

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

|                                                                                          |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Résumé</b>                                                                            | <b>1</b>  |
| <b>Introduction</b>                                                                      | <b>1</b>  |
| <b>Chapitre 1 : Les terres rares</b>                                                     | <b>3</b>  |
| 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        |
| <b>Chapitre 2 : Les terres rares au Groenland</b>                                        | <b>23</b> |
| <b>Introduction</b>                                                                      | <b>24</b> |
| 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        |
| <b>Conclusion</b>                                                                        | <b>35</b> |
| <b>Partie 3 : Les risques environnementaux</b>                                           | <b>36</b> |
| <b>Introduction</b>                                                                      | <b>37</b> |
| 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        |
| <b>3. Exemple de projet d'exploitation au Groenland : Kvanefjeld</b>                  | <b>44</b> |
| 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        |
| <b>4. Risques environnementaux liés à l'exploitation de terres rares au Groenland</b> | <b>50</b> |
| 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        |
| <b>5. L'Arctique et le Groenland : Des régions vulnérables</b>                        | <b>58</b> |
| 5.1. Une biodiversité fragile                                                         | 58        |
| 5.2. Sensibilité aux pollutions                                                       | 59        |
| <b>Conclusion</b>                                                                     | <b>60</b> |
| <b>Partie 4 : Discussion</b>                                                          | <b>62</b> |
| <b>Introduction</b>                                                                   | <b>63</b> |
| <b>1. Un paradoxe flagrant</b>                                                        | <b>63</b> |
| <b>2. Mise en route d'un projet d'exploitation</b>                                    | <b>64</b> |
| <b>3. Rentabilité des mines</b>                                                       | <b>64</b> |
| <b>4. Perspectives et pistes de solutions</b>                                         | <b>65</b> |
| 4.1. Recyclage                                                                        | 65        |
| 4.2. Substitution                                                                     | 68        |
| <b>5. Bref aperçu des aspects législatifs</b>                                         | <b>69</b> |
| <b>Conclusion</b>                                                                     | <b>70</b> |
| <b>Conclusion</b>                                                                     | <b>71</b> |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <i><b>Bibliographie</b></i>     | <b>73</b> |
| <i><b>Liste des annexes</b></i> | <b>82</b> |



## 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<br>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 lanthanides<sup>1</sup> (le lanthane, le cérium, le praséodyme, le néodyme, le prométhéum, le samarium, l'euporium, 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)

|                          |  |                   |  |                                                   |  |                   |  |                   |  |                      |  |                   |  |                   |  |                   |  |                   |  |                          |  |                           |  |                           |  |                          |  |                           |  |                      |  |                   |  |                   |  |  |  |
|--------------------------|--|-------------------|--|---------------------------------------------------|--|-------------------|--|-------------------|--|----------------------|--|-------------------|--|-------------------|--|-------------------|--|-------------------|--|--------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|--|--------------------------|--|---------------------------|--|----------------------|--|-------------------|--|-------------------|--|--|--|
| 1<br>H<br>1.007 - 1.009  |  |                   |  |                                                   |  |                   |  |                   |  |                      |  |                   |  |                   |  |                   |  | 18<br>He<br>4.003 |  |                          |  |                           |  |                           |  |                          |  |                           |  |                      |  |                   |  |                   |  |  |  |
| 3<br>Li<br>6.938 - 6.997 |  | 4<br>Be<br>9.012  |  | atomic number<br>Symbol<br>standard atomic weight |  |                   |  |                   |  |                      |  |                   |  |                   |  |                   |  |                   |  | 13<br>B<br>10.80 - 10.83 |  | 14<br>C<br>12.00 - 12.02  |  | 15<br>N<br>14.00 - 14.01  |  | 16<br>O<br>15.99 - 16.00 |  | 17<br>F<br>18.99          |  | 10<br>Ne<br>20.18    |  |                   |  |                   |  |  |  |
| 11<br>Na<br>22.99        |  | 12<br>Mg<br>24.31 |  |                                                   |  |                   |  |                   |  |                      |  |                   |  |                   |  |                   |  |                   |  | 13<br>Al<br>26.98        |  | 14<br>Si<br>28.08 - 28.09 |  | 15<br>P<br>30.97          |  | 16<br>S<br>32.05 - 32.06 |  | 17<br>Cl<br>35.44 - 35.46 |  | 18<br>Ar<br>39.95    |  |                   |  |                   |  |  |  |
| 19<br>K<br>39.10         |  | 20<br>Ca<br>40.08 |  | 21<br>Sc<br>44.96                                 |  | 22<br>Ti<br>47.87 |  | 23<br>V<br>50.94  |  | 24<br>Cr<br>52.00    |  | 25<br>Mn<br>54.94 |  | 26<br>Fe<br>55.85 |  | 27<br>Co<br>58.93 |  | 28<br>Ni<br>58.69 |  | 29<br>Cu<br>63.55        |  | 30<br>Zn<br>65.38(2)      |  | 31<br>Ga<br>69.72         |  | 32<br>Ge<br>72.63        |  | 33<br>As<br>74.92         |  | 34<br>Se<br>78.96(3) |  | 35<br>Br<br>79.90 |  | 36<br>Kr<br>83.80 |  |  |  |
| 37<br>Rb<br>85.47        |  | 38<br>Sr<br>87.62 |  | 39<br>Y<br>88.91                                  |  | 40<br>Zr<br>91.22 |  | 41<br>Nb<br>92.91 |  | 42<br>Mo<br>95.96(2) |  | 43<br>Tc<br>101.1 |  | 44<br>Ru<br>101.1 |  | 45<br>Rh<br>102.9 |  | 46<br>Pd<br>106.4 |  | 47<br>Ag<br>107.9        |  | 48<br>Cd<br>112.4         |  | 49<br>In<br>114.8         |  | 50<br>Sn<br>118.7        |  | 51<br>Sb<br>121.8         |  | 52<br>Te<br>127.6    |  | 53<br>I<br>126.9  |  | 54<br>Xe<br>131.3 |  |  |  |
| 55<br>Cs<br>132.9        |  | 56<br>Ba<br>137.3 |  | 57 - 71<br>lanthanoids                            |  | 72<br>Hf<br>178.5 |  | 73<br>Ta<br>180.9 |  | 74<br>W<br>183.8     |  | 75<br>Re<br>186.2 |  | 76<br>Os<br>190.2 |  | 77<br>Ir<br>192.2 |  | 78<br>Pt<br>195.1 |  | 79<br>Au<br>197.0        |  | 80<br>Hg<br>200.6         |  | 81<br>Tl<br>204.3 - 204.4 |  | 82<br>Pb<br>207.2        |  | 83<br>Bi<br>209.0         |  | 84<br>Po             |  | 85<br>At          |  | 86<br>Rn          |  |  |  |
| 87<br>Fr                 |  | 88<br>Ra          |  | 89 - 103<br>actinoids                             |  | 104<br>Rf         |  | 105<br>Db         |  | 106<br>Sg            |  | 107<br>Bh         |  | 108<br>Hs         |  | 109<br>Mt         |  | 110<br>Ds         |  | 111<br>Rg                |  | 112<br>Cn                 |  |                           |  |                          |  |                           |  |                      |  |                   |  |                   |  |  |  |
| Lanthanoids              |  | 57<br>La<br>138.9 |  | 58<br>Ce<br>140.1                                 |  | 59<br>Pr<br>140.9 |  | 60<br>Nd<br>144.2 |  | 61<br>Pm             |  | 62<br>Sm<br>150.4 |  | 63<br>Eu<br>152.0 |  | 64<br>Gd<br>157.3 |  | 65<br>Tb<br>158.9 |  | 66<br>Dy<br>162.5        |  | 67<br>Ho<br>164.9         |  | 68<br>Er<br>167.3         |  | 69<br>Tm<br>168.9        |  | 70<br>Yb<br>173.1         |  | 71<br>Lu<br>175.0    |  |                   |  |                   |  |  |  |
| Actinoids                |  | 89<br>Ac<br>227.0 |  | 90<br>Th<br>232.0                                 |  | 91<br>Pa<br>231.0 |  | 92<br>U<br>238.0  |  | 93<br>Np             |  | 94<br>Pu          |  | 95<br>Am          |  | 96<br>Cm          |  | 97<br>Bk          |  | 98<br>Cf                 |  | 99<br>Es                  |  | 100<br>Fm                 |  | 101<br>Md                |  | 102<br>No                 |  | 103<br>Lr            |  |                   |  |                   |  |  |  |

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

Les éléments terres rares (ETR<sup>2</sup>) 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'euporium, 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

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

<sup>2</sup> 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 ; Schüller 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'or<sup>3</sup>. (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

---

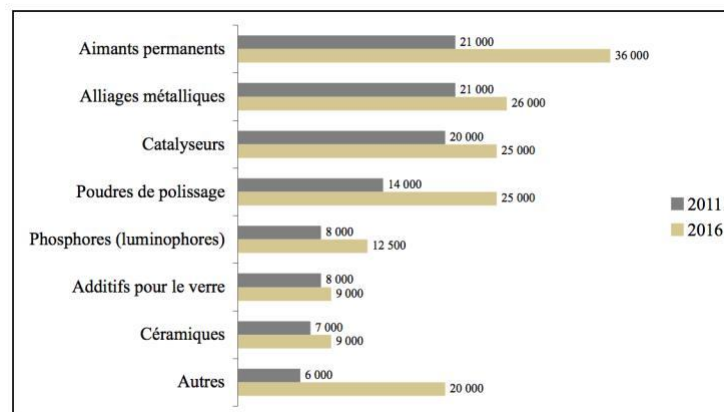
<sup>3</sup> Un tableau comparatif de la concentration en ETR, métaux industriels et métaux précieux dans la croûte terrestre est disponible en annexe I.

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-violets... (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-Labruzzo 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 ultrabasiques 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)

## 4.2. Production de terres rares

### 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  |
| as a % of global production       | 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.

## **CHAPITRE 2 : LES TERRES RARES AU GROENLAND**

---

### **LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX**

---

## **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, NH<sub>4</sub>OH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>... 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 minerais<sup>11</sup>. 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

---

<sup>11</sup> « 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 (Clamadiou 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 (Clamadiou 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 libérerait dans l'atmosphère entre 9.600 et 12.000 m<sup>3</sup> de gaz contenant des fluorures, du SO<sub>2</sub>, du SO<sub>3</sub> et des poussières. Selon la même source, 75 m<sup>3</sup> 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 km<sup>2</sup>, ce qui représente l'équivalent de 10.000 piscines olympiques ! (Corniou, 2012 ; Schüller 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).

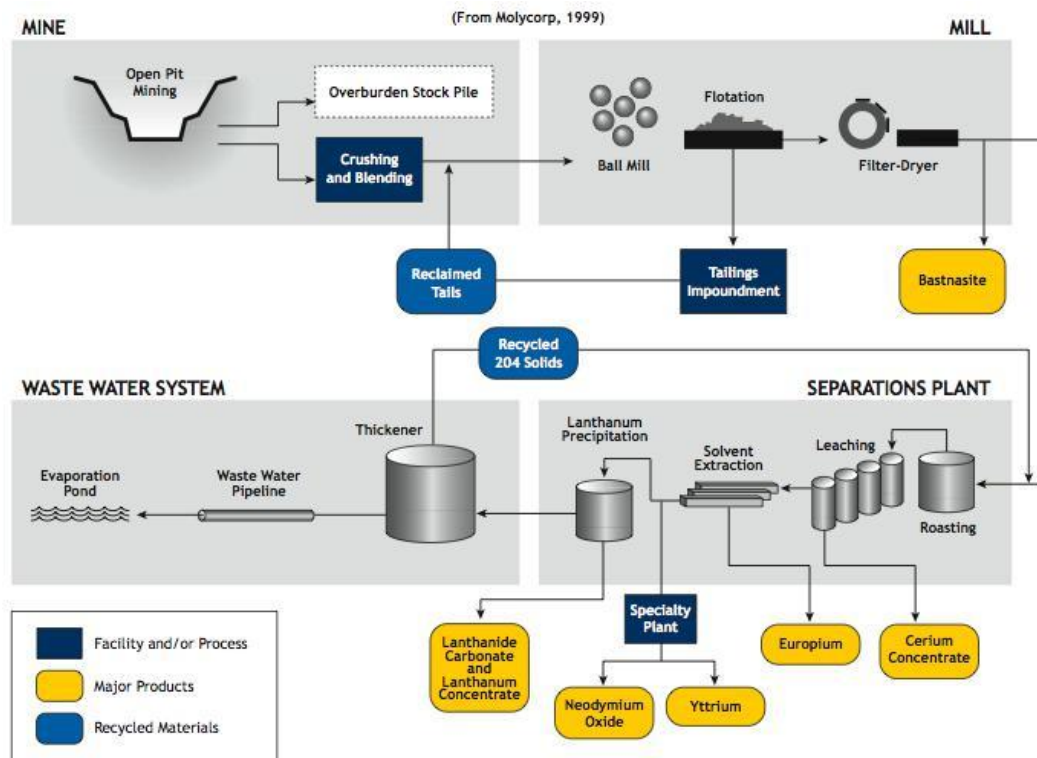


Figure 21 : Aperçu des principales étapes de production des terres rares à Mountain Pass (Tetra Tech, 2001)

### **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 Service<sup>12</sup> (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

---

<sup>12</sup> « 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.

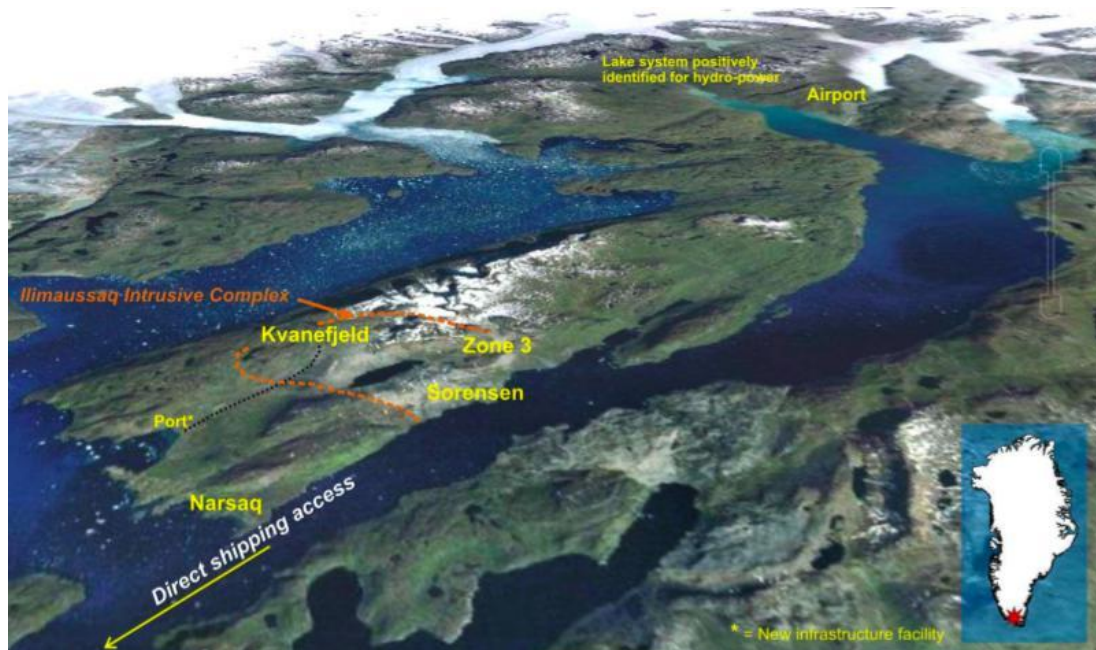


Figure 22 : Localisation du gisement de Kvanefjeld, Groenland (GME, 2014a)

### 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'euprômium, 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% U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. 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-électricité 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 :

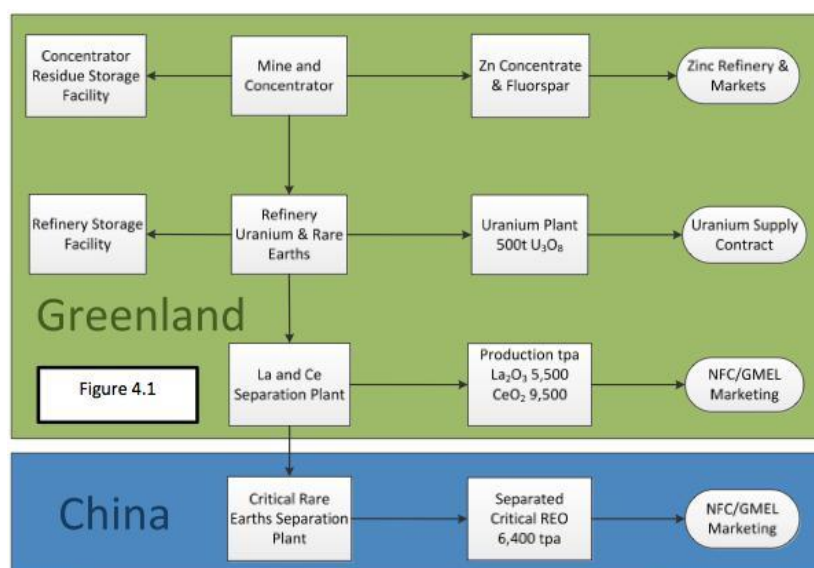


Figure 24 : Principales étapes de traitement des terres rares extraites à Kvanefjeld (GME, 2014c)

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)

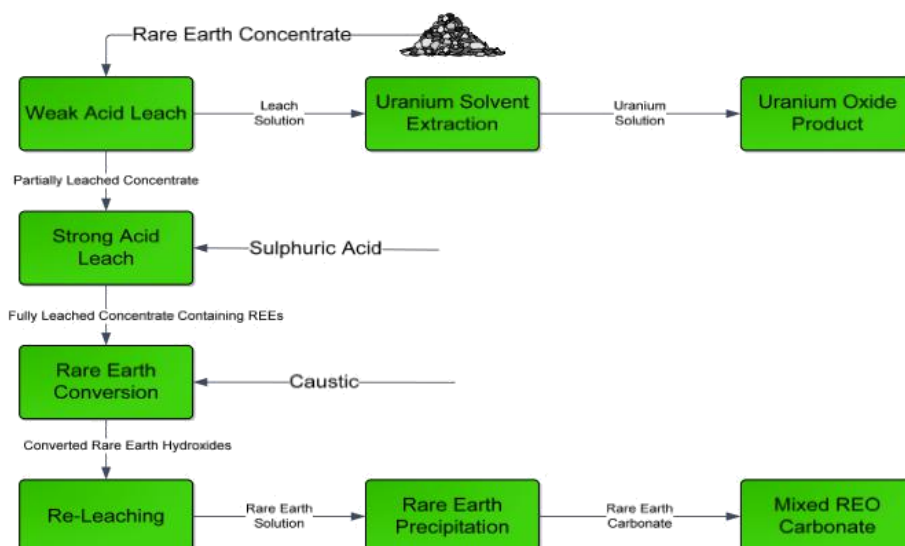


Figure 25 : Etapes de traitement réalisées dans la raffinerie de Kvanefjeld (GME, 2013a)

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 NFC<sup>13</sup>, 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.

<sup>13</sup> 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**

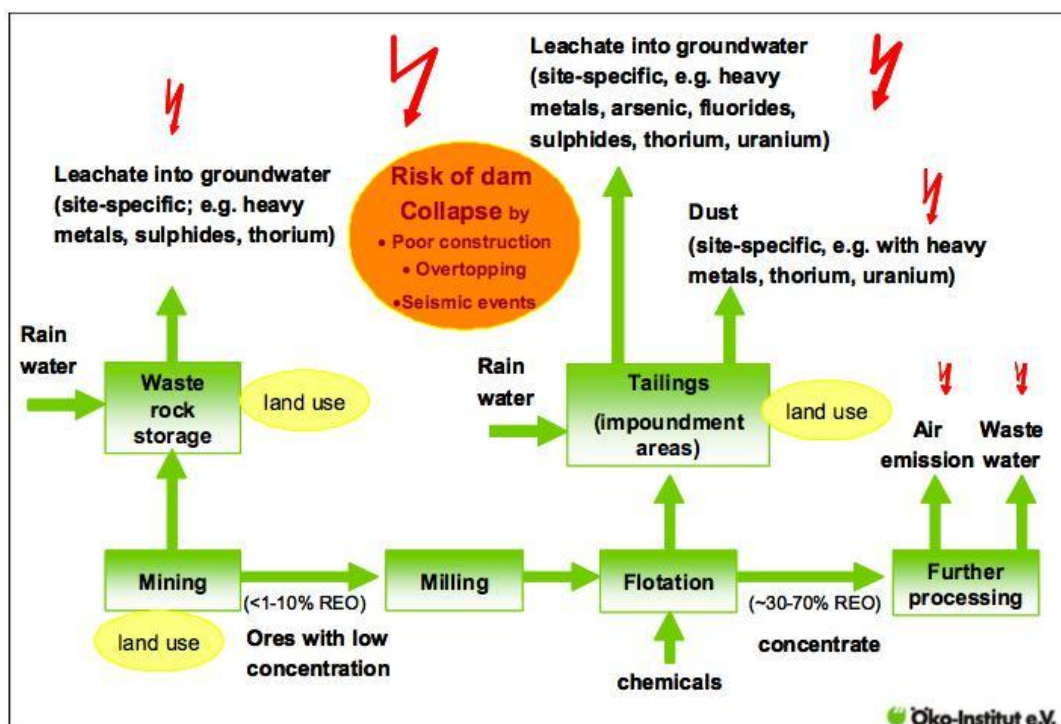
---

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 : SO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>, 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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).

Finalement, 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 ; Schüller 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. (Schüller 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.

## 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. <[http://unctad.org/fr/PublicationsLibrary/suc2014d1\\_fr.pdf](http://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](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.orbitealuminae.com/media/upload/filings/Rare\\_earth\\_elements\\_LB\\_FR.pdf](http://www.orbitealuminae.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](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., MARSCHEIDER-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/leurope-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.rncan.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](http://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](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](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](http://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](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](http://nsidc.org/cryosphere/sotc/ice_sheets.html)>, consulté le 5 juillet 2014.
- ORBICON, 2011. *ToR for Environmental Impact Assessment, Kvanefjeld 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](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<sup>ème</sup> 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](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](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 <sup>c</sup> (25,8% TRLO)<br>Ressources totales : 0,65 million tonnes TRLO <sup>i</sup>                                                       |
|                      | Lynas Corporation Ltd.                                                                 | Mount Weld                     | Production : 20 000 tonnes OTR par an (phase 1 + phase 2) <sup>n</sup><br>Ressource : 1,1834 millions de tonnes OTR <sup>m</sup> (4,7% TRLO)                                                        |
|                      | Arafura Resources Ltd.                                                                 | Minde Nolans Bore              | Objectif de production : 20 000 tonnes OTR par an <sup>d</sup> ,<br>Ressource : 848 400 tonnes OTR <sup>e</sup> (3,1% TRLO)                                                                         |
|                      | Hastings Rare Metals Ltd.                                                              | Dépôt d'Hastings               | Ressource : 76 020 tonnes OTR <sup>a</sup> (85,7% TRLO)                                                                                                                                             |
| Brésil               | Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM)                                  | Morro Dos Seis Lagos           | Ressources : 11 750 tonnes OTR <sup>i</sup>                                                                                                                                                         |
| Canada               | Mitsubishi / Neo Materials Technologies                                                | Pitanga                        | Ressources indiquées : 3,35 millions tonnes (0,58% OTR)<br>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 <sup>f</sup><br>Ressources : 62 208 tonnes OTR <sup>m</sup> (3,7% TRLO)                                                  |
|                      | Avalon Rare Metals Inc.                                                                | Nechalacho – Thor Lake         | Démarrage de la production : 2016-17<br>Production estimée : 9 286 tons OTR par an <sup>g</sup><br>Ressources : 4,3 millions tonnes OTR <sup>m</sup> (15,4% TRLO)                                   |
|                      | Quest Rare Minerals Ltd.                                                               | Projet Strange Lake Rare Earth | Ressources totales : 1,15 millions tonnes OTR <sup>i</sup> (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<br>Ressources inférées : 0,985 à 7,2 millions tonnes OTR (35,8% TRLO)                                                                           |
|                      | Pele Mountain Resources Inc.                                                           | Pitanga                        | Ressources indiquées : 56 380 tonnes OTR<br>Ressources inférées : 41 660 tonnes OTR <sup>i</sup>                                                                                                    |
|                      | Pele Mountain Resources Inc.                                                           | Dépôt Eco Ridge                | Ressources contenues : 66 402 tonnes OTR <sup>a</sup> (7,9% TRLO)                                                                                                                                   |
|                      | Commerce Resources Corp                                                                | Projet Eldor rare earth        | Ressources contenues : 2 041 716 tonnes OTR <sup>a</sup> (5,1% TRLO)                                                                                                                                |
|                      | Baogang Rare Earth                                                                     | Dépôt Bayan Obo                | Les estimations sont très différentes d'une source à l'autre 30-50 millions tonnes OTR. Cette mine est la plus importante au monde avec environ 42% de la production mondiale en 2010. <sup>m</sup> |
| Chine                | 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 <sup>i</sup> (53,4% TRLO)                                                                                                                             |
| Malawi               | Lynas Corporation Ltd.                                                                 | Dépôt Kangankunde              | Ressources contenues : 107 019 tonnes OTR <sup>a</sup> (0,7% TRLO)                                                                                                                                  |
| Mongolie             |                                                                                        |                                |                                                                                                                                                                                                     |
| Namibie              | Namibia Rare Earth Inc.                                                                | Projet Lofdal Rare Earths      | Ressources indiquées : 0,9 millions tonnes OTR<br>Ressources inférées : 0,75 millions tonnes OTR <sup>e</sup>                                                                                       |
| 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.<br>(Rare Earth Extraction Co. Ltd.)                  | Steenkampskraal                | Ressources indiquées : 176 000 tonnes OTR,<br>Ressources inférées : 278 000 tonnes OTR, (7,7% TRLO)<br>Production estimée 32 000 - 42 000 tonnes OTR par an <sup>g</sup>                            |

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