefois, passer totalement outre les exploitations chinoises aurait été dommage. Il

¹¹ « Les teneurs en oxydes d'éléments de terres rares de ces gisements sont très faibles (entre 0.05 et 0.2%), par contre l'extraction et le traitement sont faciles. Les oxydes de terres rares sont aisément produits par traitement à l'acide et les éléments radioactifs sont très peu présents. Mais cette "facilité" d'exploitation et de traitement a son revers : un impact environnemental global important dans cette vaste région du fait de la multiplication des sites d'extraction. » (Drezet, 2010)

semblait malgré tout intéressant de présenter un cas ayant engendré tant de dommages à l'environnement. Cela permet d'avoir une idée de la possible ampleur des dégâts lorsque ce type d'exploitation n'est pas correctement géré et encadré. Le choix a été donc fait de présenter brièvement le gisement de Bayan Obo car il s'agit du plus grand gisement de terres rares au monde. Il ne s'agit pas d'un site d'argiles d'ion-adsorption. Ses caractéristiques sont donc plus en accord avec les environnements que l'on retrouve au Groenland. Il sera néanmoins important de garder à l'esprit les précédentes mises en garde lors de la lecture du point consacré à ce gisement.

Les impacts environnementaux d'un autre gisement seront également étudiés. Le gisement de Mountain Pass (USA) n'est pas forcément le plus représentatif non plus de la situation groenlandaise, mais il possède néanmoins des caractéristiques qui se rapprochent de celles des milieux favorables à l'accumulation de terres rares au Groenland. De plus, comparées à la Chine, les normes législatives américaines correspondent davantage à ce qui devrait être mis en place au Groenland.

2.2. Bayan Obo

2.2.1. Description générale

Le gisement de Bayan Obo, situé au nord de la Chine dans la région autonome de la Mongolie intérieure, est actuellement le plus grand gisement de terres rares au monde (Smith et al., In press) et la source principale de terres rares légères (Clamadieu et Butstraen, 2010 ; Wang et al., 2014). Il fut initialement développé en 1927 pour exploiter ses ressources en fer. La production de terres rares n'a commencé que beaucoup plus tard. Les ETR sont extraits dans une mine à ciel ouvert (Wang et al., 2014) à partir de la bastnaésite, ce minerai étant en fait un sous-produit de la mine de fer (Clamadieu et Butstraen, 2010 ; Jordens et al., 2013).

2.2.2. Méthodes d'extraction et de traitement utilisées à Bayan Obo

Étant donné que les mines de Mountain Pass et de Bayan Obo exploitent toutes les deux la bastnaésite, les procédés employés pour enrichir le minerai et traiter les ETR sont assez similaires. Ils sont brièvement explicités pour Mountain Pass au point suivant. Les techniques utilisées à Mountain Pass ont d'ailleurs fourni un modèle de base pour le traitement de la bastnaésite en général (Paul et Campbell, 2011).

2.2.3. Impacts environnementaux

Pendant de nombreuses années, la Chine a fourni le monde en terres rares, notamment grâce à son gisement de Bayan Obo. Cette exploitation s'est longtemps faite au détriment de l'environnement. Les dommages écologiques observés autour de la mine ont commencé à inquiéter les autorités chinoises qui ont depuis pris certaines mesures pour tenter de limiter ces impacts. Le gisement de Bayan Obo fournit un exemple concret démontrant les risques encourus en cas de mauvaise gestion d'une exploitation de terres rares.

Environ 8 millions de tonnes de résidus sont produites chaque année à Bayan Obo. Ces déchets sont simplement éliminés dans des décharges ouvertes (Wang et al., 2014). Une partie de ces résidus rejetés dans l'environnement contiennent encore des ETR, ce qui a conduit à une augmentation des concentrations de ces éléments dans l'eau, l'air et les sols. Wang et al. (2014) ont ainsi évalué la concentration d'ETR dans l'air autour du gisement de Bayan Obo. Ils ont conclu que celle-ci dépassait les standards réglementaires et que ces émissions atmosphériques provenaient de sources anthropiques. Les effets potentiels d'une exposition à des concentrations d'ETR plus élevées ne sont pas encore connus. Davantage de recherches seraient donc nécessaires afin d'évaluer précisément les risques pour l'environnement.

De nombreuses poussières toxiques emplissent l'air autour de Bayan Obo. Chen et al. (2004, cité par Drezet, 2010) estiment que près de 62 tonnes de poussières contenant du thorium seraient émises chaque année rien que lors de la phase de broyage du minerai.

Les émissions atmosphériques ne se limitent pas aux poussières. La production des terres rares génère également le rejet d'énormes quantités de gaz. Ceux-ci peuvent contenir de nombreuses substances toxiques, dont de l'acide sulfurique, de l'acide fluorhydrique et du dioxyde de soufre, de l'eau acide et des déchets radioactifs. (Corniou, 2012) D'après le ministère de protection environnementale (MEP, 2009, cité par Drezet, 2010), la production d'une tonne de concentrés de terres rares libèrerait dans l'atmosphère entre 9.600 et 12.000 m³ de gaz contenant des fluorures, du SO₂, du SO₃ et des poussières. Selon la même source, 75 m³ d'eaux usées acides ainsi qu'une tonne de résidus radioactifs seraient également rejetés par tonne de concentrés de terres rares produite. (MEP, 2009, cité par Drezet, 2010)

Les sols ont également été contaminés, notamment par des métaux lourds. À proximité des décharges, un relevé d'échantillons a révélé que les quantités de thorium présentes dans le sol étaient 36 fois supérieures à la normale (Corniou, 2012).

Les bassins à résidus couvrent quant à eux d'énormes superficies. Ils s'étendent sur plus de 11 km², ce qui représente l'équivalent de 10.000 piscines olympiques ! (Corniou, 2012 ; Schüler et al., 2011) Plus préoccupant, les boues peuvent contenir des déchets radioactifs. On estime ainsi que pour 100.000 tonnes de concentrés de terres rares traitées chaque année, environ 200 tonnes d'oxyde de thorium sont rejetées dans ces boues. Ces étangs de stockage pollués ont largement contaminé les nappes phréatiques (Buckley, 2010, cité par Drezet, 2010). Selon un rapport du Bureau de la protection environnementale de Baotou (2006, cité par Corniou, 2012), les eaux souterraines de la région auraient été exposées et contaminées par plus de 10 produits chimiques différents.

Les articles scientifiques relatant les impacts environnementaux générés par l'extraction des terres rares à Bayan Obo sont finalement peu nombreux et restent assez vagues. Il reste difficile d'établir une liste précise des contaminants rejetés dans l'environnement, et encore moins de les quantifier.

2.3. Mountain Pass

2.3.1. Description générale

Mountain Pass est une mine de terres rares située en Californie, aux Etats-Unis. Il s'agit d'un gisement associé à des carbonatites datant du précambrien qui renferme des teneurs en terres rares allant de 8 à 12%. (Castor, 2008 ; Molycorp, 2013) Le principal minerai exploité pour la production de terres rares est la bastnaésite. Mountain Pass est le seul gisement de terres rares actuellement exploités sur le territoire américain, même si d'autres sont en cours d'exploration. (Paul et Campbell, 2011) Sa production a commencé en 1951. À l'époque, le pays était capable de satisfaire sa demande interne et dominait la production mondiale. Cependant, à partir des années 1980, la dominance des Etats-Unis a cédé la place à la Chine. Non seulement la mine de Mountain Pass n'était pas assez compétitive face aux terres rares importées de Chine, mais en plus, elle a rencontré de graves problèmes environnementaux. Les coûts trop élevés de remise aux normes ont finalement mené à sa fermeture en 2002.

2.3.2. Méthodes d'extraction et de traitement utilisées à Mountain Pass

Les techniques de transformation des terres rares utilisées à Mountain Pass ne diffèrent pas sensiblement de ce qui a été expliqué précédemment, et sont synthétisées dans la figure 22. Environ 3.300 tonnes de morts-terrains et 1.800 tonnes de bastnaésite étaient extraits chaque jour de la mine à ciel ouvert, à hauteur de 250 jours par an. La majorité des infrastructures de traitement a été installée sur le site même (Tetra Tech, 2001).

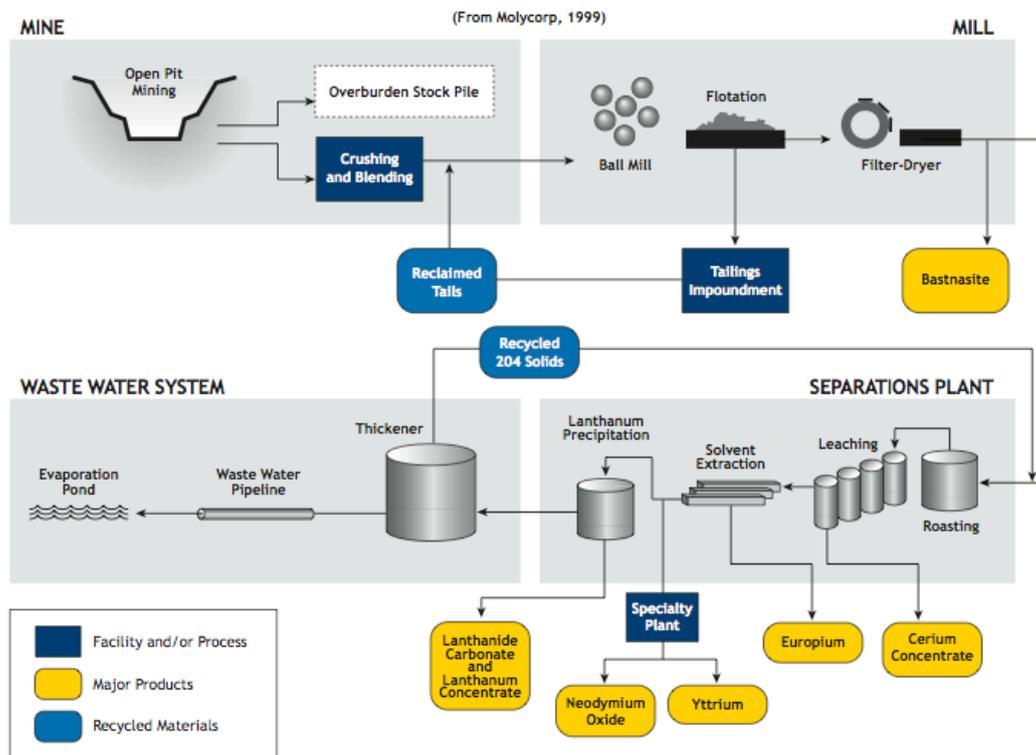


Figure 21 : Aperçu des principales étapes de production des terres rares à Mountain Pass (Tetra Tech, 2001)

2.3.3. Impacts environnementaux

Les impacts environnementaux générés par l'exploitation de la mine de terres rares de Mountain Pass sont étrangement très peu discutés dans la littérature. Ceux rencontrés à Bayan Obo, quoi que très généraux, permettent tout de même d'avoir un aperçu de la diversité des problèmes que peut présenter l'exploitation de ces éléments. Or, dans le cas de Mountain Pass, très peu de données sont finalement accessibles. On sait par exemple que, du fait que la plupart des installations de transformation ont été localisées sur le site même, les impacts environnementaux sont d'autant plus nombreux que des risques apparaissent à chaque étape de traitement (Tetra Tech, 2001). Le rejet des eaux usées et l'entreposage des résidus miniers sont les deux éléments qui ont le plus contaminé l'environnement sur le site de Mountain Pass (MIT, s.d.). Il a été reconnu que les sols et les eaux souterraines autour du site ont été fortement pollués (Paul et Campbell, 2011). Les contaminants qui ont été recensés comprennent le baryum, le strontium, le thorium, l'uranium, le plomb... (Juetten, 2011)

Plus particulièrement, la littérature se focalise presque essentiellement sur l'élément qui a causé la fermeture de la mine en 2002. Les méthodes utilisées sur le site américain exigeaient l'emploi de grandes quantités d'eau. Après utilisation, les eaux usées étaient transportées par pipeline sur une distance d'environ 20 km jusqu'à un étang d'évaporation. Le souci majeur a été le déversement accidentel, entre 1984 et 1998, de plus de 2 millions de litres de ces eaux usées dans le désert californien (Ali, 2014). Cet écoulement s'explique par de nombreuses fuites révélées dans le système de pipeline qui transportait ces eaux usées (Ali, 2014). Ce pipeline traversait notamment des terres du National Park Service¹² (Juetten, 2011).

3. Exemple de projet d'exploitation au Groenland : Kvanefjeld

Le projet minier de Kvanefjeld est l'un des projets d'exploitation de terres rares les plus avancés au Groenland. Il est ici présenté afin de comprendre l'ampleur de la mise en route d'une telle activité.

3.1. Localisation

Le gisement de Kvanefjeld se situe dans le sud-ouest de l'île (fig. 23), au nord du complexe alcalin d'Ilimaussaq. En 2007, la compagnie australienne Greenland Minerals and Energy (GME) a obtenu une licence pour explorer la zone du projet minier de Kvanefjeld. La mine qu'elle projette d'exploiter se trouve à environ 10km de la ville de Narsaq et 35km de Narsarsuaq. D'un point de vue logistique, le gisement de Kvanefjeld est assez bien situé. Les eaux profondes des fjords lui donnent un accès maritime tout au long de l'année et mènent

¹² « Le National Park Service (NPS) est une agence fédérale des États-Unis qui est chargée de gérer les parcs nationaux, les monuments nationaux et quelques autres propriétés historiques et zones protégées du domaine fédéral. » (XXX)

directement à l'Océan Nord Atlantique. La proximité de l'aéroport de Narsarsuaq constitue également un atout.

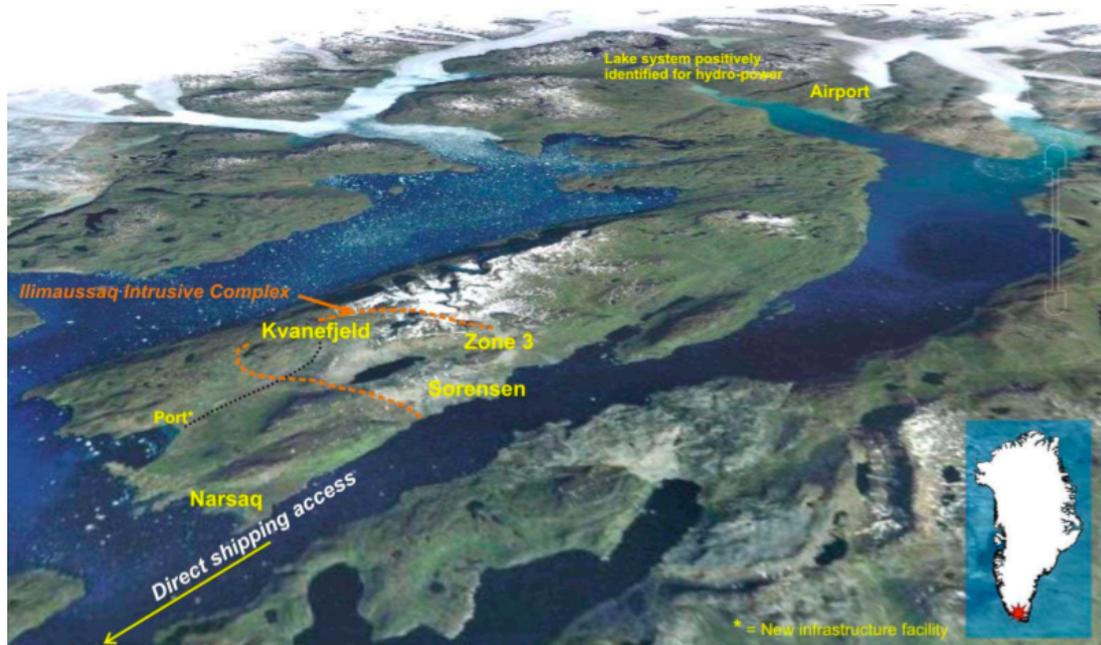


Figure 22 : Localisation du gisement de Kvanefjeld, Groenland (GME, 2014a)

3.2. Description du projet

Le projet Kvanefjeld concerne l'un des plus grands gisements de terres rares au monde. Il s'agit d'un projet d'extraction mixte terres rares - uranium. Les activités de la mine se concentreront prioritairement sur la production de terres rares, et plus particulièrement sur les éléments qui deviennent critiques à l'échelle mondiale : le néodyme, l'euprium, le dysprosium, le terbium et l'yttrium. Vu les niveaux suffisants d'uranium et de zinc dans le gisement, ces éléments seront également exploités en tant que sous-produits. (GME, 2013) C'est d'ailleurs l'un des points forts de ce projet. En effet, l'extraction et le traitement des terres rares sont des processus extrêmement coûteux. Or, ici, les terres rares vont être exploitées en même temps que d'autres métaux dont les produits pourront être commercialisés, ce qui augmentera la rentabilité du gisement.

En 2007, GME a donc obtenu un permis pour explorer la zone. Conformément aux droits que cette licence lui procure, la société a prospecté la zone en effectuant un certain nombre de prélèvements afin d'évaluer le potentiel du gisement. Plusieurs études devront être menées avant que GME ne puisse demander une licence d'exploitation pour développer le projet. En cas de résultat favorable à ces évaluations, la phase de construction devrait démarrer en 2015 et les premières extractions seraient prévues pour 2017. (GME, 2013)

Le projet Kvanefjeld consistera en une mine à ciel ouvert. (GME, 2013) L'exploitation minière s'accompagnera donc forcément d'une forte modification du paysage. (Elaw, 2010) À côté de cela, le projet prévoit la construction d'une usine de transformation à proximité de la

mine, d'une raffinerie, d'un port, d'un parc à résidus, de logements pour les travailleurs, et d'autres d'infrastructures pour assurer l'approvisionnement en énergie, la communication et l'accès à la mine. Afin d'avoir un bon aperçu de l'ampleur de ce projet, ces différentes structures seront développées plus en détails dans les lignes qui suivent.

En plus de l'exploitation minière en tant que telle, la construction de tous ces éléments va aussi engendrer des impacts environnementaux. Ces sources de pollution n'étant pas directement liées à l'extraction des terres rares, elles ne seront pas développées dans le cadre de ce travail. Toutefois, elles ne doivent pas être négligées pour autant. En effet, 80% de la pollution marine arctique proviendrait des infrastructures et activités humaines terrestres (UNEP, 1995, cité par AINA, 2008)

3.2.1. L'usine de transformation

L'usine de transformation devrait se situer à proximité de la mine à ciel ouvert (fig 24). (GME, 2013) C'est le lieu où les métaux seront séparés du minerai. L'usine comprendra les activités de concassage, de broyage et de flottation. Il est prévu que celle-ci fonctionne 365 jours par an. (GME, 2013) L'étude de faisabilité évalue le traitement de 3 millions de tonnes de minerais chaque année. L'usine devrait ainsi produire 230.000 tonnes par an d'un concentré contenant 14% d'oxydes de terres rares et 0,25% U₃O₈. Le raffinage de ce concentré devrait, quant à lui, engendrer une quantité de 7.000 tonnes par an de terres rares critiques (Pr, Nd, Eu, Dy, Tb, Y) et 16.000 tonnes par an de TRLE (surtout du Ce et du La). (GME, 2014)

3.2.2. La raffinerie

Le projet prévoit également le développement d'une raffinerie. À l'origine du projet, plusieurs localisations avaient été envisagées pour l'implantation de cette raffinerie. L'option qui a finalement été retenue par GME est de la situer à proximité de la mine et de l'usine de transformation (fig. 24). (GME, 2014 : 7)

Les concentrés produits dans l'usine de transformation seront donc envoyés dans la raffinerie où ils y seront traités et transformés en oxydes de terres rares. Ces produits intermédiaires peuvent être utilisés et commercialisés tels quels, mais le plus souvent, ils devront subir un traitement supplémentaire pour séparer les terres rares en oxydes individuels et produire des métaux rares purs. (CNUCED, 2014 ; GME, 2014)

3.2.3. Le port

Mis à part un aéroport situé à Narsarsuaq (fig. 24), aucune autre infrastructure de transport n'est disponible dans la zone du projet. Pour envisager une exploitation à grande échelle, il sera donc nécessaire de construire diverses installations pour assurer la bonne accessibilité de la région et le transport des marchandises. Un port devrait être aménagé à Narsap Ilua (fig. 24). (GME, 2013) Les installations portuaires seront constituées d'un quai pour les navires jusqu'à 32.000 tonnes, ainsi que d'un autre quai de plus petite capacité pour la réception d'équipements et de marchandises. Le port devrait également disposer d'installations de

stockage et de chargement. (Orbicon, 2011) Les concentrés obtenus dans l'usine de transformation devraient être dirigés par pipeline vers le port. Ce dernier devrait aussi être accessible de Narsaq par une route de 2,5km. (GME, 2013)

3.2.4. Le parc à résidus

Les déchets obtenus après le passage du minerai dans l'usine de transformation consistent en un mélange de roches concassées, de produits chimiques de traitement et d'eau. En général, ceux-ci sont envoyés dans des parcs à résidus qui peuvent être des réservoirs naturels ou artificiels. (Schüler et al., 2011) La gestion de ces résidus suscite de vives inquiétudes d'un point de vue environnemental. En effet, la zone de stockage privilégiée par GME pour entreposer ces déchets miniers se situerait dans le lac naturel de Taseq, à proximité du site (fig. 24 : voir RSF A – Residue Storage Facility). (Drezet, 2011 ; GME, 2014 ; Schüler et al., 2011) Cette problématique sera abordée plus en détails dans l'analyse des risques environnementaux.

3.2.5. Les logements

Le projet Kvanefjeld devrait voir l'arrivée de travailleurs étrangers. Il est donc prévu de construire des logements pour ces employés dans la périphérie nord de la commune de Narsaq. (GME, 2013) La taille de ce village d'habitations n'est toutefois précisée dans aucun document.

3.2.6. Autres infrastructures

Les infrastructures encore à développer dans le cadre du projet minier de Kvanefjeld sont nombreuses. Parmi celles-ci, il y a bien évidemment la construction de routes. Une source d'énergie sera également nécessaire. Dans un premier temps, les combustibles fossiles produiront l'électricité et, ensuite, une alimentation en hydro-électrique prendra le relais. Des pipelines seront également construits, un système de télécommunication sera installé, etc.

3.2.7. Synthèse visuelle

La carte à la page suivante synthétise et localise les différentes composantes du projet minier de Kvanefjeld.



Figure 23 : Aperçu des infrastructures clés du projet minier de Kvanefjeld (GME, 2014c)

3.3. Méthodes de traitement utilisées à Kvanefjeld

Les principales étapes de traitement du minerai de terres rares à Kvanefjeld peuvent être synthétisées par le schéma suivant :

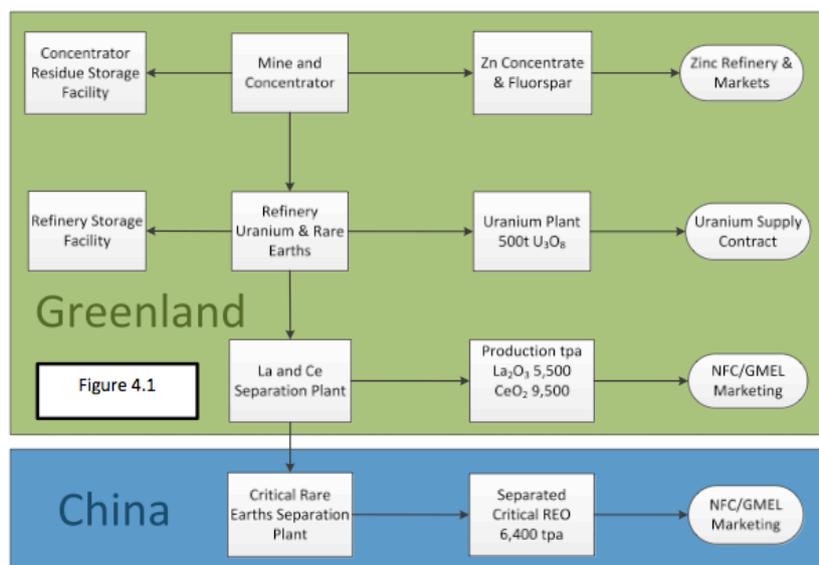


Figure 24 : Principales étapes de traitement des terres rares extraites à Kvanefjeld (GME, 2014c)

Grâce à la présence d'une usine de transformation et d'une raffinerie, plusieurs étapes de traitement seront réalisées directement sur place, au Groenland. Les dernières publications de GME indiquent que le minerai de Kvanefjeld devrait être traité en utilisant un procédé classique de flottation. Cette première étape va produire des concentrés riches en terres rares et en uranium, ainsi que du sulfure de zinc et du fluorure de calcium. (GME, 2014) Les minéraux de la gangue restants après flottation seront déshydratés et stockés dans le parc à résidus. L'eau récupérée sera recyclée dans l'usine de transformation, où elle sera traitée afin d'éliminer le fluorure de calcium qui peut être vendu avec le concentré de sulfure de zinc. Une petite quantité d'eau en excès sera produite, et celle-ci ne pourra pas être recyclée vers l'usine de transformation. Une fois traitée, elle sera déversée dans le fjord Ikersuaq Bredefjord. (GME, 2013)

L'étape suivante consiste à envoyer les concentrés vers la raffinerie où plusieurs phases de traitement seront nécessaires pour en extraire les composants valorisables. Le raffinage est réalisé via des procédés hydrométallurgiques (GME, 2013). « *L'hydrométallurgie consiste en une succession d'opérations chimiques caractérisées par la mise en solution d'un métal et son élaboration à partir de cette solution ; elle comprend principalement les étapes suivantes :*

- *Lixiviation : mise en solution du métal ;*
- *Purification : extraction de la solution des impuretés autres que le métal désiré ;*
- *Élaboration du métal désiré. » (Rizet et Charpentier, 2000)*

L'objectif est donc de séparer les terres rares et l'uranium des concentrés. Contrairement aux techniques habituelles de production de terres rares qui utilisent des procédés complexes à haute température, la lixiviation à Kvanefjeld se fera à l'acide sulfurique sous pression atmosphérique. L'uranium est ensuite extrait de la solution de lixiviation par solvant. Cette méthode est appliquée dans la plupart des mines d'uranium à travers le monde et présente donc un faible risque technologique. Les terres rares non séparées seront quant à elles récupérées de manière conventionnelle sous forme de carbonates. (GME, 2013)

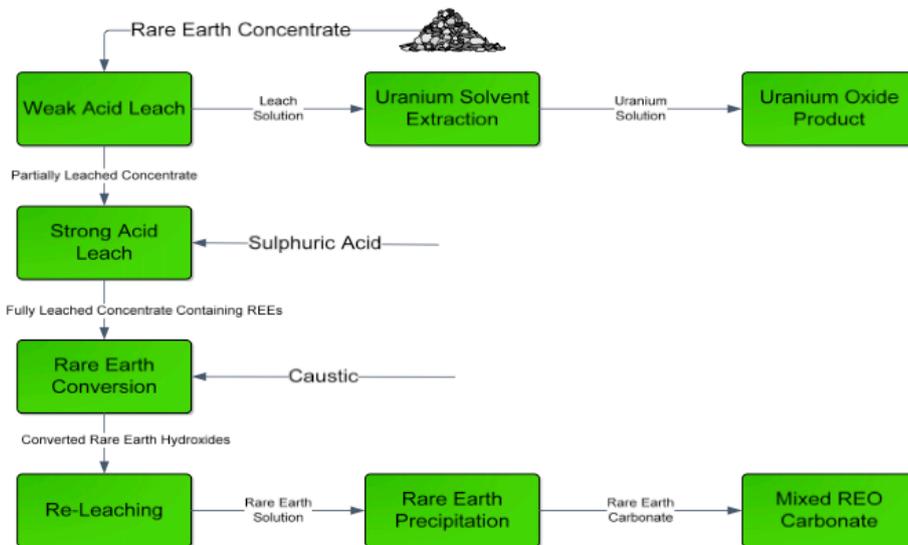


Figure 25 : Etapes de traitement réalisées dans la raffinerie de Kvanefjeld (GME, 2013a)

Bien que la majeure partie des activités se déroulera sur le site même de Kvanefjeld, GME a récemment signé un protocole d'accord avec la société chinoise NFC¹³, leader dans les technologies de séparation des terres rares. GME devrait utiliser l'usine de séparation de NFC en Chine pour traiter les concentrés produits à Kvanefjeld et séparer les terres rares en éléments individuels. (GME, 2014b)

4. Risques environnementaux liés à l'exploitation de terres rares au Groenland

L'augmentation des prix qu'a connue le marché des terres rares ces dernières années, le quasi-monopole chinois sur ces ressources ainsi que l'instauration de quotas d'exportation de plus en plus restreints par la Chine ont poussé les pays du monde entier à chercher de nouvelles sources d'approvisionnements. Plusieurs nouveaux projets d'exploitation ont ainsi vu le jour de part et d'autre de la planète. Dans la précipitation de vouloir répondre à la demande croissante, les risques sont grands de voir de nouveaux sites s'ouvrir sans mettre en place de mesures de protection de l'environnement.

Le Groenland fait l'objet de nombreuses demandes de permis d'exploration. Étant particulièrement courtisé en raison de ses vastes ressources en terres rares, on est en droit de se demander quels impacts environnementaux il pourrait subir.

¹³ China Non-Ferrous Metal Industry's Foreign Engineering and Construction Co. Ltd.

4.1. Constat général

Bien que de nombreux articles mentionnent et alertent sur les risques environnementaux liés à l'extraction et au traitement des terres rares, force est de constater qu'il est difficile de trouver des données précises et quantifiées relatives aux impacts réellement générés. McLellan et al. (2014) indiquent d'ailleurs dans leur étude que les informations concernant les impacts environnementaux sont difficilement, voire pas du tout accessibles. Ainsi, malgré de nombreuses discussions sur les dommages causés par ce type d'exploitation en Chine, seules de vagues estimations sont finalement disponibles, généralement en ce qui concerne les émissions de poussières, de fluorure, ou les taux d'utilisation des réactifs, et proviennent le plus souvent de sources gouvernementales. Dans leur conclusion, les auteurs relèvent le manque de travaux et de recherches académiques à ce niveau, et recommandent la réalisation d'études permettant de quantifier les externalités environnementales liées à la production de terres rares. Ils proposent dans un premier temps de concentrer les recherches sur les impacts liés aux sources d'exploitation conventionnelles, pour ensuite s'intéresser aux sources non conventionnelles. (McLallen, 2014)

Cependant, même si les impacts environnementaux ne sont pas précisément détaillés, il est indéniable que les activités de production des terres rares peuvent engendrer un certain nombre d'effets négatifs pour l'environnement. La gravité de ces risques est très variable d'un site d'exploitation à un autre et dépend fortement des caractéristiques du gisement et des procédés d'extraction et de traitement qui y sont réalisés. Chaque gisement possède en effet ses propres caractéristiques géochimiques. Les procédés utilisés seront donc spécifiques à chaque mine, et les impacts et les contaminants préoccupants seront différents d'un cas à l'autre. La mobilité des polluants dans l'environnement dépendra aussi des caractéristiques géologiques et hydrologiques du milieu où se situe la mine, ainsi que des caractéristiques des différents processus utilisés et des méthodes de gestion des déchets. (EPA, 2012)

Les projets existants d'exploitation de terres rares ne sont pas très encourageants du point de vue de la sécurité environnementale. En effet, toutes les mines de terres rares actuelles ont mené à de graves dommages écologiques. (Corniou, 2012) La mauvaise gestion des gisements exploités dans le passé ont engendré un mouvement général de méfiance vis-à-vis de tout projet d'extraction de terres rares. Même si les technologies actuelles d'extraction et de traitement sont différentes de ce qu'elles étaient dans le passé, et même si les industries essaient de maîtriser davantage leur impact sur l'environnement, les expériences passées ont été tellement négatives que ces exploitations sont assez mal perçues. (Ali, 2014)

4.2. Impacts environnementaux des différentes étapes de production

De manière générale, les premières étapes de production des terres rares sont assez similaires à celles d'autres industries minières. Les émissions et les polluants rejetés ne diffèrent donc pas fortement (Cheminfo, 2012 ; EPA, 2012). Comme toute exploitation minière, des impacts

environnementaux apparaissent à chaque étape et sont donc susceptibles de contaminer le milieu environnant si aucune mesure de protection adaptée n'est mise en œuvre (EPA, 2012).

Schüler et al. (2011) ont réalisé un schéma (fig. 27) présentant les principaux risques environnementaux associés à différentes étapes de production des terres rares. Ce schéma, bien que très simplifié, donne un aperçu général des impacts auxquels on peut s'attendre.

Comme précisé dans l'introduction de ce point, les impacts environnementaux sont finalement très peu documentés avec précision. Les lignes qui suivent tenteront tout de même de faire le point sur les principaux risques listés dans la littérature. Deux types d'impacts sont toutefois davantage décrits et constituent les deux plus grands risques liés à l'exploitation des terres rares : il s'agit des impacts liés aux résidus de flottation et aux déchets radioactifs. Ceux-ci seront dès lors développés dans des sous points individuels.

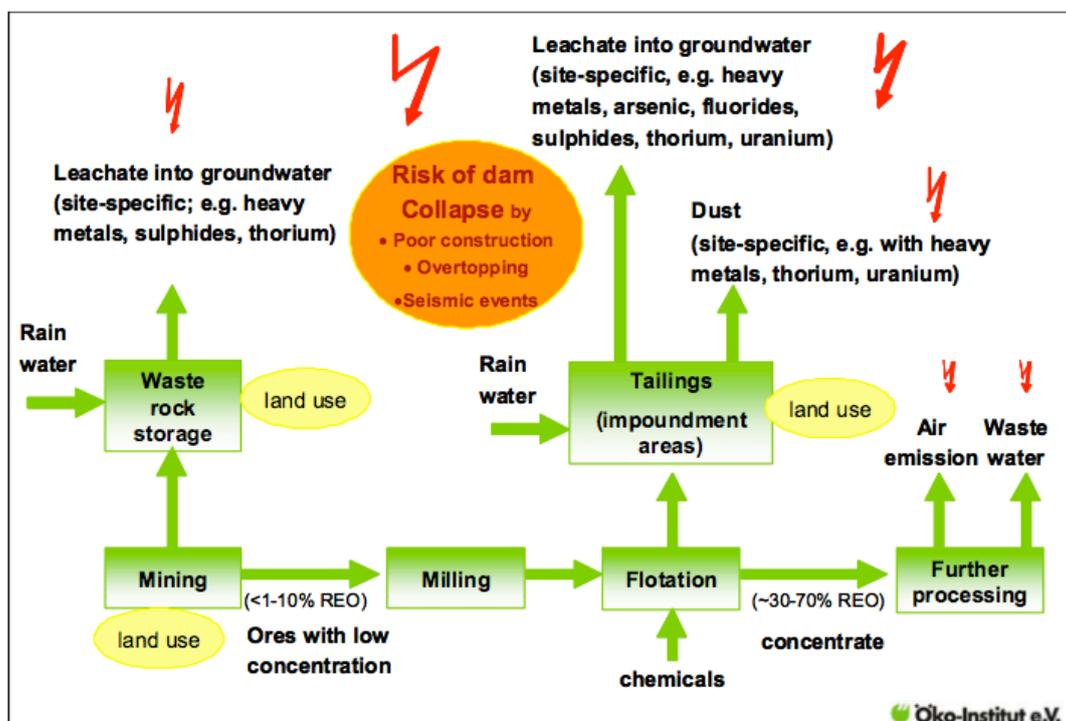


Figure 26 : Risques environnementaux associés aux différentes étapes de production des terres rares. Les éclairs rouges représentent les principaux risques, et leur taille indique la dangerosité de ces risques. (Schüler et al., 2011)

La plupart des mines de terres rares sont des mines à ciel ouvert. C'est par exemple le cas à Mountain Pass (USA), à Bayan Obo (Chine), à Mount Weld (Australie), et ce sera le cas aussi au Groenland, notamment pour les mines de Kvanefjeld (GME, 2013) et Kringlerne (Tanbreez, 2014). L'exploitation à ciel ouvert va inévitablement entraîner une modification du paysage. La figure 28 montre une représentation schématique réalisée par GME de ce à quoi devrait ressembler le gisement de Kvanefjeld après plusieurs années d'extraction. La construction des différentes infrastructures, que ce soient les routes, les pipelines, les usines, et autres, aura aussi une incidence sur le paysage.



Figure 27 : Représentation schématique du gisement de Kvanefjeld après plusieurs années d'extraction (GME, 2014)

Les mines à ciel ouvert entraînent généralement un déplacement important de la végétation native, ce qui les classe parmi les exploitations minières les plus destructives de l'environnement. (Elaw, 2012) Les quantités de morts terrains générées sont souvent gigantesques et peuvent contenir des substances toxiques.

L'exploitation de terres rares prend également beaucoup de place en termes d'occupation du sol. La mine en tant que telle couvre déjà une superficie assez large. À cela s'ajoute les usines de traitement, les lieux de stockage des déchets, la construction des routes... (Golev et al., 2014 ; Schüller et al., 2011) Cela risquerait notamment d'entraîner une fragmentation des habitats.

Les étapes d'extraction vont engendrer des déchets de roches qui vont devoir être stockés. Non seulement l'entreposage de ces déchets va prendre de la place au niveau de l'utilisation du sol, mais en plus, ils vont être exposés à l'eau de pluie. Or, ces morceaux de roche peuvent contenir des substances toxiques telles que des fluorures, des sulfures, des acides, des métaux lourds et des substances radioactives. Ces éléments nocifs risquent d'être lessivés par l'eau de pluie, de se répandre et de contaminer les eaux et les sols si aucune installation de traitement des eaux n'est mise en place (Schüller et al., 2011).

L'extraction et le traitement des terres rares peuvent également causer des émissions atmosphériques nocives si aucune mesure n'est prise pour les éviter. En Chine, on estime ainsi que pour une tonne de terres rares produites, 8.5 kg de fluorine (un gaz toxique) et 13 kg de poussière sont générés. (Hayes-Labruto et al., 2013 ; Hurst, 2010) Le principal risque est lié aux poussières engendrées sur le site. Celles-ci peuvent provenir des opérations d'extraction minière, du broyage du minerai, du transport, du stockage des résidus... (Schüller et al., 2011) Ces poussières peuvent contenir des éléments radioactifs qui pourraient contaminer l'air et le sol. Si ces poussières se posent sur le sol, elles pourraient être assimilées par les plantes et de ce fait s'introduire dans la chaîne alimentaire (Chin et al., 2012). D'autres substances toxiques peuvent y être retrouvées, notamment des métaux lourds. (Schüller et al., 2011) Le raffinage des concentrés de terres rares peut aussi causer des émissions atmosphériques : SO₂, HCl, poussières, substances radioactives (Schüller et al., 2011). En fonction de la source d'énergie utilisée, il peut également y avoir de fortes émissions de CO₂, contribuant ainsi à accentuer le changement climatique (Schüller et al., 2011).

Plusieurs auteurs s'accordent également sur le fait que les procédés utilisés sont forts consommateurs d'eau (Golev et al., 2014 ; Massari et Ruberti, 2013 ; Schüller et al., 2011). Les rejets d'eaux usées impliquent eux aussi des quantités énormes. On estime par exemple que, chaque année, les mines de terres rares autour de Batou (Chine) produisent environ 10 millions de tonnes d'eaux usées contenant des acides et des substances radioactives, et qu'une grande part de ces eaux est directement déversée dans l'environnement sans traitement préalable (Folger, 2011, cité par Massari et Ruberti, 2013). D'autres auteurs estiment que pour 120 kt d'oxydes de terres rares produites annuellement en Chine, les rejets d'eaux usées s'élèvent à 20 millions de tonnes (Liao et al., 2013). Hayes-Lbruto et al. (2013) évaluent quant à eux qu'une tonne de terres rares produirait 200 m³ d'eaux usées.

Bien que la séparation des terres rares et leur raffinage soient souvent mentionnés comme particulièrement difficiles et générateurs d'impacts environnementaux, ces derniers sont finalement très peu documentés dans la littérature. Chin et al. (2012) indiquent que le raffinage d'une tonne de terres rares génère environ 75 m³ d'eau acide. Schüller et al. (2011) parlent d'un procédé particulièrement consommateur d'énergie, sans plus de détails. Liao et al. (2013) rappellent qu'il est nécessaire de répéter plusieurs fois les étapes de séparation des terres rares avant d'obtenir les éléments individuels. En effet, l'une des particularités de la production des terres rares repose sur le fait que la plupart des applications industrielles nécessitant ces éléments requiert des niveaux de pureté très élevés, allant par exemple jusqu'à 99,9999% pour les luminophores. (Drezet, 2012) Or, avant de pouvoir atteindre un tel degré de purification, de très nombreuses opérations doivent être réalisées, ne fut-ce que d'abord pour séparer les différents ETR entre eux. En conséquence, une grande quantité d'acides et de bases sont consommés à répétition (Liao et al., 2013) et chaque passage va impliquer le rejet de polluants (Drezet, 2012).

Enfin, une fois la fermeture de la mine, celle-ci sera exposée aux eaux de pluie. Les substances toxiques et radioactives risquent d'être lessivées et répandues dans l'eau et les sols, si aucune mesure de gestion et de traitement des eaux n'est prise. (Schüller et al., 2011) Selon Storm van Leeuwen (2014), aucune mine exploitant l'uranium n'a pu être réhabilitée jusqu'à présent. Il y a donc de quoi s'inquiéter.

4.2.1. Résidus de flottation

L'un des plus grands risques lié à l'exploitation de terres rares est la gestion des résidus après le traitement par flottation. Comme indiqué précédemment, ces déchets sont stockés dans des parcs à résidus, souvent des plans d'eau naturels ou artificiels. La composition des eaux polluées est spécifique à chaque site car elle dépend de la nature du minerai qui est exploité. Les agents de flottation utilisés ne seront pas les mêmes d'une mine à l'autre. Dans la plupart des cas, ces déchets sont au moins constitués de substances radioactives, de fluorures, de sulfures, d'acides et de métaux lourds. (Schüller et al., 2011)

L'un des problèmes réside dans le fait que ces résidus sont continuellement exposés aux eaux de pluie et aux eaux de ruissellement. Si les zones de stockage ne sont pas assez étanches, il y

a un risque non négligeable que les substances toxiques soient lessivées et polluent les eaux souterraines. (Schüler et al., 2011)

Une autre menace sérieuse peut apparaître en cas de forte pluie. En effet, le parc à résidus doit être en mesure de pouvoir stocker les grands volumes d'eau de pluie, sous peine de déborder et de déverser de grandes quantités d'eau non traitée et de contaminer l'environnement voisin. (Schüler et al., 2011)

Ces aires de retenue doivent également rester stables au fil des ans. Elles doivent donc être assez solides pour ne pas céder en cas, par exemple, de tremblement de terre. L'effondrement du parc à résidus miniers pourrait engendrer une catastrophe écologique en répandant des eaux et de la boue remplis de substances toxiques dans les milieux environnants. Cette stabilité doit être assurée sur le long terme afin qu'aucun accident ne survienne même après la fermeture de la mine. (Schüler et al., 2011) Or, la situation actuelle du Groenland n'est pas des plus favorables. En effet, le réchauffement climatique, en provoquant la fonte des glaces et du permafrost, ne contribue pas à cette stabilité. Au contraire, cela pourrait considérablement affecter les plans d'eau et la stabilité des sols. (Schüler et al., 2011)

Dans le cas du gisement de Kvanefjeld, la gestion des résidus est d'autant plus critique que GME prévoit de stocker ces déchets dans le lac Taseq, situé à proximité du site. (GME, 2014 : 6) Cette zone peut être visualisée sur la figure 24. L'extraction des terres rares telle que l'envisage GME devrait générer une énorme quantité de déchets miniers. Ceux-ci, moins radioactifs que le minerai de départ, seront constitués d'un mélange de roches finement broyées, d'eau et de produits chimiques qui peuvent être toxiques. La quantité de résidus devant être entreposée dans ce fameux lac s'élève à des centaines de millions de mètres cubes. (Storm van Leeuwen, 2014) Or, une étude menée par Risø sur les impacts environnementaux de l'exploitation d'uranium à Kvanefjeld et publiée en 1990 alertait déjà sur les dangers que cette solution de stockage occasionnerait. La pollution de ce lac pourrait en effet progressivement contaminer l'ensemble du système fluvial avec des substances toxiques, parmi lesquelles des substances radioactives, du fluor et des métaux lourds. La production de terres rares étant étroitement liée à l'uranium, ce risque est donc bien réel. De plus, l'étude indiquait également que les installations de traitement des eaux usées prévues à la sortie du lac ne seraient pas capables de gérer correctement les importantes quantités d'eau, en particulier après de fortes pluies ou suite à la fonte des neiges. (Risø, 1990, cité par Drezet, 2011 et par Schüler et al., 2011) L'environnement aquatique du lac Taseq sera très certainement perturbé par cette exploitation. Il est difficile de trouver des informations quant à la composition du milieu aquatique du lac. Selon Risø (1990), aucun poisson n'a été observé dans le lac.

De nombreuses inconnues subsistent encore quant au devenir de ces résidus. Dans son rapport, Storm van Leeuwen (2014) soulève plusieurs questions : Ces résidus vont-ils plutôt former une masse argileuse compacte ou une boue semi-liquide ? Quelles conséquences pourraient avoir le gel et le dégel sur ces résidus ? Qu'arriverait-il si ces résidus s'asséchaient et étaient emportés par le vent sur de longues distances ?

4.2.2. Déchets radioactifs

L'un des gros dangers de l'exploitation de terres rares provient des déchets radioactifs qui y sont souvent associés. La plupart des gisements de terres rares contiennent en effet du thorium radioactif et, dans certains cas, de l'uranium. Leur concentration varie fortement d'un gisement à l'autre. (Golev et al., 2014 ; Schüler et al., 2011) Plusieurs auteurs ont estimé qu'une tonne de terres rares pourrait produire jusqu'à 1.4 tonnes de déchets radioactifs. (Hayes-Labruto et al., 2013) Lorsque la concentration en uranium dans le gisement est suffisante, une co-production terres rares – uranium peut être envisagée, comme c'est le cas à Kvanefjeld. Par contre, le marché du thorium étant très limité (Gambogi, 2013, cité par Golev et al., 2014), cet élément est généralement écarté et considéré comme un déchet (Storm van Leeuwe, 2014).

L'exploitation minière de terres rares pourrait introduire ces éléments radioactifs dans l'air, le sol et les eaux. (Chin et al., 2012) La présence de ces substances doit être prise en compte lors de l'extraction du minerai, mais également dans la plupart des étapes de traitement qui suivent l'extraction. En effet, des déchets radioactifs sont générés à chaque étape et ils doivent donc être gérés avec précaution. (Schüler et al., 2011)

Si l'on reprend à nouveau le cas spécifique du gisement de Kvanefjeld, l'uranium va être exploité en tant que co-produit de la production de terres rares. Storm van Leeuwe, expert en analyse de cycle de vie, a évalué la durabilité de l'exploitation de l'uranium dans le gisement de Kvanefjeld. Les conclusions de son rapport, publiées en avril 2014, sont sans appel : le développement de ce gisement n'est pas durable ! Des déchets radioactifs vont être générés après les phases d'enrichissement et de raffinage. Les résidus de la première étape seront stockés dans le lac Taseq, comme expliqué précédemment. Ceux-ci seront moins radioactifs que la roche d'origine car la majorité du minerai radioactif aura été séparée. Les déchets après raffinage auront par contre une radioactivité près de dix fois supérieure à la roche hôte ! En plus de cela, les radionucléides ainsi que d'autres éléments toxiques mais non radioactifs seront présents sous forme soluble, les rendant très mobiles. (Storm van Leeuwe, 2014) Ils pourraient donc causer la contamination des eaux souterraines. (Chin et al., 2012)

4.3. Écotoxicité des ETR

Les terres rares sont naturellement présentes dans l'environnement. (Gonzalez et al., 2014) Cependant, les effets écologiques que pourrait avoir une plus grande concentration de ces éléments dans l'environnement sont assez mal connus. (Chin et al., 2012) Or, plusieurs études récentes semblent indiquer que les niveaux d'ETR détectés dans l'hydrosphère augmentent (Kulaksız et Bau, 2011, cités par Gonzalez et al., 2014) et que ces éléments ont tendance à s'accumuler dans les sols, les plantes et les lichens proches des zones minières (Anawar et al., 2012 ; Li. et al., 2013, tous cités par Gonzalez et al., 2014).

4.3.1. Biodisponibilité et bioaccumulation

Les ETR libérés sous la dynamique des activités anthropiques se manifestent généralement sous une forme plus soluble et plus biodisponible que leurs équivalents naturels. (Eawag, 2013) Ces ETR solubles peuvent migrer dans le sol, contaminer les eaux souterraines et se disséminer dans d'autres zones, causant la pollution des rivières, des lacs, etc. (Gonzalez et al., 2014 : 149)

La mobilité et la biodisponibilité des ETR sont influencées par divers facteurs dont le pH, la concentration, la température... Les chlorures, les nitrates, les sulfates de terres rares sont solubles, tandis que les carbonates, les phosphates et les hydroxydes sont insolubles (Wells et Wells, 2001, cités par Gonzalez et al., 2014). Ces différences de solubilité jouent un rôle dans la persistance de ces composés dans l'environnement et les métabolismes.

En ce qui concerne la capacité de bioaccumulation des terres rares, il reste encore de nombreuses inconnues. (Eawag, 2013) La plupart des études à ce sujet ne se concentrent que sur les organismes aquatiques et sur trois ou quatre éléments appartenant principalement au groupe des terres rares légères. (Gonzalez et al., 2014) Les autres ETR n'ont pas encore été évalués. Il est donc impossible de déterminer s'il existe une tendance à la bioaccumulation pour l'ensemble des ETR. De plus, les résultats d'une étude à l'autre sont parfois contradictoires : certains auteurs annoncent par exemple une diminution de la bioaccumulation avec l'augmentation du nombre atomique (Weltje et al, 2002, cités par Gonzalez et al., 2014), alors que d'autres concluent le contraire (Tsuruta, 2006, cité par Gonzalez et al., 2014). Cela s'explique notamment par des différences dans les organismes étudiés et dans les conditions expérimentales. Les études actuelles sont encore trop peu nombreuses pour permettre une comparaison et établir un modèle de prévision universel.

4.3.2. Écotoxicité

Les connaissances actuelles sous-estiment très probablement le potentiel toxique des terres rares (Gonzalez et al., 2014). Pas ou peu de données existent sur le comportement de mobilité de ces éléments dans l'environnement, et leur toxicité sur les organismes vivants est encore mal connue (Paul et Campbell, 2011 ; Wang et al., 2014) Gonzalez et al. (2014) indiquent que les niveaux de toxicité varient selon la voie d'administration, la forme chimique des ETR et l'organisme expérimental. Les organismes aquatiques sont les plus étudiés, mais les travaux restent trop peu nombreux que pour établir des tendances claires et universelles de l'écotoxicité des terres rares pour les organismes aquatiques. En général, on observe que l'exposition à des concentrations excessives peut conduire à une multitude de réponses par les organismes, mais aucun mécanisme permettant d'interpréter les effets biologiques des lanthanides n'a été universellement accepté (Gonzalez et al., 2014).

Il y a donc un réel manque d'études à ce sujet. Pourtant, avec la multiplication des projets d'exploitation, il est nécessaire d'approfondir les connaissances dans ce domaine afin de

prendre les mesures adéquates en cas de danger avéré et d'éviter le plus possible les pollutions par ces éléments.

5. L'Arctique et le Groenland : Des régions vulnérables

L'une des hypothèses initiales de ce mémoire supposait que le Groenland était une région particulièrement sensible, du fait de ses conditions climatiques extrêmes, de sa biodiversité unique et de processus locaux spécifiques.

L'Arctique constitue encore à présent, mais qui sait pour combien de temps, l'une des régions du monde les moins perturbées par les activités humaines. Son environnement est actuellement encore assez bien préservé, mais les pressions se font de plus en plus fortes et cette situation risque de se dégrader rapidement.

5.1. Une biodiversité fragile

Comparé à l'énorme diversité biologique que l'on retrouve dans les régions tropicales, le nombre d'espèces peuplant la zone arctique est assez restreint (UNESCO, 2010). Leur biodiversité n'en est pas pour autant moins remarquable. En effet, en raison des conditions climatiques extrêmes qui règnent en Arctique, les espèces ont été forcées de développer des caractéristiques spécifiques pour s'adapter à ce milieu singulier (ACIA, 2004 ; UNESCO, 2010). Ce capital génétique unique contribue à maintenir une biodiversité planétaire riche, mais il rend ces écosystèmes particulièrement vulnérables au changement.

Plusieurs facteurs expliquent la fragilité des écosystèmes arctiques. Parmi ceux-ci, on peut noter que les chaînes alimentaires sont très courtes, se résumant bien souvent à de simples relations proie/prédateur. De plus, les organismes arctiques atteignent la maturité très tardivement, ont des périodes de reproduction courtes, et se renouvellent très lentement (Bard, 1999).

Le réchauffement climatique que subit cette région du monde perturbe déjà fortement les écosystèmes. En plus de cela, ils doivent faire face à de nombreux stress supplémentaires apportés par les activités humaines.

L'Arctique renferme des milieux encore peu perturbés où les écosystèmes fonctionnent encore à l'état quasi naturel (UNESCO, 2010). Le Groenland en particulier est majoritairement recouvert d'une épaisse calotte glaciaire. Seuls 15% de son territoire, situés le long des côtes, sont libres de glace, et une partie importante de ces régions accessibles est totalement inhabitée et dépourvue de toute activité humaine. C'est là que se trouve la plupart de la biodiversité (Jensen et Christensen, 2003). Le développement d'activités industrielles sur ces territoires risque de bouleverser, en générant des pollutions, en détruisant ou en fragmentant les habitats...

5.2. Sensibilité aux pollutions

L'Arctique et le Groenland sont encore souvent considérés comme faisant partie des rares régions de la planète encore vierges et peu affectées par les activités humaines. Bien que peu exploitées, ces parties du monde ne sont pas pour autant préservées de toute pollution. L'association environnementale Robin des Bois a ainsi publié, en 2009, un inventaire des sites pollués en Arctique (fig. 29). Elle a recensé 2.750 zones contaminées à l'intérieur du cercle polaire arctique¹⁴, dont 468 au Groenland. 19 sites correspondent à des pollutions liées à des activités de prospection ou d'exploitation minière. (Robin des Bois, 2009)

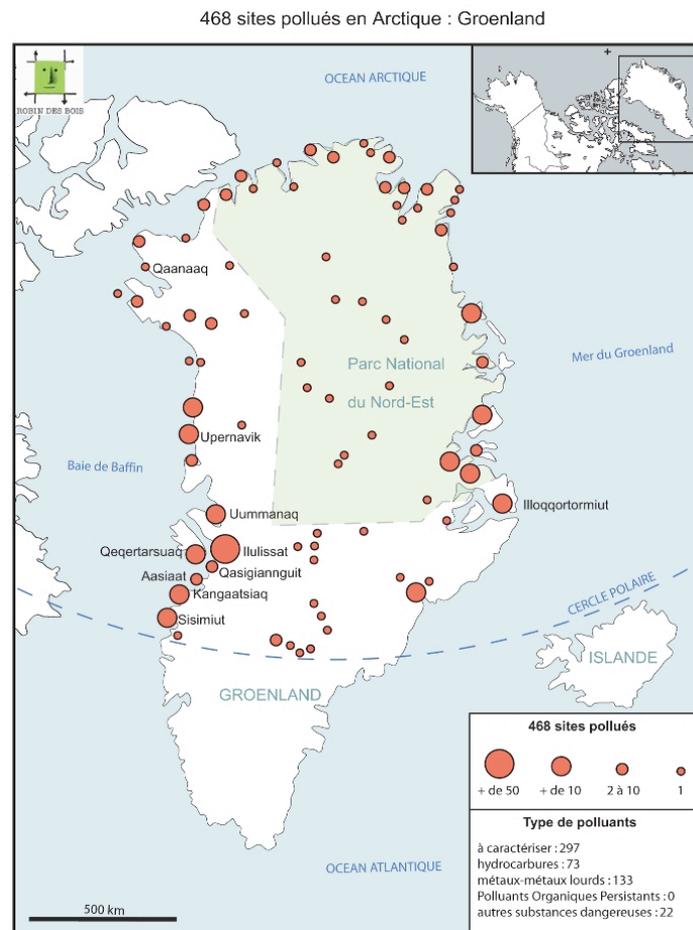


Figure 28 : Sites pollués au Groenland, à l'intérieur du cercle polaire arctique (Robin des Bois, 2009)

De nombreux travaux indiquent que la région arctique est étroitement connectée au reste du monde, et qu'elle reçoit de ce fait des contaminants qui peuvent provenir de sources parfois très éloignées. (AMAP, 2009 ; Bard, 1999) Elle est donc malgré tout exposée aux polluants. Ces substances toxiques sont transportées sur de longues distances par voies diverses : les vents, les courants marins, les animaux migrateurs, et d'autres mécanismes de redistribution. L'Arctique est particulièrement affecté par trois groupes de polluants provenant de sources extérieures : les gaz acidifiants (SO_x), les métaux lourds issus de la combustion de combustibles fossiles et de l'exploitation minière, et les polluants organiques persistants

¹⁴ Excepté la Russie.

(POP). La contamination de ce milieu a conduit à une bioaccumulation des polluants par le plancton à la base de la chaîne alimentaire. On observe ensuite une bioamplification au fur et à mesure que l'on monte dans les niveaux trophiques. Ainsi, les grands prédateurs comme les phoques, les cétacés et les ours polaires seront davantage contaminés avec des concentrations plus élevées. (Bard, 1999)

Plusieurs facteurs limitent les processus de dégradation des substances toxiques en Arctique : la faible luminosité, les températures très basses... Ces caractéristiques particulières font de cette région une sorte de réservoir où s'accumule la pollution (AMAP, 1997). De plus, pendant de nombreuses années, les polluants se sont déposés et accumulés dans les glaces arctiques sous l'effet des basses températures. On a longtemps cru que ces contaminants resteraient piégés, mais le dégel dû au réchauffement climatique est en train de libérer ces substances, accentuant la pollution en Arctique (ACIA, 2004).

Une activité industrielle en Arctique va générer des émissions de CO₂ supplémentaires dans l'atmosphère qui vont accélérer, plus qu'ailleurs dans le monde, l'augmentation de l'acidité de l'Océan. En effet, en Arctique, les basses températures des eaux de surface facilitent la dissolution du CO₂. De par sa plus grande densité, l'eau froide et plus douce va s'enfoncer en profondeur entraînant avec elle le CO₂ dissout. De plus, la fonte des glaces entraîne la présence d'une plus grande quantité d'eau douce dans laquelle plus de CO₂ pourra se dissoudre et favoriser ainsi la formation de l'acidifiant (acide carbonique-H₂CO₃) au détriment du carbonate de calcium CaCO₃ indispensable à la formation du squelette et coquilles des crustacés. Il n'y a pas encore assez d'études et de recul pour appréhender l'effet de l'augmentation de l'acidité sur l'écosystème marin. Probablement qu'il sera bénéfique pour certaines espèces et néfaste pour d'autres. Une partie pourrait également s'adapter aux nouvelles conditions. (Cheek, 2014)

L'environnement arctique est également plus vulnérable à la radioactivité que toute autre partie du monde, et les activités industrielles risquent d'augmenter l'exposition de l'environnement à cette radioactivité. (AMAP, 2009)

On n'a donc pas encore réellement commencé à exploiter ce territoire que les pollutions sont déjà présentes en masse. L'exploitation des ressources minérales risque donc d'être un facteur important de changement, ajoutant aux pollutions existantes une charge complémentaire de substances néfastes pour l'environnement. Sachant que ce type d'activité industrielle a fortement contribué au réchauffement climatique et à la fonte inquiétante des glaces arctiques, on peut se demander si le développement du secteur minier au Groenland est réellement une bonne idée et ne risque pas d'aggraver encore plus la situation.

CONCLUSION

Si l'on se réfère aux sites d'extraction de même type ou s'en rapprochant existants dans d'autres pays, les impacts environnementaux sur le site de Kvanefjeld, et de manière générale au Groenland, devraient être importants. Certains seront inévitables, d'autres pourront être

limités si les mesures adéquates sont prises. L'île sera-t-elle capable d'imposer des normes de protection environnementale sévères afin de préserver son environnement unique ?

Parmi les risques majeurs et possibles, on peut citer :

- Le stockage des déchets, pouvant contenir des substances toxiques et même radioactives, dans le lac Taseq à proximité du site avec risque de contamination de ce lac et propagation à tout le système fluvial.
- Le stockage des eaux usées dans des réservoirs artificiels ou naturels avec risque de fuite et de contamination.
- Les émissions atmosphériques nocives (HCl, SO₂), poussières contenant notamment des éléments radioactifs pouvant contaminer l'air et le sol.

PARTIE 4 : DISCUSSION

INTRODUCTION

Malgré les risques environnementaux bien réels, le Groenland se rapproche chaque jour un peu plus d'une exploitation de ses ressources minérales en terres rares. La discussion aura pour but d'entamer une réflexion sur la faisabilité et le réel besoin de développer de nouveaux gisements de terres rares, qui plus est dans des régions aussi fragiles que le Groenland, courant ainsi le risque de répéter des scénarios désastreux d'un point de vue environnemental.

Faut-il réellement continuer dans une voie d'épuisement des ressources naturelles de la Terre, jusqu'à repousser les frontières et à exploiter les zones les plus retirées de notre planète ? Est-ce vraiment la solution de chercher toujours plus loin, de creuser toujours plus profond à la recherche de nouvelles sources d'approvisionnement ?

Cette partie analysera également le potentiel de quelques pistes de solution afin de limiter les risques environnementaux liés à la production de terres rares.

Il est important de rappeler que seul le point de vue environnemental est pris en compte dans ce travail. D'autres aspects, économiques et sociaux, jouent également un rôle et peuvent justifier l'exploitation des gisements de terres rares au Groenland.

1. Un paradoxe flagrant

Parmi les secteurs dépendants des terres rares, les énergies vertes occupent une place importante. À moyen et à long terme, certains ETR risquent même de devenir critiques à leur développement. Les énergies vertes sont censées apporter une solution durable à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles. En effet, en développant ce type de technologie, l'un des objectifs était de ne plus devoir dépendre des ressources non renouvelables et de s'orienter vers une société plus durable. Or, on constate que plus on avance dans la croissance verte, plus le besoin pour ces éléments augmente. L'existence même et le fonctionnement de certaines technologies vertes dépendent parfois entièrement des ressources non renouvelables que sont les terres rares.

Mais ce n'est pas tout. Non seulement les énergies vertes sont censées limiter le recours aux ressources non renouvelables, mais elles sont également supposées être plus propres. Or, là aussi, l'utilisation des terres rares dans les technologies vertes vient ternir leur image puisque leur production s'effectue dans des conditions environnementales désastreuses.

Il y a donc un paradoxe flagrant entre les procédés d'obtention des terres rares extrêmement polluants et l'utilisation de ces éléments dans bon nombre de technologies vertes. Le passage à un modèle énergétique plus « vert » fait face à de nombreux défis techniques. Même s'il y a une volonté de faire des progrès et d'aller dans une nouvelle direction, il semble que l'on ait toutefois tendance à toujours revenir sur nos pas. On résout le problème en surface sans réellement s'attaquer à la source. Cela remet en question, semble-t-il, le modèle énergétique vers lequel on se dirige.

2. Mise en route d'un projet d'exploitation

Sous l'effet de la demande croissante, de l'augmentation des prix et de la diminution des quotas d'exportation chinois, des opportunités de développement de nouveaux projets d'exploitations des terres rares se sont présentées (CNUCED, 2014). Cependant, les barrières à l'entrée sont nombreuses et peu de projets sont en mesure de remplir tous les critères de succès : concentration en ETR économiquement exploitable, distribution adéquate entre terres rares lourdes et légères, accessibilité à la main d'œuvre et aux autres ressources nécessaires, faisabilité technique et économique, respect des normes environnementales, financement du projet... (Habib et Wenzel, In press)

En outre, avant d'atteindre la phase d'extraction, tout projet d'exploitation minière doit passer par de nombreuses étapes. Il peut ainsi s'écouler 10 à 15 ans entre la découverte d'un gisement et sa mise en production (CNUCED, 2014 ; EPA, 2012). « *En conséquence, des processus de recyclage ou des substituts pourront potentiellement avoir été développés entre temps et/ou la prolifération de projets de production à travers le monde pourrait conduire à des excédents de production et à une baisse consécutive des prix des terres rares.* » (CNUCED, 2014)

La figure 30 représente un schéma classique des étapes et du temps nécessaire à chacune d'entre elles avant d'arriver à la construction de la mine.

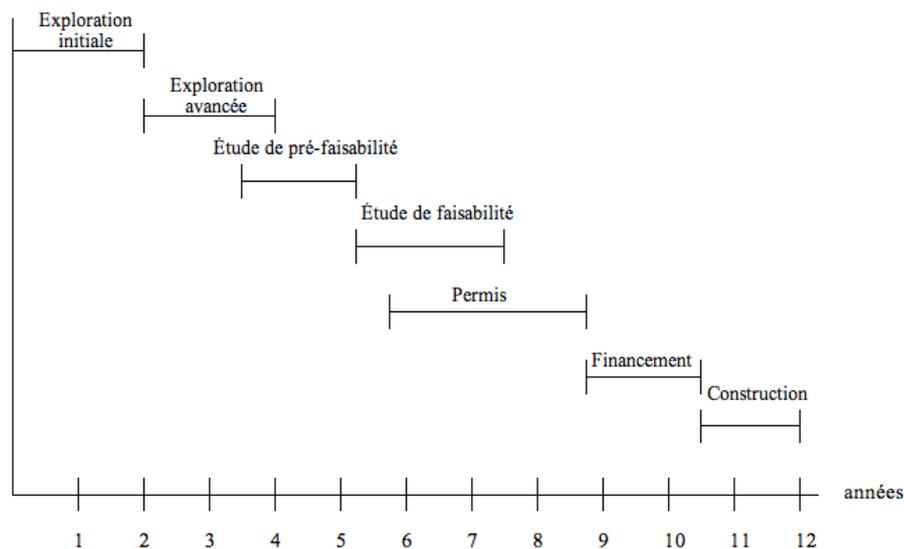


Figure 29 : Ligne de temps typique d'un projet d'exploitation de terres rares (EPA, 2012)

3. Rentabilité des mines

Non seulement la mise en route d'un nouveau projet d'exploitation des terres rares est longue et coûteuse, mais en plus leur rentabilité n'est pas assurée. Bon nombre de nouveaux projets se sont lancés sur base d'hypothèses économiques liées à la hausse des prix (Rollat, 2014). En effet, « *si la hausse des cours porte atteinte à la capacité des acteurs d'acquérir des stocks, elle rend, à terme, certains gisements plus rentables* ». (Barreau et al., 2013) Plusieurs

facteurs influencent la rentabilité des exploitations : les découvertes géologiques, les progrès technologiques et les prix (Barreau et al., 2013). Dans le cas des terres rares, la rentabilité d'une mine sera également déterminée par sa composition en terres rares ainsi que par le type de minéraux (Rollat, 2014). Aujourd'hui, le monde rencontre un problème de disponibilité en terres rares lourdes. Un gisement enrichi en ces éléments sera donc plus intéressant. De plus, certains minéraux ont davantage été exploités ; leurs procédés de traitement sont donc connus. D'autres, par contre, sont plus complexes et mal connus ; il faudra donc encore développer des techniques permettant de les exploiter (Rollat, 2014).

Si une hausse des prix rend effectivement l'exploitation de certains gisements plus rentables, la mise en route d'un trop grand nombre de mines pourrait faire chuter les prix et, de ce fait, rendre certains gisements économiquement non viables. Avec la volatilité actuelle des prix, il y a un risque qu'une compagnie se lance dans un projet pour ensuite réaliser que celui-ci n'est pas intéressant, et qu'elle abandonne le site sans mettre en place de procédure de réhabilitation (Corniou, 2012).

Les projets actuels de développement de mines de terres rares sont généralement ambitieux. Pourtant, leur viabilité peut être mise en doute en raison des coûts importants de mise en route, de la situation actuelle du marché et de la difficulté à satisfaire les normes environnementales. GME estime que le projet Kvanefjeld au Groenland pourrait être rentable grâce à son exploitation conjointe de terres rares, d'uranium et de zinc. Mais un territoire comme le Groenland sera-t-il capable de mettre en place des structures environnementales plus performantes que celles de la Chine ? La question reste ouverte.

4. Perspectives et pistes de solutions

L'une des principales solutions envisagées par les gouvernements afin de sécuriser leurs approvisionnements en terres rares était de chercher et de développer des gisements hors Chine. N'y a-t-il pas d'autres pistes qui permettraient d'éviter les impacts environnementaux générés par la production de terres rares tout en continuant à faire fonctionner les applications utilisant ces éléments ? Deux propositions ainsi que leur potentiel de développement sont ici décrites : le recyclage et la substitution.

4.1. Recyclage

Jusqu'à récemment, les industriels et les gouvernements ne s'étaient pas vraiment intéressés au recyclage des terres rares. En effet, l'offre abondante fournie par la Chine et les prix bas qu'a connus le marché n'ont pas encouragé les investissements dans la recherche de technologies de recyclage. La situation n'était en effet pas assez attrayante que pour envisager de récupérer ces éléments de manière rentable grâce au recyclage. (BGS, 2011 ; CNUCED, 2014 ; Schüler et al., 2011)

Néanmoins, la forte augmentation du prix des terres rares en 2011 et la crainte d'une pénurie d'approvisionnement due aux restrictions à l'exportation imposées par la Chine ont constitué de forts incitatifs à la recherche d'alternatives, et le recyclage est apparu comme une solution potentielle. (BGS, 2011 ; Schüler et al., 2011)

Les intérêts du recyclage des terres rares sont multiples. Tout d'abord, l'absence ou la présence limitée de gisements exploitables dans certains pays peut les inciter à se tourner vers le recyclage afin de limiter leur dépendance et de sécuriser leur approvisionnement. Cela permettra également de soutenir la transition vers une économie bas carbone, les terres rares étant essentielles au développement des technologies vertes. (Binnemans et al., 2013 ; CNUCED, 2014)

De plus, rappelons que les ETR ne sont pas tous présents dans les gisements dans les mêmes quantités. Le néodyme, par exemple, est plus rare que le lanthane ou le cérium. Cela signifie qu'il faudra extraire davantage de minerais pour satisfaire la demande en néodyme, créant de ce fait un excès pour le lanthane et le cérium. En recyclant le néodyme et, de manière générale les terres rares critiques, on évite de générer des excès pour des ETR dont la demande est limitée, et on réduit l'activité minière. (Binnemans et al., 2013)

L'un des avantages du recyclage est donc qu'il peut se focaliser sur les produits contenant les ETR voulus, alors que tous les éléments sont automatiquement extraits lors de l'exploitation minière. (Golev et al., 2014)

Le recyclage est également important car il permet de réduire la pression sur les ressources naturelles. (Binnemans et al., 2013 ; Golev et al., 2014)

Mais surtout, le recyclage devrait, dans l'idéal, permettre de limiter les impacts environnementaux occasionnés par l'extraction minière. En effet, comparé à l'extraction primaire, le problème des déchets radioactifs ne se pose pas. (BGS, 2011 ; Binnemans et al., 2013 ; Golev et al., 2014) Cependant, le recyclage n'est pas exempt de tout dommage à l'environnement. Généralement, des traitements à la fois physiques et chimiques doivent être appliqués et la plupart des procédures de recyclage actuelles sont très gourmandes en énergie. (Schüler et al., 2011) Elles consomment également de nombreux produits chimiques. Par exemple, les techniques hydrométallurgiques utilisées pour recycler les terres rares contenues dans les aimants nécessitent l'utilisation d'acides minéraux et de réactifs tels que du H₂SO₄, du NaOH et du HF, et génèrent d'importantes quantités d'eaux usées. (Golev et al., 2014) De manière générale, on considère tout de même que les impacts environnementaux du recyclage des terres rares sont moindres par rapport à ceux de l'extraction minière.

À l'heure actuelle, la majorité des technologies de recyclage des terres rares n'en sont encore qu'à leurs débuts. (EPOW, 2011, cité par BGS, 2011) Seules de très petites quantités de terres rares sont effectivement recyclées. Selon un rapport de l'UNEP (2011) évaluant les niveaux de recyclage pour différents métaux, les taux de recyclage sont inférieurs à 1% pour 9 des terres rares, et se situent entre 1 et 10% pour 6 autres de ces éléments. Le scandium et le prométhium n'ont pas été étudiés dans ce document. À titre de comparaison, d'autres métaux tels que le fer, l'aluminium, le cuivre ou le zinc atteignent des niveaux de recyclage entre 25

et 50%, et plus de 50% du plomb est recyclé. La figure 31 illustre les taux de recyclage pour les différents métaux évalués par l'UNEP.

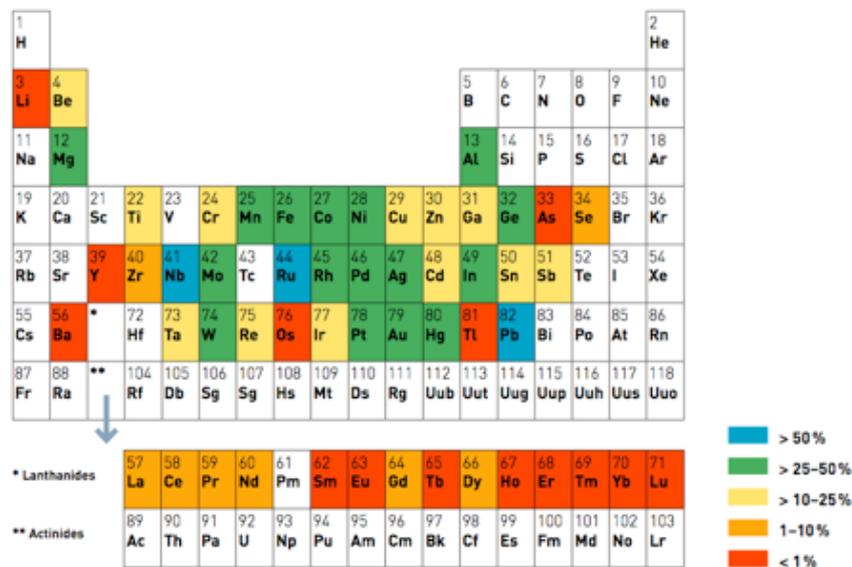


Figure 30 : Taux de recyclage pour une sélection de métaux (UNEP, 2011)

Même si une quantité importante de recherches sur le recyclage des terres rares ont été entreprises ces dernières années, le nombre de procédés ayant été développés de façon commerciale est encore restreint. (Ferron et Henry, 2013 ; Oakdene Hollins, 2010, cité par Schüller et al., 2011) Quelques compagnies au Japon ont annoncé la mise en œuvre de filières de recyclage, dont Toyota, Honda, Hitachi et Mistubishi. (Ferron et Henry, 2013 ; Golev et al., 2014) En Europe, deux cas s'illustrent particulièrement dans le domaine :

- Hydrométal, société belge localisée à Engis, recycle les boues de polissage du verre et les poudres des producteurs d'aimants. (Ferron et Henry, 2013) En 2012, l'entreprise a reçu le prix de l'Energie et de l'Environnement pour la mise en place de sa filière de recyclage des terres rares et sa technologie peu énergivore, à faible impact environnemental et à empreinte CO2 réduite. (Jacquemin, 2012) Depuis 2011, la société a recyclé plus de 1.200 tonnes de terres rares. (Ferron et Henry, 2013)
- Rhodia, filiale du groupe Solvay, a investi dans deux unités de recyclage en France et récupère les terres rares renfermées dans les batteries Ni-MH, en partenariat avec Umicore, et les ampoules basse consommation.

Le potentiel du recyclage des terres rares pour le futur est mitigé. Il existe en effet de nombreux obstacles au développement de techniques de recyclage. Le premier d'entre eux concerne la grande diversité des applications. Comme vu dans le premier chapitre de ce mémoire, les terres rares sont utilisées dans une vaste gamme de produits. Étant donné leur étendue, un système de collecte de ces produits est difficile à mettre en place. (Schüller et al., 2011 ; Henry, 2014) De plus, les quantités d'ETR qui y sont présentes sont souvent infimes (Golev et al., 2014), et les produits demandent souvent un démantèlement important et coûteux (Schüller et al., 2011), rendant le recyclage difficile.

Ensuite, les prix des terres rares sont encore trop faibles pour envisager des procédés de recyclage qui soient économiquement viables. Même si la hausse des prix de 2011 laissait entrevoir une ouverture pour le recyclage, elle ne garantit pas une stabilité suffisante à long terme pour assurer la rentabilité des processus de recyclage. (Schüler et al., 2011) Suite à une discussion avec Philippe Henry, directeur chez Hydrométal, le prix actuel des terres rares ne serait pas assez haut pour stimuler la recherche et le développement dans ce domaine. (Henry, 2014)

De plus, les techniques de recyclage sont extrêmement complexes et coûteuses. (Henry, 2014 ; Schüler et al., 2011)

Notons également que les terres rares recyclées ne sont pas toujours aussi performantes que leur équivalent naturel. C'est le cas par exemple pour les aimants fabriqués à partir de matériaux recyclés. Ceci est dû à une contamination par des impuretés, principalement du carbone et de l'oxygène. (Itakura et al., 2006, cités par BGS, 2011)

En outre, plusieurs appareils contenant des terres rares ont des durées de vie assez longues et ne rentreront pas dans la filière de recyclage avant de nombreuses années. (BGS, 2011 ; Henry, 2014 ; Schüler et al., 2011)

Dans leur étude, Binnemans et al. semblent indiquer qu'il existe un potentiel dans le recyclage des terres rares. Ils concluent toutefois en disant que celui-ci ne remplacera probablement pas l'extraction primaire, mais qu'il peut la compléter. Ils indiquent également que la recherche dans le domaine doit continuer et que le soutien des décideurs politiques sera nécessaire pour l'encourager.

4.2. Substitution

Comme pour le recyclage, une situation de prix bas sur le marché des terres rares n'est pas favorable et n'encourage pas les industriels et les états à investir dans la recherche de substituts aux ETR.

Lorsqu'on parle de substitution, on considère généralement qu'il y a deux voies possibles : soit il existe un matériau alternatif qui possède des propriétés semblables et qui ne pose pas de problème d'approvisionnement – on remplace alors directement les ETR par ce nouvel élément – soit on substitue la technologie existante par une technologie qui permet d'éviter l'utilisation de terres rares – on repense alors totalement la conception du produit. (Schüler et al., 2013)

En raison de leurs propriétés uniques, les terres rares sont difficilement remplaçables par d'autres métaux. Il n'existe actuellement aucun élément disposant de propriétés comparables à celles des terres rares et délivrant les mêmes performances (CNUCED, 2014 ; Golev et al., 2014 ; Haxel et al., 2002, cités par BGS, 2011). Quand un substitut existe, il s'agit bien souvent d'un autre ETR (Bonel et Chapman, 2005, cités par BGS, 2011). L'utilisation d'un matériau totalement différent diminue fortement l'efficacité des produits. De plus, il faudrait

vérifier que les impacts environnementaux de ce nouvel élément soient effectivement moins importants que ceux générés par les terres rares.

S'il est difficile de remplacer directement les ETR par d'autres éléments, il est toutefois possible dans certain cas de trouver des technologies alternatives qui ne nécessitent pas l'emploi de terres rares. Par exemple, les terres rares sont utilisées dans les aimants permanents faisant fonctionner les éoliennes sans engrenage (turbine à entraînement direct). Mais il existe des turbines éoliennes à engrenage, qui ne contiennent pas de terres rares. Elles constituent d'ailleurs actuellement la majeure partie du marché de l'éolien. Cependant, les éoliennes sans engrenage sont plus légères, ce qui les rend particulièrement attractives pour les activités offshore. Elles ont également une meilleure efficacité. (Schüler et al., 2011)

Les terres rares sont également utilisées dans les moteurs des voitures hybrides et électriques, mais des techniques permettant de produire des moteurs dénués de terres rares sont disponibles. (Schüler et al., 2011) Toyota a par exemple annoncé avoir développé des véhicules à économie d'énergie sans utiliser d'aimants à néodyme dans le moteur. (Barreau et al., 2013)

Dans certain cas, il existe donc des techniques alternatives qui n'utilisent pas de terres rares. Cependant, il semble celles-ci soient souvent moins performantes que les technologies utilisant des terres rares. Il faudrait également évaluer les impacts environnementaux de chaque solution. En effet, si les dommages sur l'environnement des produits ne contenant pas de terres rares sont supérieurs à ceux en comportant, il n'y a aucun intérêt à les privilégier.

Si la substitution est envisageable pour certaines applications, d'autres demeurent sans alternative. L'état actuel des recherches sur la substitution ne permet pas d'envisager cette option comme une alternative sérieuse à l'extraction minière.

5. Bref aperçu des aspects législatifs

Dans sa stratégie 2014-2018, le gouvernement groenlandais opte pour une exploitation des ressources minières et pétrolière respectueuse d'un environnement durable. (Gouvernement du Groenland, 2014) Mais, a-t-il la capacité et l'expérience suffisante pour imposer des normes draconiennes à des sociétés qui s'inquiètent plus pour leurs frais d'exploitation que pour l'environnement ?

D'autant plus que, un des objectifs du gouvernement groenlandais est clairement défini dans sa nouvelle stratégie :

« The focus of the most recent strategy was on maintaining a high level of oil/gas and mineral exploration activity. The purpose of this focus was to increase the chances of making new commercial oil or gas finds. And the same will apply for applications by the mineral resources industry for exploration and exploitation licences. This focus must be maintained and also further developed.

The new strategy further focuses on royalty models, the establishment of a geosurvey in Greenland and, broadly, on sustainable development in terms of the environment, training and employment. Infrastructure challenges are also

addressed on a separate basis, and active citizen and stakeholder involvement are central new objectives. » (Gouvernement du Groenland, 2014)

Il est à espérer que, dans sa volonté d'aller vite en besogne, il ne va pas céder au chant des sirènes économiques et qu'il s'entourera, si nécessaire, d'experts internationaux. Le choix des partenaires industriels ne sera pas anodin et devra également être mûrement réfléchi sous peine d'assister à des tensions économiques et politiques délicates. Que se passera-t-il si, par exemple, le choix se portait sur un partenaire chinois juste pour sa capacité d'investissement ? Quelle sera l'image de l'Europe si elle est exclue de ce marché stratégique ? Et celle des Etats-Unis ?

CONCLUSION

En définitive, il semblerait que le potentiel des principales alternatives à l'extraction des terres rares soit limité et qu'elles ne suffiront pas à assurer un approvisionnement suffisant en ces éléments dans un futur proche. La mise en route de nouveaux gisements apparaît comme inévitable. Les terres rares, quant à elles, semblent indispensables à certaines technologies. Si on ne peut pas s'en passer, la seule solution à court terme pour limiter les impacts sur l'environnement est de mettre en place un encadrement strict des activités d'extraction minière, en attendant que les recherches dans ce domaine évoluent. La prise de conscience de la criticité de certains de ces éléments laisse à penser que les gouvernements, les industries et les scientifiques vont davantage se pencher sur le sujet.

À court terme, il serait peut-être intéressant d'investir dans la R&D afin de mettre au point des techniques d'extraction et de traitement plus propres.

À plus long terme, il sera de toute façon nécessaire de trouver des solutions plus durables, les terres rares étant des ressources non renouvelables.

La question à présent est de savoir si le Groenland sera capable de réglementer cette nouvelle activité de manière suffisante face à la pression qui pèse sur ses ressources naturelles.

Dans son désir d'acquérir un statut d'indépendance, surtout financier, il y a également un risque que le territoire se précipite et ne prenne pas assez le temps d'évaluer tout ce que ce type d'exploitation implique.

CONCLUSION

L'intérêt pour les terres rares, ces 17 métaux aux propriétés uniques, s'est fortement accru ces dernières années. Elles sont en effet considérées comme « critiques » par les plus grandes puissances mondiales en raison de leur importance pour l'économie et les technologies vertes, et du risque de pénurie d'approvisionnement qui les entoure.

Sous l'effet de la demande croissante pour ces éléments, des problèmes d'accès à la ressource et de l'augmentation des prix, plusieurs gouvernements et industries sont partis à la recherche de nouveaux gisements hors Chine susceptibles de répondre à leurs besoins.

Le Groenland, longtemps mis à l'écart dans les relations internationales, est tout d'un coup apparu comme particulièrement attrayant. Son sous-sol regorge en effet de richesses minérales encore largement inexploitées, dont des terres rares. Autrefois considérées comme inaccessibles, la fonte des glaces arctiques et de la calotte polaire groenlandaise amorcée par le réchauffement climatique a toutefois changé la donne, les dévoilant au grand jour. Le territoire nordique disposerait de deux gisements parmi les plus grands du monde – Kvanefjeld et Kringlerne – et son environnement particulièrement favorable à l'accumulation de terres rares pourrait en cacher d'autres. Tous les yeux sont donc rivés vers le Groenland, d'autant plus que le gouvernement a récemment voté la levée de l'interdiction d'exploiter des minéraux radioactifs, ouvrant ainsi la porte à l'extraction des terres rares sur son territoire.

Le problème réside dans le fait que, partout ailleurs, l'exploitation des terres rares a résulté en de graves dommages écologiques. La question qui se posait ici était donc de connaître les risques environnementaux que le Groenland encourrait s'il venait à produire ces éléments sur son sol.

Il est ressorti de l'analyse de la littérature que la totalité des auteurs s'accordent à dire que l'extraction et le traitement des terres rares sont polluants et génèrent des risques non négligeables pour l'environnement. Cependant, après un examen plus approfondi, il apparaît clairement que les impacts environnementaux de ce type d'exploitation sont encore très peu documentés et détaillés. Les données ne sont presque jamais quantifiées et les impacts restent somme toute très généraux. De nombreuses inconnues persistent encore, par exemple en ce qui concerne la toxicité des ETR. Deux risques en particulier semblaient toutefois sortir du lot : ceux liés au stockage des résidus et ceux concernant la production de déchets radioactifs.

Ce manque de connaissance est d'autant plus inquiétant que le Groenland n'est pas une région comme les autres et qu'il risque d'être particulièrement vulnérable à la mise en place d'une activité minière aussi polluante sur son territoire. En effet, malgré les croyances selon lesquelles le Groenland est préservé de toute influence extérieure, l'île subit en réalité les conséquences de pollutions émises par des sources parfois très éloignées. Divers procédés transportent les contaminants sur de très longues distances jusqu'en Arctique où ils ont tendance à s'accumuler. L'exploitation des ressources minérales risque donc d'être un facteur aggravant et d'ajouter aux pollutions existantes une charge supplémentaire de substances

néfastes pour l'environnement. Les écosystèmes arctiques, qui ont développé des caractéristiques spécifiques pour s'adapter à ce milieu hostile, sont particulièrement sensibles aux changements et pourraient ne pas s'en remettre.

Finalement se pose la question de savoir si des alternatives ne peuvent pas être envisagées en lieu et place de l'extraction minière de ces éléments. Deux solutions sont souvent mentionnées : le recyclage et la substitution. Après analyse, leur potentiel s'est révélé limité, du moins à court terme. Étant donné que la mise en route d'un gisement de terres rares au Groenland semble inévitable, on ne peut que conseiller aux autorités de ne pas se précipiter et de prendre toutes les mesures possibles pour limiter les risques pour l'environnement. Il est également important de poursuivre les recherches afin d'approfondir les connaissances sur les impacts environnementaux de ce type d'exploitation, mais également dans le but de développer des solutions alternatives moins polluantes.

BIBLIOGRAPHIE

- ACIA - Arctic Climate Impact Assessment, 2004. *Impacts of a Warming Arctic : Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge University Press, 139p.
- ALI, S.H., 2014. « Social and environmental impact of the rare earth industries », *Resources*, 3, pp. 123-134.
- AINA - ARCTIC INSTITUTE OF NORTH AMERICA, 2008. « Land-Based Pollution in the Arctic Ocean : Canadian Actions in a Regional and Global Context », *Arctic*, 61 (1), pp. 111-121
- AMAP - Arctic Monitoring and Assessment Programme, 1997. *Arctic pollution issues : A state of the Arctic environment report*, Oslo, 188p.
- AMAP - Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2009. *Arctic Pollution 2009*, Oslo, 83p.
- ARCTIC INFO, 2013. *Factsheet : Mining in the European Arctic*, 9p.
- ARTE, 2014. « Terres rares mais indispensables », In *Arte*, En ligne, <<http://future.arte.tv/fr/les-terres-rares>>, consulté le 2 juillet 2014.
- BALDI, L., PERI, M. et VANDONE, D., 2013. « Clean energy industries and rare earth materials: Economic and financial issues ». *Energy Policy*, 66, pp. 53-61.
- BARD, S.M., 1999. « Global transport of anthropogenic contaminants and the consequences for the Arctic marine ecosystem », *Marine pollution bulletin*, 38 (5), pp. 356-379.
- BARREAU, B., HOSSIE, G., LUTFALLA, S., 2013. *Approvisionnement en métaux critiques : Un enjeu pour la compétitivité des industries françaises et européennes*, Document de travail du Commissariat général à la stratégie et à la prospective, 52p.
- BERG, L., RAVEN, P., HASSENZAHN, D., 2009. *Environnement*, De Boeck Supérieur, 700p.
- BGS – British Geological Survey, 2011. *Rare Earth Elements*, 53p.
- BIJU-DUVAL, B., 1999. *Géologie sédimentaire : Bassin, environnements de dépôts, formation du pétrole*, Paris, Technip, coll. « Publication de l'Institut français du pétrole », 735p.
- BINNEMANS, K., JONES, P.T., BLANPAIN, B., VAN GERVEN, T., YANG, Y., WALTON, A., BUCHERT, M., 2013. « Recycling of rare earths: A critical review ». *Journal of Cleaner Production*, 51, pp. 1-22.
- CASTOR, S., 2008. « Rare Earth Deposit of North America », *Resource Geology*, 58 (4), pp. 337-347.

- CASTOR, S., 2008. « The Mountain Pass rare-earth carbonatite and associated ultrapotassic rocks, California », *Canadian Mineralogist*, 46, pp. 779-806.
- CHAKHMOURADIAN, A., WALL, F., 2012. « Rare Earth Elements : Minerals, Mines, Magnets (and More) ». *Elements : An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. 5 (8), pp. 333-340.
- CHARLES, N., TUDURI, J., GUYONNET, D., MELLETON, J., POURRET, O., 2013. *Rare earth elements in Europe and Greenland : A geological potential ? An overview*, France, 4p.
- CHEEK, 2014. « Explaining ocean acidification and consequences for Arctic marine ecosystems », In *SciencePoles*, En ligne. <<http://www.sciencepoles.org/interview/explaining-ocean-acidification-and-consequences-for-arctic-marine-ecosystem>>, consulté le 3 août 2014.
- CHEMINFO SERVICE INC, 2012. *Review of the rare earth elements and lithium sectors*, 73p.
- CHEN, Z., 2011. « Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry ». *Journal of Rare Earths*, 29 (1), pp. 1-6.
- CHIN, V., FAN, S., HILL, B., KIYOTA, M., MAGASSOUBA, M., SAHA, M., SUN., C., VOORHEES, J., WANG, F., 2012. *Politics & economics of rare earths*, pp. 1-1/9-35.
- CHRISTMANN, P., 2011. « Les nouvelles ressources en minerais stratégiques : l'exemple des terres rares », *Géoéconomie*, 2011/4 n°59, pp. 75-86.
- CLAMADIEU, J-P., BUTSTRAEN, E., 2010. « Les terres rares, des matières premières stratégiques », *Annales des Mines – Responsabilité et environnement*, 58, pp. 92-98.
- CNUCED – Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement, 2014. « Coup d'œil sur les produits de base : Edition spéciale sur les terres rares », En ligne, 50p. <unctad.org/fr/PublicationsLibrary/suc2014d1_fr.pdf>, consulté le 6 juillet 2014.
- COMMISSION EUROPEENNE, 2012. *La Commission européenne signe aujourd'hui avec le Groenland un accord de coopération sur les matières premières*. Communiqué de presse, <http://europa.eu/rapid/press-release_IP-12-600_fr.doc>, 3p.
- COMMISSION EUROPEENNE, 2014. *Report on critical raw materials for the EU*, 41p.
- COMMODESK, 2013. « Élections décisives pour le secteur minier au Groenland », In *Boursorama*, En ligne, <<http://www.boursorama.com/actualites/elections-decisives-pour-le-secteur-minier-au-groenland-0fb78b48f09503cb5ae79df033ecaa4b>>, consulté le 17 juillet 2014.
- CORNIOU, M., 2012. « La ruée vers les terres rares ». *Québec Science*. Août-Septembre 2012, pp. 17-21.
- COTE, M., CAUDRON, G., TANGUAY, J., 2012. *Orbite : Un producteur stratégique de terres rares*, En ligne, 20p.

<http://www.orbitaluminae.com/media/upload/filings/Rare_earth_elements_LB_FR.pdf>, consulté le 3 juillet 2014.

- DE BOER, M.A. et LAMMERTSMA, K., 2013. « Scarcity of rare earth elements ». *ChemSusChem*. 6 (11), pp. 2045-2055.
- DEGEORGES, D., 2012. *Terres rares : enjeu géopolitique du XXIe siècle*. Paris : L'Harmattan, coll. « Un autre regard », 78 p.
- DEGEORGES, D., 2013. « L'Arctique : Une région d'avenir pour l'Union européenne et l'économie mondiale », *Question d'Europe*, 263, pp. 1-5.
- DREZET, E., 2010. « Quels impacts ? », In *GDS EcoInfo*, En ligne, <<http://ecoinfo.cnrs.fr/article172.html>>, consulté le 25 juillet 2014.
- DREZET, E., 2011. « Evolution des aspects environnementaux de l'extraction et de traitement des terres rares hors de Chine », In *GDS EcoInfo*, En ligne, <<http://ecoinfo.cnrs.fr/article214.html>>, consulté le 25 juillet 2014.
- DU CASTEL, V., BRITO, P., 2014. *Groenland, entre indépendance et récupération géostratégique ?*, Paris, L'Harmattan, coll. « Intelligence stratégique et géostratégie », 192p.
- DUARTE, C., MARBA, N., 2013. « La ruée vers l'or au Groenland », *Outre-Terre*, 2013/1 n°35-36, pp. 499-504.
- EAWAG - Institut de recherche sur l'eau du domaine des EPF, 2013. *Ecotoxicité des terres rares*, Fiche info, 2p.
- EIFFLING, V., STRUYE DE SWIELANDE, T., 2011. *L'Arctique : Nouvel eldorado ?*, Note d'analyse 15, Chaire InBev Baillet-Latour, programme « Union européenne-Chine », 49p.
- ELAW - Environmental Law Alliance Worldwide, 2010. *Guide pour l'évaluation des EIE de projets miniers*, USA, 118p.
- ENDERI – Entreprises, défense et relations internationales, 2013. « Groenland : une vie politique au rythme des ressources naturelles », In *ENDERI : Le portail des thématiques industrielles et économiques internationales*, En ligne, <http://www.enderi.fr/Groenland-une-vie-politique-au-rythme-des-ressources-naturelles_a137.html>, consulté le 17 juillet 2014.
- EPA – US Environmental Protection Agency, 2012. *Rare earth elements : A review of production, processing, recycling, and associated environmental issues*, Office of Research and Development, Washington, pp. 1-1/8-1
- EURACTIV, 2013a. « Greenland rejects EU request to limit rare earths exports », In *EurActiv : EU New & policy debates, across languages*, En ligne, <<http://www.euractiv.com/sustainability/greenland-rejects-eu-request-lim-news-517057>>, consulté le 17 juillet 2014.

- EURACTIV, 2013b. « Le Danemark ouvre la voie à l'extraction d'uranium au Groenland », In *EurActiv : EU New & policy debates, across languages*, En ligne, <<http://www.euractiv.fr/developpement-durable/le-danemark-ouvre-la-voie-extrac-news-517416>>, consulté le 18 juillet 2014.
- EURACTIV, 2014. « Greenland, Denmark hope to reach uranium mining deal by end 2014 », In *EurActiv : EU New & policy debates, across languages*, En ligne, <<http://www.euractiv.com/sustainability/greenland-denmark-expect-uranium-news-532667>>, consulté le 18 juillet 2014.
- FERRON, C.J., HENRY, P., 2013. *A review of the recycling of rare earth metals*, 15p.
- FETTWEIS, X., VAN YPERSELE, J-P., GALLEE, H., LEFEBRE, F., LEFEBVRE, W., 2007. « The 1979-2005 Greenland ice sheet melt extent from passive microwave data using an improved version of the melt retrieval XPGR algorithm », *Geophysical Research Letters*, 34, pp. 1-5.
- GANDENBERGER, C., MARSCHIEDER-WEIDEMANN, F., TERCERO, L., 2010. « Les matières premières critiques selon l'Union Européenne », In *La Vie économique – Revue politique économique*, pp. 12-15.
- GARRIC, A., 2012. « L'Europe convoite les terres rares et les diamants du Groenland », In *LeMonde.fr*, En ligne, <<http://ecologie.blog.lemonde.fr/2012/08/01/europe-convoite-les-terres-rares-et-diamants-du-groenland/>>, consulté le 17 juillet 2014.
- GATTOLIN, A., au nom de la commission des affaires européennes, 2014. *Arctique : Préoccupations européennes pour un enjeu global*, Rapport d'information n°684, 190p.
- GEUS et BMP, 2011. *The rare earth element potential in Greenland*, 12p.
- GIEC, 2013. *Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques*. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique.
- GME – Greenland Minerals and Energy, 2013a. *Kvanefjeld Project : Process engineering design for refining circuit complete*, Company Announcement, 6p.
- GME – Greenland Minerals and Energy, 2013b. *Rare Earth Elements, Uranium and Zinc : Project Brief*. 2p.
- GME – Greenland Minerals and Energy, 2014a. *Annual General Meeting Presentation*, 24p.
- GME – Greenland Minerals and Energy, 2014b. *Greenland Minerals Signs Memorandum of Understanding with China's NFC, to form Fully-Integrated Global Rare Earth Supply Chain*, Company Announcement, 3p.

- GME – Greenland Minerals and Energy, 2014c. *Key milestones approaching in the Kvanefjeld project development*, Company Announcement, 9p.
- GME – Greenland Minerals and Energy, 2014d. *Presentation on Kvanefjeld development strategy for European investors updates*, Company Announcement, 29p.
- GOLEV, A., SCOTT, M., ERSKINE, P.D., ALI, S.H., BALLANTYNE, G.R., 2014. « Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities ». *Resources Policy*, 41 (1), pp. 52-59.
- GONZALEZ, V., VIGNATI, D., LEYVAL, C., GIAMBERINI, L., 2014. « Environmental fate and ecotoxicity of lanthanides : Are they a uniform group beyond chemistry ? », *Environmental International*, 71, pp. 148-157.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, 2009. « Guide pour la déclaration de résidus miniers et de stériles à l’Inventaire national des rejets de polluants », In *Environnement Canada*, En ligne, <<https://www.ec.gc.ca/inrp-npri/default.asp?lang=Fr&n=5D033853-1>>, consulté le 29 juillet 2014.
- GOUVERNEMENT DU CANADA, 2013. « R&D sur le traitement des minéraux et des métaux rares », In *Ressources naturelles du Canada*, En ligne, <<http://www.mnrcan.gc.ca/mines-materiaux/mines-vertes/8215>>, consulté le 29 juillet 2014.
- GOUVERNEMENT DU GROENLAND, 2014. *Greenland’s oil and mineral strategy 2014-2018*, 102p.
- HABIB, K., WENZEL, H., In press. « Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling », In *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-12.
- HATCH, G.P., 2013. *Recent dynamics in the global critical rare earths market and the regionalization/globalization of the metals markets*, International Seminar on rare earth, Malaysia, 44p.
- HAYES-LABRUTO, L., SCHILLEBEECKX, S.J.D., WORKMAN, M., SHAH, N., 2013. « Contrasting perspectives on China's rare earths policies - Reframing the debate through a stakeholder lens ». *Energy Policy*, 63, pp. 55-68.
- HENRY, P., 2014. Interrogé lors d’une rencontre à Bruxelles, le 28 juillet 2014.
- HØYEM, T., 2009 « L’avenir est au Nord. Remarques fondées sur l’expérience : le Danemark en tant que grande puissance arctique. », In « Quel avenir pour le Groenland », *Nordiques*, 18, pp. 33-50.
- HUMPHRIES, M., 2013. *Rare Earth Elements : The Global Supply Chain*. En ligne. 27p. <www.fas.org/sgp/crs/natsec/R41347.pdf>, consulté le 11 novembre 2013.
- HURST, C., 2010. *China’s rare earth elements industry : What can the West learn ?*, 42p.
- JACQUEMIN, A., 2012. « Hydrométal recycle des terres rares », *L’Avenir*, p. 4.

- JENSEN, D.B., CHRISTENSEN, K.D., 2003. *The biodiversity of Greenland – a country study*, Nuuk, Pinngortitaleriffik, Grønlands Naturinstitut, Technical Report No. 55, 165p.
- JORDENS, A., CHENG, Y.P., WATERS, K.E., 2013. « A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals ». *Minerals Engineering*, 41, pp. 97-114.
- JUETTEN, S., 2011. « Rare Earth Mining at Mountain Pass », *Desert Report*, pp. 18-19.
- KINGSNORTH, D., 2013. « Rare earths : Is supply critical in 2013 ? », *AusIMM 2013 Critical Mineral Conference*, Perth, Western Australia, 4 et 5 juin 2013.
- KLYUCHAREV, D.S., VOLKOVA, N.M. et COMYN, M.F., 2013. « The problems associated with using non-conventional rare-earth minerals ». *Journal of Geochemical Exploration*, 133, pp. 138-148.
- LACHMANN, N., pour l'ambassade du Grand-Duché de Luxembourg à Copenhague, 2013. *L'Arctique et le Groenland : d'une affaire du Nord à une affaire européenne ?*, 43p.
- LE MONDE ET AFP, 2013. « Les Groenlandais élisent leurs représentants », In *Le Monde.fr*, En ligne, <http://www.lemonde.fr/europe/article/2013/03/12/les-groenlandais-elisent-leurs-representants_1846490_3214.html>, consulté le 17 juillet 2013.
- LE MONDE, 2014. « Terres rares : l'OMC dénonce les quotas chinois », In *Le Monde.fr*, <http://www.lemonde.fr/economie/article/2014/03/26/terres-rares-l-omc-denonce-les-quotas-chinois_4390186_3234.html>, consulté le 1 juillet 2014.
- LIAO, C., WU, S., CHENG, F., WANG, S., LIU, Y., ZHANG, B., YAN, C., 2013. « Clean separation technologies of rare earth resources in China ». *Journal of Rare Earths*, 31 (4), pp. 331-336.
- MAGNIER, H., 2013. *Stratégie chinoise poursuivie par le maintien des quotas d'exportation sur les terres rares*. En ligne. 4p. <www.tresor.economie.gouv.fr/File/388597>, consulté le 1 février 2014.
- MAMPAEY, L., 2012. *Terres rares : ombre chinoise sur notre « économie verte »*, Note d'Analyse du GRIP, Bruxelles, 7p.
- MASSARI, S. et RUBERTI, M., 2013. « Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies ». *Resources Policy*, 38 (1), pp. 36-43.
- MCLELLAN, B.C., CORDER, G.D., GOLEV, A., ALI, S.H., 2014. « Sustainability of the rare earth industry », *Procedia environmental Sciences*, 20, pp. 280-287.
- MIT, s.d., « Environmental costs of waste disposal », In *The future of strategic natural resources*, En ligne. <<http://web.mit.edu/12.000/www/m2016/finalwebsite/problems/disposal.html>>, consulté le 28 juillet 2014.
- MOLYCORP, 2013. « Molycorp Mountain Pass », In *Molycorp*, En ligne. <<http://www.molycorp.com/about-us/our-facilities/molycorp-mountain-pass/>>, consulté le 30 juin 2014.

- MRN - Ministère des Ressources Naturelles, 2013. « Terres rares : propriétés, usages et types de gisement », In *Ressources naturelles Québec*. En ligne. <<http://www.mrn.gouv.qc.ca/mines/industrie/metaux/metaux-proprietes-terres-rares.jsp>>, consulté le 11 novembre 2013.
- NASA, 2007. « Annual accumulated melt over Greenland 1979 through 2007 », In *NASA : Scientific Visualization Studio*, En ligne. <<http://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=3475>>, consulté le 3 juillet 2014.
- NASA, 2012. « September Arctic minimum Arctic Sea Ice 2012 », In *NASA : Scientific Visualization Studio*, En ligne, <<http://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=3998>>, consulté le 5 juillet 2014.
- NSIDC – National Snow & Ice Data Center, 2012. « Climate change in the Arctic », In *NSIDC : National Snow & Ice Data Center*, En ligne, <https://nsidc.org/cryosphere/arctic-meteorology/climate_change.html>, consulté le 4 juillet 2014.
- NSIDC – National Snow & Ice Data Center, 2013. « Arctic sea ice reaches lowest extent for 2013 », In *NSIDC : National Snow & Ice Data Center*, En ligne, <<http://nsidc.org/arcticseaicenews/2013/09/draft-arctic-sea-ice-reaches-lowest-extent-for-2013/>>, consulté le 5 juillet 2014.
- NSIDC - National Snow & Ice Data Center, 2014. « State of the cryosphere : Ice Sheets », In, <http://nsidc.org/cryosphere/sotc/ice_sheets.html>, consulté le 5 juillet 2014.
- ORBICON, 2011. *ToR for Environmental Impact Assessment, Kvanefield Multi-Element Project*, 44p.
- PAILLARD, C-A., 2011. « La question des minerais stratégiques, enjeu majeur de la géoéconomie mondiale », *Géoéconomie*, 59 (4), pp. 17-32.
- PAUL, J., CAMPBELL, G., 2011. *Investigating rare earth element mine development in EPA region 8 and potential environmental impacts*, 35p.
- PEROVICH, D., GERLAND, S., HENDRICKS, S., MEIER, W., NICOLAUS, M., RICHTER-MENGE, J., TSCHUDI, M., 2013. « Sea Ice », In *Arctic Report Card : Update for 2013 – Tracking recent environmental changes*, En ligne, <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard/sea_ice.html>, consulté le 4 juillet 2014.
- PIPAME - Pôle Interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations Economiques, 2013. *Enjeux économiques des métaux stratégiques pour les filières automobiles et aéronautiques*, 254p.
- REMEUR, C., 2013. *Rare earth elements and recycling possibilities*, En ligne, 6p. <[http://www.europarl.europa.eu/RegData/bibliotheque/briefing/2013/130514/LDM_BRI\(2013\)130514_REV1_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/bibliotheque/briefing/2013/130514/LDM_BRI(2013)130514_REV1_EN.pdf)>, consulté le 6 juillet 2014.

- RESEAU ACTION CLIMAT FRANCE, 2013. « Le 5^{ème} rapport du GIEC décrypté : Les changements climatiques et leurs évolutions futures », In *leclimatchange.fr*, En ligne, <<http://leclimatchange.fr>>, consulté le 6 juillet 2014.
- RICO, A.G., 2012. « Pourquoi la Chine restreint ses exportations de terres rares », In *Le Monde.fr*, En ligne, <http://www.lemonde.fr/planete/article/2012/03/14/pourquoi-la-chine-restreint-ses-exportations-de-terres-rares_1667656_3244.html>, consulté le 1 juillet 2014.
- RISØ NATIONAL LABORATORY, 1990. *Preliminary environmental impact statement for the Kvanefjeld uranium mine*, 123p.
- RIZET, L., CHARPENTIER, P-E., 2000. « Métallurgie extractive : Hydrométallurgie », In *Techniques de l'ingénieur*, M2235.
- ROBIN DES BOIS, 2009. « 2.750 sites pollués en Arctique », *Polar Star*, n°2.
- ROLLAT, A., 2014. « Les grandes étapes de l'industrie des terres rares », AMATORE, C. et COLOMBANI, P. (dir.), *Terres rares et métaux rares : Enjeux du XXIème siècle ?*, compte rendu du colloque organisé par la Fondation Ecologie d'Avenir, le 15 mai 2014, Paris : La Maison du Barreau.
- ROSING, M., 2013. « Mineral resource potential in Greenland », conférence prononcée lors du Symposium Arctic Futures 2013, Bruxelles, 17 octobre 2013.
- SCHÜLER, D., BUCHERT, M., LIU, R., DITTRICH, S., MERZ, C., 2011. *Study on rare earths and their recycling*, Final Report dor The Greens/EFA Group in the European Parliament, Darmstadt, 140p.
- SMITH, M.P., CAMPBELL, L.S. and KYNICKY, J., In press. « A review of the genesis of the world class Bayan Obo Fe-REE-Nb deposits, Inner Mongolia, China: Multistage processes and outstanding questions ». *Ore Geology Reviews*.
- SØRENSEN, H. 2001. « The Ilímaussaq alkaline complex, South Greenland: status of mineralogical research with new results », *Geology of Greenland Survey Bulletin*, 190, pp. 1-23.
- STORM VAN LEEUWEN, J.W., 2014. Uranium mining at Kvanefjeld, 23p.
- TANBREEEZ, 2014. *TANBREEEZ : Mining for greener technologies*, En ligne, <<http://tanbreeez.com/>>, consulté le 15 juillet 2014.
- TEDESCO, M., BOX, J.E., CAPPELEN, J., FETTWEIS, X., JENSEN, T., MOTE, T., RENNERMALM, A.K., SMITH, L.C., VAN DE WAL, R.S.W., WAHR, J., 2013. « Greenland Ice Sheet », In *Arctic Report Card : Update for 2013 – Tracking recent environmental changes*, En ligne. <http://www.arctic.noaa.gov/reportcard/greenland_ice_sheet.html>, consulté le 6 juillet 2014.
- TETRA TECH, 2001. *Final report : Human health and ecological risk assessment for the Mountain Pass Mine*, 250p.

- UNEP, 2011. *Recycling Rates of Metals – A Status Report*, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Graedel, T.E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Reck, B.K.; Sibley, S.F.; Sonnemann, G.; Buchert, M.; Hagelüken, C., 44p.
- UNESCO. 2010. *Développement durable de la région arctique face au changement climatique : défis scientifiques, sociaux, culturels et éducatifs*. UNESCO. Paris, 420p.
- US DEPARTMENT OF ENERGY (DoE), 2011, *Critical Materials Strategy*, 190 p.
- USGS – United States Geological Survey, 2014. *Mineral Commodity Summaries 2014*, U.S. Geological Survey, 196p.
- WANG, L., LIANG, T., ZHANG, Q., LI, K., 2014. « Rare earth element components in atmospheric particulates in the Bayan Obo mine region ». *Environmental research*, 131, pp. 64-70.
- WÜBBEKE, J., 2013. « Rare earth elements in China : Policies and narratives of reinventing an industry », In *Resources Policy*, 38, pp. 384-394.
- YANG, X.J., LIN, A., LI, X.-., WU, Y., ZHOU, W. and CHEN, Z., 2013. « China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation ». *Environmental Development*.

LISTE DES ANNEXES

- **Annexe I :** Tableau comparatif de la concentration en ETR, métaux industriels et métaux précieux dans la croûte terrestre, en parties par million (ppm)
- **Annexe II :** Etat des mines et des projets miniers relatifs aux terres rares dans le monde
- **Annexe III :** Aperçu de la diversité des ressources minières au Groenland
- **Annexe IV :**

ANNEXE I

Tableau comparatif de la concentration en ETR, métaux industriels et métaux précieux de la croûte terrestre en parties par million (ppm) (CNUCED, 2014)

Numéro atomique	Nom	Symbole	Abondance dans la croûte terrestre (ppm)	Groupe
58	Cérium	Ce	62	Élément de terres rares
60	Néodyme	Nd	33	Élément de terres rares
57	Lanthane	La	32	Élément de terres rares
39	Yttrium	Y	29	Élément de terres rares
21	Scandium	Sc	22	Élément de terres rares
59	Praséodyme	Pr	9	Élément de terres rares
62	Samarium	Sm	7	Élément de terres rares
64	Gadolinium	Gd	6	Élément de terres rares
66	Dysprosium	Dy	6	Élément de terres rares
68	Erbium	Er	3,03	Élément de terres rares
70	Ytterbium	Yb	2,93	Élément de terres rares
63	Europium	Eu	1,80	Élément de terres rares
67	Holmium	Ho	1,17	Élément de terres rares
65	Terbium	Tb	0,94	Élément de terres rares
69	Thulium	Tm	0,47	Élément de terres rares
71	Lutécium	Lu	0,46	Élément de terres rares
61	Prométhium	Pm	n/a (infinitesimal)	Élément de terres rares
13	Aluminium	Al	79 000	Métaux industriels
26	Fer	Fe	55 350	Métaux industriels
12	Magnésium	Mg	26 000	Métaux industriels
22	Titane	Ti	6 302	Métaux industriels
25	Manganèse	Mn	1 156	Métaux industriels
24	Chrome	Cr	131	Métaux industriels
28	Nickel	Ni	90	Métaux industriels
30	Zinc	Zn	76	Métaux industriels
29	Cuivre	Cu	59	Métaux industriels
82	Plomb	Pb	13	Métaux industriels
50	Étain	Sn	2,27	Métaux industriels
74	Tungstène	W	1,29	Métaux industriels
42	Molybdène	Mo	1,27	Métaux industriels
47	Argent	Ag	0,0750	Métaux précieux
46	Palladium	Pd	0,0082	Métaux précieux
78	Platine	Pt	0,0036	Métaux précieux
79	Or	Au	0,0032	Métaux précieux
76	Osmium	Os	0,0018	Métaux précieux
44	Ruthénium	Ru	0,0010	Métaux précieux
45	Rhodium	Rh	0,0010	Métaux précieux
77	Iridium	Ir	0,0008	Métaux précieux

ANNEXE II

État des mines et des projets miniers relatifs aux terres rares dans le monde (CNUCED, 2014)

COUNTRY	COMPANY	PROJECT / MINE	COMMENT(S)
Australie	Alkane Resources Ltd.	Projet Dubbo Zirconia	Production attendue en 2016 : 4 900 tonnes OTR par an ^c (25,8% TRLO) Ressources totales : 0,65 million tonnes TRLO ^l
	Lynas Corporation Ltd.	Mount Weld	Production : 20 000 tonnes OTR par an (phase 1 + phase 2) ^h Ressource : 1,1834 millions de tonnes OTR ^m (4,7% TRLO)
	Arafura Resources Ltd.	Minde Nolans Bore	Objectif de production : 20 000 tonnes OTR par an ^e , Ressource : 848 400 tonnes OTR ^o (3,1% TRLO)
	Hastings Rare Metals Ltd.	Dépôt d'Hastings	Ressource : 76 020 tonnes OTR ^s (85,7% TRLO)
Brésil	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM)	Morro Dos Seis Lagos	Ressources : 11 750 tonnes OTR ^t
Canada	Mitsubishi / Neo Materials Technologies	Pitinga	Ressources indiquées : 3,35 millions tonnes (0,58% OTR) Ressources inférées : 6,48 millions tonnes (0,60% OTR) 34% TRLO
	Great Western Minerals Group Ltd.	Hoidas Lake	Lettre d'intention avec Star Uranium Corp. d'entrer dans une société mixte ^r Ressources : 62 208 tonnes OTR ⁿ (3,7% TRLO)
	Avalon Rare Metals Inc.	Nechalacho – Thor Lake	Démarrage de la production : 2016-17 Production estimée : 9 286 tons OTR par an ^q Ressources : 4,3 millions tonnes OTR ^m (15,4% TRLO)
	Quest Rare Minerals Ltd.	Projet Strange Lake Rare Earth	Ressources totales : 1,15 millions tonnes OTR ^l (40,8% TRLO)
	Quest Rare Minerals Ltd.	Projet Misery Lake Rare Earth	n.d.
	Matamec Explorations Inc.	Dépôt Zeus (Kipawa)	Ressources indiquées : 5 à 18,7 millions tonnes OTR Ressources inférées : 0,985 à 7,2 millions tonnes OTR (35,8% TRLO)
	Pele Mountain Resources Inc.	Pitinga	Ressources indiquées : 56 380 tonnes OTR Ressources inférées : 41 660 tonnes OTR ^l
	Pele Mountain Resources Inc.	Dépôt Eco Ridge	Ressources contenues : 66 402 tonnes OTR ^o (7,9% TRLO)
	Commerce Resources Corp	Projet Eldor rare earth	Ressources contenues : 2 041 716 tonnes OTR ^o (5,1% TRLO)
	Chine	Baogang Rare Earth	Dépôt Bayan Obo
HEFA rare earths		Baotou, Mongolie-intérieure	n.d.
Divers		Province Jiangxi	n.d.
Divers		Province Sichuan	n.d.
	Divers	Province Guangdong	n.d.
			La Province du Fujian a annoncé un projet de 905 million US\$ basé sur ses réserves de TRLO
Inde	Indian Rare Earths Ltd.	Complexe Orissa Sand	n.d.
Kazakhstan	Summit Atom Rare Earth Company (SARECO), entreprise mixte avec Sumitomo et Kazatomprom		
Kirghizistan	Stans Energy Corp.	Kutessay II	Ressources totales : 0,05 millions tonnes OTR ^l (53,4% TRLO)
Malawi	Lynas Corporation Ltd.	Dépôt Kangankunde	Ressources contenues : 107 019 tonnes OTR ^o (0,7% TRLO)
Mongolie			
Namibie	Namibia Rare Earth Inc.	Projet Lofdal Rare Earths	Ressources indiquées : 0,9 millions tonnes OTR Ressources inférées : 0,75 millions tonnes OTR ^o
Fédération de Russie		Dépôt Lovozero	La Fédération de Russie prévoit d'investir 1 milliard US\$ dans l'extraction de terres rares
Afrique du Sud	Great Western Minerals Group Ltd. (Rare Earth Extraction Co. Ltd.)	Steenkampskraal	Ressources indiquées : 176 000 tonnes OTR, Ressources inférées : 278 000 tonnes OTR, (7,7% TRLO) Production estimée 32 000 - 42 000 tonnes OTR par an ^q

COUNTRY	COMPANY	PROJECT / MINE	COMMENT(S)
	Frontier Rare Earths Ltd. Korea Resources Corporation (10%) ^b	Projet Zandkopsdrift rare earth	Ressources indiquées : 532 000 tonnes OTR Ressources inférées : 415 000 tonnes OTR ^a (7,4% TRLO)
Suède	Tasman Metals Ltd	Norra Kärr	Ressources totales : 0,41 millions tonnes OTR ^l (0,33 millions tonnes OTR) ^m (52,7% TRLO)
République-Unie de Tanzanie	Montero Mining and Exploration	Wigu Hi	Ressources inférées : 3,3 millions tonnes OTR ⁿ
Etats-Unis	Molycorp Minerals Inc.	Mountain Pass	Taux de production annuel estimé : 19 050 tonnes OTR d'ici à mi-2013 ^a Ressources : 1,84 millions tonnes OTR ^m (0,5% TRLO)
	Rare Element Resources Ltd.	Bear Lodge	Démarrage potentiel : Janvier 2016 Ressources : 398 860 tonnes OTR ^m (2,6% TRLO)
	Ucore Rare Earths Inc.	Bokan Mountain	Ressources totales : 0,03 millions tonnes OTR ^l (38,3% TRLO)
	Ucore Rare Earths Inc.	Ray Mountains	n.d.
Viet Nam	Lai Chau - Vimico Rare Earth Co	Dong Pao mine	n.d. (Partenariat avec Toyota Tsusho et Sojitz) ^c
Groenland	Greenland Minerals and Energy Ltd.	Kvanefjeld	Ressources indiquées : 4,77 millions tonnes OTR Ressources inférées : 5,56 millions tonnes OTR ^l (12% TRLO)
	Hudson Resources Inc.	Dépôt Sarfartoq	Ressources contenues : 216 946 tonnes OTR ^a (2,6% TRLO)

ANNEXE III

Aperçu de la diversité des ressources minières au Groenland (GEUS, 2011)



ANNEXE IV

Ouverture des routes maritimes arctiques



Source : NATO Parliamentary Assembly,
<http://www.nato-pa.int/Default.asp?SHORTCUT=2082>