HAL
open science

Mise au point d'une méthode intégrée d'analyse des impacts des filières de matières premières minérales

Judith Pigneur

To cite this version:

Judith Pigneur. Mise au point d'une méthode intégrée d'analyse des impacts des filières de matières premières minérales. Gestion et management. Université Paris Saclay (COmUE), 2019. Français. NNT : 2019SACLC093 . tel-03123793

HAL Id: tel-03123793

https://theses.hal.science/tel-03123793v1

Submitted on 28 Jan 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

université PARIS-SACLAY

NNT : 2019SACLC093

CentraleSupélec

Mise au point d'une méthode intégrée d'analyse des impacts des filières de matières premières minérales

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay

préparée à CentraleSupélec

École doctorale n°573 : interfaces : approches interdisciplinaires, fondements, applications et innovation (Interfaces)

Spécialité de doctorat : Génie industriel

Thèse présentée et soutenue à Gif-sur-Yvette, le 19/12/2019, par

Judith Pigneur

Composition du Jury :

Franck-Dominique Vivien Professeur de sciences économiques, Université de Reims Champagne Ardenne	Président
Jacques Richard Professeur Emérite de sciences de gestion, Université Paris-Dauphine	Rapporteur
Aurélien Acquier Professeur de sciences de gestion, ESCP Europe	Rapporteur
Pascal Da Costa Professeur de sciences économiques, CentraleSupélec - Université Paris-Saclay	Co-encadrant
Yann Leroy Maître de conférences en génie industriel, CentraleSupélec - Université Paris-Saclay	Co-encadrant
Éléonore Mounoud Maître de conférences en sciences de gestion, CentraleSupélec - Université Paris-Saclay	Directrice de thèse
Christophe Alliot Co-fondateur de l'entreprise Le Basic	Invité
Sebastian Berger Maître de conférences en sciences économiques, University of the West of England	Invité

Thèse de doctorat

ÉCOLE DOCTORALE
INTERFACES
Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation

Titre : Mise au point d'une méthode intégrée d'analyse des impacts des filières de matières premières minérales

Mots clés : Impacts environnementaux, impacts sociaux, chaînes globales de valeur, coûts sociaux, néodyme, terres rares

Résumé : Le sujet de la thèse est la mise au point d'une méthode intégrée d'analyse des coûts sociaux et environnementaux de l'épuisement dans les filières exploitant des métaux. La thèse qui est défendue est que l'épuisement des ressources métalliques, au-delà de la question des limites économiques de l'exploitation, est un démultiplicateur des coûts sociaux et environnementaux générés par nos modes de production et de consommation actuels. La thèse a été réalisée dans le cadre du projet de recherche du Bureau d'Analyse Sociétale pour une Information Citoyenne (le Basic) portant sur la mise au point d'indicateurs de soutenabilité. La thèse se situe dans une approche transdisciplinaire, croisant une approche issue des sciences de gestion, soit l'analyse des chaînes globales de valeurs (CGV), mobilisée pour comprendre l'influence de l'organisation des filières mondialisées dans les impacts sociaux et environnementaux, et une approche issue des sciences économiques, celle des coûts sociaux, telle que développée par Karl William Kapp, qui s'intéresse aux coûts liés aux dommages sociaux et environnementaux inhérents à notre système économique. La thèse vise à contribuer à la fois au renforcement du cadre méthodologique des coûts sociétaux développé par le Basic, mais aussi à la recherche émergente sur la prise en compte de l'épuisement dans la mise au point d'indicateurs de soutenabilité. La recherche vise à explorer les liens entre épuisement, augmentation des coûts sociaux et environnementaux de l'exploitation, et influence des filières mondialisées sur ces coûts.

Cette problématique générale se décline en deux parties. Une première partie théorique, composée du chapitre 1 et 2, contribue à définir l'épuisement des métaux dans une perspective de soutenabilité forte et à formaliser un cadre d'évaluation des coûts sociaux cohérent avec cette définition. Dans le chapitre 1 l'épuisement est redéfini comme deux phénomènes conjoints, continus et irréversibles : perte de quantité (perte de matière tout au long de la filière) et de qualité (diminution des teneurs du gisement et difficultés du recyclage) de la ressource d'une part ; et comme un démultiplicateur d'impacts environnementaux, sanitaires et sociaux des filières exploitant des métaux d'autre part. Le chapitre 2 propose un nouveau cadre de prise en compte de l'épuisement et de ses coûts sociaux, faisant le lien entre les travaux de l'économie écologique et de l'économie institutionnelle sur la base des travaux de Karl William Kapp. Cette méthodologie développe une approche tournée vers l'études des causes des coûts sociaux et des leviers pour diminuer ces coûts. Une deuxième partie empirique applique le cadre d'évaluation au cas d'étude de la chaîne du néodyme utilisé dans les aimants Nd-Fe-B. Cette étude de cas montre que, bien que l'épuisement des réserves de terres rares ne soit pas perçu comme un danger imminent, les coûts sociaux de l'épuisement sont déjà importants et que des actions pourraient être mise en œuvre pour diminuer ces coûts. Cette étude de cas permet de démontrer la pertinence d'un point de vue social et écologique de l'analyse de l'épuisement par les coûts sociaux

Université Paris-Saclay
Espace Technologique / Immeuble Discovery
Route de l'Orme aux Merisiers RD 128 / 91190 Saint-Aubin, France

ÉCOLE DOCTORALE
INTERFACES
Approches Interdisciplinaires : Fondements, Applications et Innovation

Title : Developing an integrated analysis method of impacts for mineral raw materials chains

Keywords : Environmental impacts, social impacts, global value chains, social costs, neodymium, rare earths

Abstract : The subject of the thesis is the development of an integrated method of analysis of the social and environmental costs of depletion in the metal value chains. The supported thesis is that the depletion of metallic resources, beyond the question of the economic limits of exploitation, is a multiplier of the social and environmental costs generated by our current modes of production and consumption. The thesis was carried out as part of the *Bureau for Appraisal of Social Impacts for Citizen information* (Basic) research and development project on the development of sustainability indicators. The thesis is part of a transdisciplinary approach, combining an approach from the management sciences, namely the analysis of global value chains (GVC), mobilized to understand the influence of the organization of globalized chains on social and environmental impacts, and an economics-based approach, that of social costs, as developed by Karl William Kapp, which looks at the costs of social and environmental damage inherent in our economic system. The thesis aims to contribute to both the reinforcement of the methodological framework of social costs developed by the Basic, but also to the emerging research on depletion within the field of development of sustainability indicators. The research aims to explore the links between depletion, increased social and environmental costs of exploitation, and the influence of globalized chains on the occurrence of these costs.

This general problem is divided into two parts. A first theoretical part, composed of chapters 1 and 2, contributes to define the depletion of metals in a perspective of strong sustainability and to formalize a framework of evaluation of the social costs coherent with this definition. In Chapter 1, depletion is redefined as two joint, continuous and irreversible phenomena: 1) loss of quantity (loss of material throughout the supply chain) and quality (diminution of ore grades and difficulties of recycling) of the resource.2) as a multiplier of environmental, health and social impacts of the metal value chains. Chapter 2 proposes a new framework to account for depletion and its social costs, linking the work of ecological economics and institutional economics based on the work of Karl William Kapp. This methodology develops an approach focused on studying the causes of social costs and levers to reduce these costs. A second empirical part applies the evaluation framework to the case study of the neodymium chain used in Nd-Fe-B magnets. This case study shows that, although the depletion of rare earth reserves is not perceived as an imminent danger, the social costs of depletion are already significant and that actions could be implemented to reduce these costs. This case study demonstrates the social and ecological relevance of the analysis of social cost of depletion.

Université Paris-Saclay
Espace Technologique / Immeuble Discovery
Route de l'Orme aux Merisiers RD 128 / 91190 Saint-Aubin, France

« *Freedom is not much concerned with tail fins or even with automobiles. Those who argue that it is identified with the greatest possible range of choice of consumers' goods are only confessing their exceedingly simple-minded and mechanical view of man and his liberties*.»

John Kenneth Galbraith (1958). Perspectives on conservation: Essays on America's natural resources

« *We do not have a spare planet waiting in the wings in case Simon loses, and the first rule of a successful gambler is not to wager more than you can afford to lose.* »

Robert Costanza (1995). An unbalanced debate. Review of: Scarcity or Abundance: A Debate on the Environment by Norman Myers and Julian Simon

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Christophe Alliot, sans qui je n'aurais jamais envisagé de faire une thèse. Il m'a donné l'opportunité de réaliser un projet ambitieux et la liberté d'explorer de nouveaux sujets. Je le remercie du partage de ses connaissances, de sa confiance, de son énergie, de son enthousiasme et de son accompagnement durant ce long travail.

J'adresse mes remerciements chaleureux à ma directrice Éléonore Mounoud pour m'avoir soutenue et accompagnée tout au long de ce projet. En particulier, je la remercie d'avoir tempéré mes aspirations trop vastes, de m'avoir apporté son pragmatisme et sa présence bienveillante qui m'ont permis d'arriver au bout de ce projet.

Je remercie également vivement les Professeurs Jacques Richard et Aurélien Acquier d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse, et un grand merci au Professeur Franck-Dominique Vivien d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

J'adresse mes remerciements au laboratoire LGI et à l'équipe *Sustainable Economy*, en particulier au Professeur Pascal Da Costa et à Yann Leroy pour leur accompagnement sur ce projet, leur disponibilité, et particulièrement, pour m'avoir fait l'honneur d'être membres de mon jury.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à la Fondation 2019 et à Romain Ferrari pour son soutien financier, mais également son implication dans les échanges sur ma thèse et son intérêt soutenu pour le projet.

Un grand merci, bien sûr, au Basic, pour la force et la pertinence de son projet qui m'ont conduit à m'embarquer dans cette aventure. Un merci tout particulier à Matthias et Marion qui ont égayé mes journées de travail avec constance, humour, et gentillesse, tout simplement.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à Alexandre Rambaud pour le temps qu'il m'a accordé à plusieurs reprises, qui m'a permis de m'approprier divers concepts de sciences économiques, qui a fait avancer mon travail de recherche. Ces temps ont toujours donné lieu à des échanges enrichissants et stimulants.

Je remercie chaleureusement Sebastian Berger, qui m'a accueillie à bras ouverts à UWE, pour le partage de ses connaissances sur Kapp, pour son approche enthousiaste et enthousiasmante de la recherche et de la connaissance. Cette rencontre a été déterminante dans la poursuite et la finalisation de ma thèse.

Je souhaite également remercier la FPH pour m'avoir accueillie dans ses agréables locaux pendant la quasi-totalité de ma thèse. Un remerciement plus général à tous les occupants du 38 rue Saint-Sabin pour leur présence bienveillante et les discussions animées du déjeuner.

Je voudrais aussi remercier l'Institut Veblen et en particulier Aurore Lalucq, qui m' a accompagnée dans le processus d'écriture et permis de mettre mes idées sur le papier lorsque j'étais dans l'impasse.

Je remercie du fond du cœur ma famille pour le soin et la constance avec lesquels ils m'ont soutenue, et leur confiance en moi, particulièrement les derniers mois, mais ces dernières années et au-delà. Merci à mon père pour son attention, sa dédramatisation, et pour m'avoir permis de ne pas oublier de manger pendant la rédaction. Merci à ma mère qui m'a appris la ténacité, et aussi que le « mieux est l'ennemi du bien », même si c'est une leçon que l'on essaye toujours d'apprendre ! Mes frères, j'ai une tendre pensée pour vous, pour le soutien sans faille, comme pour les moments de

rigolade qui me rendent la vie plus facile. Merci à ma grand-mère Huguette pour son espièglerie et pour tout ce qu'elle m'a appris.

Mes pensées vont également à Ana Paula et Seherah sur qui j'ai toujours pu compter et qui comptent beaucoup pour moi. Merci Ana Paula de m'avoir remis les idées aux claires sur ma thèse, avec beaucoup de compréhension de ta part, comme toujours.

Je dois également remercier l'association Ingénieurs Sans Frontières dans son ensemble qui a vu naître ce projet de recherche, à travers mon engagement dans l'association ISF SystExt - qui au-delà de ma thèse a été déterminante dans mon orientation vers les problématiques minières - et qui l'a vu se terminer avec une présence dans ses locaux auprès de l'équipe salariée. Merci à Fanny, Margot, Émilie, et Arthur pour leur présence apaisante et les pauses déjeuner qui me permettaient de penser à autre chose ! J'ai bien sûr une pensée pour les amies et amis que je me suis fait lors de débats acharnés, de discussions à refaire le monde, qui m'ont permis d'affuter mon esprit critique et mon goût pour l'engagement, et qui, tout simplement, sont de belles personnes. Auréline, sa force, sa vivacité et son altruisme, Sasha, son humour caustique et son amour des plantes vertes, Eduardo, son regard tranquille et son intelligence, Maïlys, son énergie impressionnante et son goût des bonnes choses, Tanguy qui me fait relativiser sur ma capacité à trop parler, mais qu'au fond on adore toujours écouter, Florestan, son esprit créatif et sa capacité d'écoute, Arnaud, sa curiosité et son exigence à prendre en compte la complexité du monde, Mathieu, sa volonté de construire d'autres possibles (et l'organisation du pot de thèse !), Lola, son intelligence aiguisée et son humour, Aurore, son travail acharné et son engagement, et tant d'autres.

Un très grand merci également à Yannick, Thibaud, Manon, Romain, Élisabeth, Adèle, Pierre dit Pedro, Céline, Claire, Marguerite qui en plus de m'apporter des moments d'émulation intellectuelle et leur amitié, ont fait un efficace travail de relecture ! Grâce à vous, ces années de dur labeur peuvent être publiées… Je dois remercier particulièrement Yannick pour son soutien, son humour et son accompagnement qui m'ont permis de tenir le travail de rédaction, Adèle pour son incitation récurrente à prendre soin de moi et son énergie communicative, ainsi que Thibaud et Manon en qui j'ai confiance et qui m'apportent de la sérénité.

Je dois un remerciement spécial à Mathilde sans qui cette thèse n'aurait pas pu se terminer, puisqu'elle m'a littéralement sauvée en me conduisant à son aboutissement dans son bolide.

Enfin, je ne remercierai jamais assez mes amis de toujours qui ont contribué à cette thèse en étant présents dans ma vie et mes pensées. Il m'est impossible de remercier tou·te·s celles et ceux que j'aime ici, mais certain·e·s vécurent ma thèse de près. Lorna, Pierre, Guillaume, merci d'avoir accompagné mon quotidien et de l'avoir rendu plus doux pendant tout le début de ma thèse. De m'avoir soutenue (et supportée) dans les moments de questionnement. Vous êtes des amis précieux et j'espère que notre amitié déjà longue et solide durera encore longtemps. Claire, Sophie, et Malorie, vous êtes des petits rayons de soleil et vous voir m'a toujours fait le plus grand bien, thèse compris ! Alice, partenaire de réflexions éthiques et politiques, qu'aurait été ma thèse sans les dîners chez toi et nos discussions hebdomadaires, points d'étape réguliers sur les avancées ou les blocages ? Hava qui a toujours été persuadée que je finirai cette thèse, même quand je n'y croyais plus. Même éloignée, Eva, tu as pu m'apporter des moments de partage et d'amitié dont je sortais avec le sourire ! Elodie, merci pour ton amitié sincère et pour m'avoir appris à te connaître et me connaître moi-même, je pense sincèrement que je comprends mieux les humains grâce à toi.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 18

PARTIE 1 : Le coût social de l'épuisement des ressources métalliques 27

CHAPITRE 1 : Revue et définition de l'épuisement des ressources métalliques 29

1. L'épuisement des ressources dans l'histoire de la pensée néoclassique et néo-institutionnelle 29

1.1. Les débuts de la science économique et l'absence de concept d'épuisement 30

1.2. Le marginalisme et l'épuisement 33

1.3. La réponse néoclassique au mouvement conservationniste : le concept d'efficience intergénérationnelle 36

1.4. À partir des années 1960 : controverse sur l'épuisement 38

1.5. Le courant néo-hotellinien : continuité du modèle néoclassique et approche de la question de développement soutenable 42

1.6. La nouvelle économie institutionnelle et la nouvelle économie des ressources 46

1.7. Les théories de l'abondance 49

2. Les spécificités de l'épuisement des ressources physiques en métaux 53

2.1. Les ressources non renouvelables et les ressources renouvelables, quelles différences sur la question de l'épuisement 53

2.2. Les ressources énergétiques fossiles, les métaux et l'interdépendance des exploitations 60

2.3. Les métaux : des usages non énergétiques en expansion 65

2.4. Les métaux : diminution des teneurs 65

2.5. Le recyclage et ses limites physiques 68

2.6. Le recyclage et ses limites économiques 71

3. Les angles morts des approches économiques néoclassiques concernant les enjeux associés à l'épuisement physique, approches de l'économie écologique et institutionnelle 76

3.1. L'irréversibilité du temps et la non-substituabilité des capitaux : l'approche de l'économie écologique et la perspective de la soutenabilité forte 76

3.2. Liens entre la sphère économique, et les sphères sociale et biophysique : impacts en augmentation du fait de la diminution irréversible de qualité des ressources 86

CHAPITRE 2 : Définition du coût social de l'épuisement et cadre méthodologique pour son évaluation 131

1. Approches existantes pour évaluer le coût de l'épuisement 132

1.1. Approches par le prix 132

1.2. Approches par le coût de production 133

1.3. Coût énergétique de l'exploitation 137

1.4. Reformulation de la problématique 140
2. La notion d'externalité et le phénomène d'épuisement des ressources 142
2.1. La définition des externalités de Pigou à Stigler 142
2.2. La mobilisation du concept d'externalités 144
2.3. Externalités et épuisement des ressources 147
3. Approche de l'épuisement dans le travail de K.W. Kapp et choix de ce cadre conceptuel pour la thèse 150
3.1. Limites et avantages de l'évaluation monétaire, approches de l'économie écologique et du Basic 150
3.2. Définition du concept de coût social 151
3.3. Causalité circulaire cumulative et approche en système ouvert 155
3.4. Les coûts sociaux de l'épuisement des ressources dans le travail de K.W.Kapp 158
4. L'objet d'étude : de l'entreprise chez Kapp, aux filières de production mondialisées 167
4.1. Des filières mondialisées marquées par une asymétrie amont-aval 167
4.2. Contexte de l'émergence des théories sur les chaînes globales de valeur 168
5. Cadre pour l'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement des ressources métalliques 172
5.1. Précisions de la définition des coûts sociaux 173
5.2. Les critères généraux d'évaluation monétaire des coûts sociaux et environnementaux et concept de Kapp 177
5.3. L'identification des chaînes de causalité circulaire cumulative amplifiant la génération de coûts sociaux 187
PARTIE 2 : Cas d'étude, application de l'approche d'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement 193
CHAPITRE 3 : Caractérisation des coûts sociaux liés à l'épuisement dans la chaîne de valeur du néodyme utilisé dans les aimants Nd-Fe-B 195
1. La chaîne de valeur du néodyme utilisé dans les aimants Nd-Fe-B 197
1.1. Cadre de l'analyse, les chaînes globales de valeurs 197
1.2. Les évolutions organisationnelles historiques de la production des terres rares 198
1.3. Les principales étapes et acteurs de la chaîne de valeur du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B 218
1.4. Structure la chaîne globale de valeur du néodyme dans les aimants Nd-F-B en Chine et au Japon, éclairage des entretiens 232
2. Les coûts sociaux dans la chaîne de valeur du néodyme dans les aimants Nd-F-B et leur lien avec l'épuisement de la ressource 245
2.1. Les enjeux sociaux, sanitaires et environnementaux concentrés en amont de la filière, avec des spécificités au nord et au sud de la Chine 246
2.2. Évaluation des coûts sociaux des déchets miniers et de leur lien avec la dynamique d'épuisement de la ressource 255

3. Lien entre les coûts sociaux de l'épuisement et l'organisation de la chaîne globale de valeur des aimants Nd-Fe-B 327
4. Discussion sur les résultats du cas d'étude sur les coûts sociaux et environnementaux du néodyme et sur la méthodologie utilisée 330
4.1. Rentabilité de l'investissement pour la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement dans la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe B 331
4.2. Coûts sociaux de l'industrie extractive et investissement des industries aval dans la production de terres rares et le recyclage 332
4.3. Intervention des pouvoirs publics, recyclage et souveraineté 335
4.4. Freins macroéconomiques pour la prise en charge des coûts sociaux dans les chaînes de valeur extractives 337
CONCLUSION 343
Synthèse générale 343
Contributions de la thèse 345
Limites et perspectives 347
BIBLIOGRAPHIE 349
ANNEXES iii
Annexe 1 : Tableau périodique des éléments iii
Annexe 2 : Les minerais de terres rares dans le monde iv
Annexe 3 : Cadrage méthologique et synthèse anonyme des entretiens réalisés v
Annexe 4 : Traduction de l'article de Xu et Shi, 2005 xlix
Annexe 5 : Comparison of different social cost methodologies used on the case of cocoa value chain liv
Annexe 6 : Formules et variables utilisées au chapitre 3 lxiii

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Conceptions expansionniste et déplétioniste de la limite de l'exploitation des ressources non renouvelables. Source : autrice 42
Figure 2 : Quantité de matières (en kg) nécessaire pour produire un dollar (PIB en dollar international constant de 1990). Source : Krausmann & Eisenmenger, 2014 57
Figure 3 : Consommation totale des matières premières en Gigatonnes par an. Source : Krausmann et al., 2009 58
Figure 4 : Intensité matérielle (les ressources prises en compte étant biomasse, métaux, minéraux industriels et de construction, ressources énergiques fossiles), en dollars US constants 2000, basés sur le taux de change. Source : Schandl &West, 2010 59
Figure 5 : Production de minerai de fer mondiale en million de tonnes. Source : Yellishetty et al., 2011 59
Figure 6 : Besoins en matières premières et en énergie non renouvelable par unité de puissance produite. Source : Hertwich et al., 2016 62
Figure 7 : Déplétion des teneurs de différents minerais depuis 1834 en Australie. Source : Prior, 2012 67
Figure 8 : Déplétion des teneurs de minerais aurifères dans différents pays du monde depuis 1830 Source : Prior et al., 2012 68
Figure 9 : Épuisement du gisement primaire pour les ressources énergétiques fossiles et les métaux. Source : autrice, d'après éléments graphiques ISF SystExt, 2014 69
Figure 10 : Tableau périodique montrant les taux de recyclage fonctionnels moyens mondiaux en fin de vie (post-consommation) pour 60 métaux en 2011. Source :Ekins et al., 2017 72
Figure 11 : Les causes du processus de pertes de rendement pour trois composants en aluminium. Source : Allwood, 2014 74
Figure 12 : Représentation des trois sphères imbriquées qui conditionnent les activités humaines. Source : Passet, 1979 ; Richard & Plot-Vicard, 2014 77
Figure 13 : Tableau périodique des GWP des éléments, calculés sur le cycle de la ressource minière au métal affiné par kilogramme de chaque élément (kg CO_2-eq/kg). La coloration représente les GWP les plus bas (bleu) aux plus élevés (rouge). Les GWP indiqués sont pondérés par la composition de l'offre de 2008 (allocation économique) pour chaque élément. Source : Nuss & Eckelman, 2014 89
Figure 14 : Effet du choix de l'allocation sur le GWP. Source : Nuss & Eckelman, 2014 90
Figure 15 : Étapes de production des déchets d'exploitation minière (A-G) et du traitement métallurgique (H). Source :BRGM, 1999 92
Figure 16 : Schéma explicatif de la formation des pluies acides. Source : Margaret Cunningham ... 94
Figure 17 : Traitement d'une image satellite de Norilsk pour faire apparaître la pollution. Source : Allen, 2001 96
Figure 18 : La roue des métaux montrant les liens entre des métaux faisant l'objet d'une exploitation principale (en bleu), les métaux étant parfois coproduits (en violet), les métaux étant toujours coproduits (en blanc) et les métaux finissant dans les déchets ou les émissions (en vert). Source : Verhoef et al., 2004 98
Figure 19 : Empreinte terrestre de quelques produits du quotidien. Source : REdUSE, 2013 117
Figure 20 : Émissions de gaz à effet de serre en tonnes de CO_2 eq pour chaque kilogramme d'or produit en fonction de la teneur (en g/t ou ppm). Source : Mudd, 2007b 125

Figure 21 : Teneur moyenne des minerais d'or extraits en Australie des gisements en roche (*hard rock* mining) au cours du temps. Source : Mudd, 2007 126
Figure 22 : Production australienne de minerai d'or broyé (*ore milled*), déchets miniers reportés à minima (minimum Waste Rock Reported) et part de la production nationale provenant des mines à ciel ouvert à minima (*minimum open cut gold*). Source : Mudd, 2007 126
Figure 23 : Augmentation des impacts négatifs des systèmes miniers en raison de l'épuisement des ressources. Source : autrice 128
Figure 24 : Différence de périmètre entre le coût social selon Pigou (à gauche) et selon Kapp (à droite). Source : autrice 152
Figure 25 : Schéma illustrant les déséconomies, les phénomènes d'épuisement et les CCC dans les exemples de l'exploitation du charbon et du pétrole. Source : autrice, d'après Kapp, 1963 164
Figure 26 : La demande mondiale des terres rares sur les 5 dernières décennies. Source : Kingsnorth, 2015 in Mancheri & Marukawa, 2016 198
Figure 27 : Répartition des usages des terres rares en 2012 (t OTR). Source : BRGM, 2015, p. 51 ... 200
Figure 28 : Répartition des usages du néodyme en 2012 au niveau mondial. Source : BRGM, 2015200
Figure 29 : Production mondiale d'oxydes de terres rares de 1950 à 2000. Source : Lima & Filho, 2015, p. 38 209
Figure 30 : Quotas à l'exportation en Chine et leur part dans la production chinoise d'OTR entre 2013 et 2014. Source : autrice 213
Figure 31 : Volume brut (somme des imports et exports en milliers de tonnes à gauche) et valeur (en millions de dollars à droite) du commerce de terres rares entre 1990 et 2013 pour tous les pays rapporteurs de UN Comtrade. Source : Lima & Filho, 2015, p. 25 214
Figure 32 : Principales étapes de la fabrication des aimants frittés Nd-Fe-B depuis les mines de terres rares jusqu'aux aimants. Source : autrice 218
Figure 33 : Schéma de procédé de la décomposition par grillage intensifié du concentré de Baiyun Ebo par l'acide sulfurique. Source : Qi, 2018, fig. 1.48 221
Figure 34 : La chaine de valeur des Terres Rares de l'extraction à la fabrication d'aimants permanents, avec les principales sociétés impliquées en 2012. Source : BRGM, 2015, fig. 55 226
Figure 35 : Comparaison en valeur des exports chinois et japonais d'aimants électromagnétiques et permanents ainsi que des films d'aimants en néodyme, d'autre alliages à base de néodyme et des ferroalliages contenant des terres rares. Source : Lima & Filho, 2015, p. 28 227
Figure 36 : Organisation industrielle du point de vue des fabricants chinois d'aimants Nd-Fe-B en 2016. Source : autrice, d'après entretiens 235
Figure 37 : Les différentes sources secondaires pour la fabrication des aimants Nd-Fe-B et leurs utilisations dans les 4 principales étapes industrielles. Source : autrice, d'après entretiens 242
Figure 38 : Lien entre les facteurs d'épuisement et les enjeux sociaux et environnementaux pour le cas des terres rares. Source : autrice 254
Figure 39 : Illustration du modèle diminution des teneurs. Source : autrice, d'après éléments graphiques ISF SystExt, 2014 260
Figure 40 : Teneurs d'exploitation de Baiyun Ebo au cours du temps : données bibliographiques et régression linéaire. Source : autrice 261
Figure 41 : Production annuelle d'OTR en Chine (en gris) et à Baiyun Ebo (en bleu), en tonnes. Source : autrice 265
Figure 42 : Production cumulée d'OTR à Baiyun Ebo (tonnes). Source : autrice 265
Figure 43 : Évolution de la production de minerai à Baiyun Ebo de 1958 à 2016 (en tonnes). Source : autrice 268

Figure 44 : Teneurs moyennes d'exploitation et teneurs moyennes du gisement de Baiyun Ebo d'après modèle (%). Source : autrice 269
Figure 45 : Comparaison de la quantité cumulée d'oxydes de terres rares prélevée (EOTR) du gisement par rapport à la quantité cumulée de terres rares produites (POTR) dans la mine PE de Baiyun Ebo (en tonnes). Source : autrice 270
Figure 46 : Réserves restantes en minerai et en OTR pour les mines PE et Ouest (en tonnes). Source : autrice 270
Figure 47 : Principales étapes et déchets du traitement du minerai de Baiyun Ebo. Source : Qifan et al., 2010 272
Figure 48 : Les mines Principale et Est de terres rares de Baiyun Ebo, photographie satellite. Source : NASA, 30 juin 2006 272
Figure 49 : Production annuelle de résidus déversés dans le parc à résidus de Weikuang depuis sa création en 1965 (tonnes). Source : autrice 275
Figure 50 : Production cumulée de résidus déversés dans le parc à résidus de Weikuang depuis sa création en 1965 (tonnes). Source : autrice 275
Figure 51 : Production annuelle de résidus du barrage de Weikuang rapportée à la production annuelle d'OTR de Baiyun Ebo (tonnes de résidus/tonne OTR produite). Source : autrice 276
Figure 52 : Production de résidus déversés dans le barrage de Weikuang entre 1965 et 2016 en fonction de la production minérale totale de Baiyun Ebo (en tonnes) 277
Figure 53 : Rapport entre la production annuelle de résidus déversés dans le parc de Weikuang et la production minérale totale (en %) entre 1980 et 2016 en fonction de la teneur en OTR moyenne (en %). Les cercles orange soulignent les effets des changements de $RdtOTR_n$. Source : autrice 277
Figure 54 : Rapport entre la production annuelle de résidus déversés dans le parc de Weikuang et la production minérale totale (PRweikuang/PMin en %) entre 1980 et 2005 en fonction du rendement OTR (Rdt OTR). Source : autrice 278
Figure 55 : Rapport entre la production annuelle de résidus déversés dans le parc de Weikuang et la production minérale totale (en %) entre 2000 et 2016 en fonction de la teneur en OTR moyenne (en %). RdtOTR est constant et égal à 10%. Source : autrice 278
Figure 56 : Masse d'OTR contenue annuellement dans les résidus de concentration ($PRconcOTR_n$) en tonne. Source : autrice 281
Figure 57 : Masse d'OTR cumulées perdues (en bleu) et stockées dans le parc à résidus de Weikuang (en orange), en tonnes. Source : autrice 282
Figure 58 : Teneurs moyennes en OTR (%) d'exploitation des mines PE et Ouest (en bleu) et du parc à résidus de Weikuang (en orange). Source : autrice 282
Figure 59 : Coûts sociaux liés aux résidus de Baiyun Ebo pour l'année 2016 allocation massique (à gauche) et allocation économique (à droite). Source : autrice 292
Figure 60 : Coûts sociaux associés à la production de résidus de concentration du minerai et au traitement chimique des terres rares à Baiyun Ebo en 2016 ($). Source : autrice 293
Figure 61 : Schéma présentant les scénarii 1 à 5. Source : autrice 296
Figure 62 : Production annuelle pour le scénario 1 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice 299
Figure 63 : Production annuelle de déchets dans le scénario 1 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice 299
Figure 64 : Évolution annuelle des coûts sociaux variables liés aux déchets, Scénario 1 ($). Source : autrice 300

Figure 65 : Production annuelle dans le scénario 2 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice 300
Figure 66 : Production annuelle de déchets dans le scénario 2 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice 301
Figure 67 : Évolution annuelle des coûts sociaux variables liés aux déchets, Scénario 2 ($). Source : autrice 301
Figure 68 : Production annuelle pour le scénario 3 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice 303
Figure 69 : Production annuelle de déchets pour le scénario 4 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice 303
Figure 70 : Évolution annuelle des coûts sociaux variables liés aux déchets, Scénario 4 ($). Source : autrice 304
Figure 71 : Production d'OTR et déséconomies pour le scénario 5 (tonnes). Source : autrice..... 305
Figure 72 : Production annuelle de déchets pour le scénario 5 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice 305
Figure 73 : Évolution annuelle des coûts sociaux variables liés aux déchets, Scénario 5 ($). Source : autrice 306
Figure 74 : Schéma présentant le scénario 6. Source : autrice 306
Figure 75 : Production annuelle pour le scénario 6 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice 309
Figure 76 : Accumulation de résidus dans les parcs à résidus pour le scénario 6 (tonnes). Source : autrice 310
Figure 77 : Évolution annuelle des coûts sociaux liés au stockage en parc à résidus, Scénario 6 ($). Source : autrice 310
Figure 78 : Évolution 2017-2030 du total des coûts sociaux liés aux déchets par tonne de néodyme produit ($/tonne de Nd produit). Source : autrice 312
Figure 79 : Évolution 2017-2030 du total annuel des coûts sociaux liés aux déchets en valeur absolue (en $). Source : autrice 313
Figure 80 : Déséconomies en OTR selon les différents scénarii (en tonne). Source : autrice 314
Figure 81 : Coût annuel du stockage dans le parc de Weikuang et le nouveau parc à résidu ($). Source : autrice 315
Figure 82 : Pertes de néodyme en pourcentage le long de la chaîne globale de valeur, depuis l'extraction à Baiyun Ebo au recyclage des aimants. Source : autrice 325
Figure 83 : Les déséconomies, un processus cumulatif qui tend à accélérer le taux d'utilisation de la ressource et les pertes de néodyme. Source : autrice..... 329

TABLE DES TABLES

Tableau 1 : Définitions des termes liés au stock de ressources 41
Tableau 2 : La conception de l'épuisement par l'école néo-hotellinienne. Source : adapté de Fizaine, 2014 43
Tableau 3 : Typologie des différents types de ressources d'après deux classifications 55
Tableau 4 : Définition des différentes sous-catégories de ressources non renouvelables et renouvelables 56
Tableau 5 : MPM utilisées dans la production du pétrole. Source : Ad-hoc Working Group on defining critical materials, 2014 61
Tableau 6 : Typologie des différentes catégories de métaux 64
Tableau 7 : Définitions des termes liés à la teneur 66
Tableau 8 : Définitions des termes liés aux gisements métalliques issus du recyclage 69
Tableau 9 : Sources de drainage minier acide. Source : traduit d'Akcil & Koldas, 2006 91
Tableau 10 : Distribution des sites identifiés par le programme d'identification des sites toxiques du Blacksmith Institute pour les 7 premiers polluants clefs. Source : Ericson et al., 2013 100
Tableau 11 : Chaîne de désintégration de l'^{238}U et du ^{232}Th. Source : National Research Council (US) Committee, 1999 101
Tableau 12 : Synthèse des effets sanitaires de cinq métaux lourds et des radionucléides 103
Tableau 13 : Chiffres clefs 2015 des accidents du travail en Chine recensés par le site China Labour Bulletin. Source : China Work Accident Map, s.d. 111
Tableau 14 : Comparaison des différentes approches existantes pour prendre en compte les coûts de l'épuisement 136
Tableau 15 : Comparaison des approches des externalités et des coûts sociaux. Source : adapté de S. Berger, 2017 154
Tableau 16 : Illustration du concept de déséconomies à travers l'exploitation du pétrole aux États-Unis. Source : autrice, à partir des travaux de Kapp, 1963 162
Tableau 17 : Typologie des coûts sociaux de Kapp et prise en compte de l'épuisement des ressources 165
Tableau 18 : Synthèse des différentes approches abordées dans la thèse concernant la prise en compte des coûts sociaux de l'épuisement 166
Tableau 19 : Comparaison des approches pour évaluer les phénomènes d'épuisement. Source : d'après De Bruille, 2014; Henckens, Driessen, & Worrell, 2014; Yellishetty et al., 2012 176
Tableau 20 : Les coûts sociaux au sens de Kapp et le phénomène d'épuisement 177
Tableau 21 : La répartition massique du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B pour différentes applications dans le monde en 2010. Source : Constantinides, 2012 201
Tableau 22 : Principales applications utilisant des aimants Nd-Fe-B, en gras les applications principales en Europe. Source : Guyonnet et al., 2015 202
Tableau 23 : La répartition du néodyme entrant dans les différents secteurs européens en 2010. Source : Planchon et al., 2015 203
Tableau 24 : Nombre de nouvelles voitures électriques (BEV) enregistrées en Europe (UE-28 et l'Islande, la Norvège et la Suisse) en 2013 207
Tableau 25 : Demande en oxydes de terres rares (OTR) mondiale entre 2005 et 2014, demande hors Chine (HC) et part chinoise de la demande mondiale 216
Tableau 26 : Récapitulatif simplifié des restructurations en cours des entreprises du secteur des Terres Rares en Chine. Source : BRGM, 2015; MIIT, 2019; Prassas, 2018 225

Tableau 27 : Principaux producteurs chinois d'aimants Nd-Fe-B en 2012 228
Tableau 28 : Récapitulatif des entretiens menés pour le cas d'étude 234
Tableau 29 : Capacité de production des fabricants d'aimants Nd-Fe-B 238
Tableau 30 : Teneurs moyennes et ressources initiales du gisement de Baiyun Ebo en 1958 avant exploitation 258
Tableau 31 : Synthèse bibliographique (de 1958 à 2016) de l'évolution au cours du temps des teneurs d'exploitation de la mine PE à Baiyun Ebo 260
Tableau 32 : Production annuelle d'OTR chinoise de 1980 à 2016 264
Tableau 33 : Hypothèses rendements de la production d'OTR (RdtOTR) de 1980 à 2016 267
Tableau 34 : Comparaison de la production de résidus déversés dans le parc de Weikuang (PRweikuang) entre les calculs de l'autrice et les données bibliographique 274
Tableau 35 : ThO_2 contenu dans les résidus de traitement chimique (calculs autrice) en tonnes.. 280
Tableau 36 : ThO_2 contenu dans le parc à résidus (calculs autrice) en tonnes 280
Tableau 37 : Proportion des différentes terres rares dans le gisement de Baiyun Ebo. Source : Zhou et al., 2017 284
Tableau 38 : Prix ($/tonne) OTR de Baotou Iron and Steel Group et concentré de fer (spot price, c.f.r. China, 62% Fe) en 2013 285
Tableau 39 : Évaluation des coûts sociaux liés aux résidus miniers et de traitement chimique pour l'année 2016 à Baiyun Ebo 294
Tableau 40 : Mode de calcul des coûts pour les scénarii 1 à 5 297
Tableau 41 : Coûts fixes scénarii 1 à 5 298
Tableau 42 : Facteurs utilisés pour le scénario 1 à 3 298
Tableau 43 : Mode de calcul des coûts pour le scénario 6 307
Tableau 44 : Facteurs utilisés pour le scénario 6 308
Tableau 45 : Coûts fixes scénario 6 311
Tableau 46 : Comparaison des coûts sociaux 2017 à 2030 pour les différents scénarii 313
Tableau 47 : Part du prix du néodyme (prix de 2013) que représente les coûts sociaux annuels moyens (2017-2030) des déchets attribués au néodyme par l'allocation économique 317
Tableau 48 : Part du coût social de l'exploitation minière du néodyme liée à l'épuisement de la ressource 318

LISTE DES ACRONYMES

Basic	Bureau d'Analyse Sociétale pour une Information Citoyenne
Ac	Actinium
ACFTU	*All-China Federation of Trade Unions*, Fédération nationale des syndicats de Chine
ACB	Analyses Coûts-Bénéfices
ACV	Analyse de Cycle de Vie
Ademe	Agence de la transition écologique, anciennement Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
Ag	Argent
Al	Aluminium
As	Arsenic
ASM	*Artisanal and Small-Scale Mining,* mines artisanales ou mines à petites échelles
Au	Or
B	Bore
Ba	Baryum
Be	Béryllium
BGS	*British Geological Survey*, organisme britannique équivalent au BRGM français
Bi	Bismuth
Br	Brome
C	Carbone
Ca	Calcium
CAP	Consentement À Payer
CCC	Causalité Circulaire Cumulative
Cd	Cadmium
Ce	Cérium
CGC	Chaînes Globales de Commodités
CGV	Chaînes Globales de Valeur
CIFRE	Convention Industrielle de Formation par la REcherche
Cl	Chlore
Co	Cobalt
Cr	Chrome

Cs	Césium
CSRE	Chinese Society of Rare Earths
Cu	Cuivre
DD PMSG	Éoliennes sans multiplicateur à générateurs synchrones avec aimant permanent
DMA	Drainage Minier Acide
Dy	Dysprosium
ENC	École NéoClassique
ENSG	École Nationale Supérieure de Géologie
Er	Erbium
Eu	Europium
Europe	Désigne les 28 membres de l'Union Européenne, sauf mention contraire
F	Fluor
FAO	*Food and Agriculture Organization*, Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
Fe	Fer
FMI	Fonds Monétaire International
Ga	Gallium
Gd	Gadolinium
Ge	Germanium
H	Hydrogène
HDD	*Hard Disk Drive*, disques durs
Hf	Hafnium
Hg	Mercure
Ho	Holmium
I	Iode
IFOAM	*International Federation of Organic Agriculture Movements*
In	Indium
IPBES	*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change*, GIEC
Ir	Iridium
ISF SystExt	Ingénieurs Sans Frontières Systèmes extractifs et environnements, maintenant SystExt

JV	*Joint-venture*, coentreprise
K	Potassium
La	Lanthane
lb	Livre (unité de masse)
IRP	*International Resource Panel*, ou Groupe International d'Experts sur les Ressources (GIER)
LGI	Laboratoire Génie Industriel de CentraleSupélec
Li	Lithium
Lu	Lutécium
MAEDI	Ministère des Affaires Étrangères et du Développement International
MCO	Mine à Ciel Ouvert
MEC	Méthode d'Évaluation Contingente
METI	Ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie au Japon
MEXT	Ministère de l'Education, de la Culture, des Sports, des Sciences et de la Technologie au Japon
MFA	*Material flow accounting*, comptabilité des flux de matières
Mg	Magnésium
MIIT	Ministère de l'Industrie et des Technologies de l'Information en Chine
Mn	Manganèse
Mo	Molybdène
MPM	Matières Premières Minérales
N	Azote
Na	Sodium
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
Nb	Niobium
Nd	Néodyme
Nd-Fe-B	Néodyme-fer bore
NEI	Nouvelle Économie Institutionnelle
NER	Nouvelle Économie des Ressources
Ni	Nickel
NORM	*Naturally Occurring Radioactive Materials*
O	Oxygène
OMC	Organisation Mondiale du Commerce

OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONG	Organisation Non Gouvernementale
ONU	Organisation des Nations Unies
Os	Osmium
OTR	Oxydes de Terres Rares
P	Phosphore
Pa	Protactinium
Pb	Plomb
PC	*Personal Computer*, ordinateur
Pd	Palladium
PGM	*Platinum Group Metals*, métaux du groupe du platine
PIB	Produit Intérieur Brut
Pm	Prométhium
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
Po	Polonium
Pr	Praséodyme
PSA	Peugeot Société Anonyme
PSE	Paiements pour Services Environnementaux
Pt	Platine
R&D	Recherche et Développement
Ra	Radium
Re	Rhénium
Rh	Rhodium
RMB	RenMinBi, yuan, ou CNY, la devise nationale de la Chine à l'exception des régions administratives spéciales de Hong Kong et de Macao
Rn	Radon
Ru	Ruthénium
S	Soufre
Sb	Antimoine
Se	Sélénium
Si	Silicium
Sm	Samarium

SMHRIC	*Southern Mongolian Human Rights Information Center*
Sn	Étain
Sr	Strontium
t	Tonne
Ta	Tantale
Tb	Terbium
Te	Tellure
TEEB	*The Economics of Ecosystems and Biodiversity*
TENORM	*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*
Th	Thorium
Ti	Titane
Tl	Thallium
Tm	Thulium
TMS	Travaux Miniers Souterrains
TR	Terres Rares
U	Uranium
UE	Union Européenne
US	*United States*
USD	*United States Dollar*
V	Vanadium
VAC	Vacuumschmelze GmbH & Co. KG
VAN	Valeur Actuelle Nette
W	Tungstène
XTC	Xiamen tungsten
Y	Yttrium
Yb	Ytterbium
Zn	Zinc
Zr	Zirconium

INTRODUCTION

Contexte et motivations

Malgré l'essor du développement durable et d'une multitude d'outils destinés à sa mise en œuvre dans les sphères publiques ou privées, une part croissante de l'opinion doute que les solutions proposées soient à la hauteur des enjeux : la dégradation environnementale s'accélère (IPBES, 2019; IPCC, 2019; Steffen, Broadgate, Deutsch, Gaffney, & Ludwig, 2015) en même temps que la croissance des inégalités (FMI, 2017; Piketty, 2013) dans la plupart des pays du monde. Dans le même temps, la diffusion croissante du modèle de société de consommation s'est accompagnée d'un éclatement géographique des activités et d'une dynamique de concentration économique : une part croissante de la valeur est ainsi captée par certains acteurs devenus incontournables dans le fonctionnement des chaînes mondialisées (Vercher-Chaptal & Palpacuer, 2013). Pour atteindre des niveaux de rentabilité toujours plus élevés, ces chaînes génèrent des impacts croissants qui sont reportés sur la collectivité et les individus dans les différents territoires.

Face aux constats de l'accroissement des problématiques liées au développement durable et à l'importance des chaînes mondialisées dans notre modèle économique, le Bureau d'analyse sociétale pour une information citoyenne (la société le Basic) considère qu'un des leviers de changement réside dans une meilleure information sur les impacts sociétaux des acteurs économiques publics et privés, pour nourrir le débat public et les décisions politiques. Le Basic cherche ainsi à concevoir des indicateurs de durabilité à l'échelle des chaînes mondialisées, c'est-à-dire du producteur de matières premières jusqu'au consommateur final, qui permettent d'identifier les modèles de production et de consommation à encourager et ceux à juguler, voire à proscrire. Pour mettre au point ces indicateurs de durabilité, le Basic a fait le choix de fonder ses activités sur un important travail de recherche et développement. Ma thèse s'inscrit dans le cadre de ces travaux de recherche visant à développer une telle approche, en collaboration avec le Laboratoire Génie Industriel (LGI) de CentraleSupélec et sous mécénat de la Fondation 2019.

Le Basic s'appuie sur deux concepts principaux pour le développement d'indicateurs de durabilité. Le concept de coûts sociétaux tel que développé par l'économiste allemand Karl William Kapp dès le début des Trente Glorieuses (W. Kapp, 1963), qui s'intéresse aux coûts liés aux dommages sociaux et environnementaux inhérents à notre système économique. En cela le Basic rejoint le projet de la Fondation 2019 qui se donne pour objectif de créer des outils transcrivant les impacts sociaux et environnementaux dans l'approche économique afin de s'orienter vers un développement plus soutenable. En complément, l'approche des chaînes globales de valeur offre une base cohérente pour identifier - sur la base de leurs coûts sociétaux - les modèles de filières à développer ou à proscrire dans un objectif de transition sociale et écologique. Elle apporte un regard systémique qui met en évidence le contexte institutionnel dans lequel s'inscrit le commerce, et les relations de pouvoir qui permettent à certains agents clés de fixer les règles du jeu.

Le sujet de ma thèse découle de la rencontre du projet de recherche du Basic avec le constat du peu de prise en compte dans le débat public des impacts sociaux et environnementaux des activités extractives auquel m'a conduit mon parcours personnel. En effet, mon intérêt pour les impacts environnementaux et sociaux des activités minières s'est affirmé au cours de ma formation d'ingénieur géologue à l'École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, de mon expérience dans ce milieu professionnel et de mon implication au sein d'une association dont l'objectif est de participer à la transformation des systèmes extractifs existants ainsi qu'à la réinvention de nos rapports aux matières premières minérales[1] et énergétiques pour tendre vers des modèles

[1] Les matières premières minérales incluent les métaux, les minéraux industriels, les matériaux de

respectueux de l'Homme et de l'environnement (ISF SystExt). Ces expériences professionnelles et associatives dans le domaine minier m'ont permis d'entrevoir l'ampleur des problèmes environnementaux et sociaux liés à l'exploitation des matières premières minérales, de constater une concentration de ces exploitations dans les pays pauvres et les pays dits « en développement », et ont soulevé mon intérêt concernant le rôle de l'organisation des chaînes mondialisées dans cet état de fait.

Sur la base de ces expériences, trois constats ont été partagés avec le Basic et ont conduit à formuler le sujet de ma thèse.

Tout d'abord, le domaine minier et ses enjeux sont peu connus des citoyens, comme des pouvoirs publics. En effet, si les enjeux de durabilité des filières agricoles et alimentaires font l'objet d'un intérêt déjà bien installé auprès de toutes les parties prenantes (producteurs, consommateurs, pouvoirs publics, ONG) - comme en témoignent les nombreuses études réalisées sur le sujet par le Basic (Ademe, BASIC, AScA, 2017a; Ademe, BASIC, AScA, 2017b; Alliot, Cortin, Feige-Muller, & Ly, 2016; Banerji & Willoughby, 2019; Basic, 2018; Basic, 2019) - ce n'est pas le cas des mines. Ces dernières années ont vu le développement de quelques initiatives se préoccupant de la soutenabilité des filières liées à l'exploitation des matières premières minérales, principalement dans le domaine des nouvelles technologies (Fairphone, GoodElectronics) et dans le domaine de la bijouterie (Fairmined), et la publication de quelques ouvrages destinés au grand public (Abraham & Murray, 2015; Bednik, 2015; Bihouix & de Guillebon, 2010; Pitron, 2018), mais la prise de conscience des problématiques sociales et environnementales de cette exploitation reste minime par rapport à des sujets comme l'alimentation ou le changement climatique.

Ensuite, cette absence de prise en compte des enjeux est à mettre en regard de la place prépondérante que tiennent les matières premières minérales dans notre modèle économique (Bihouix & de Guillebon, 2010; Krausmann, Schaffartzik, Mayer, & Eisenmenger, 2014; Mérenne-Schoumaker, 2014; Schandl & West, 2010). Ainsi, au cours du XXème siècle, la consommation des matériaux de construction d'origine minérale a été multipliée par 34, et celle des minéraux industriels et des métaux a été multipliée par 27 (Krausmann et al., 2009). Depuis les années 1970, le nombre de métaux utilisés est passé de moins de vingt à une soixantaine, c'est-à-dire à l'ensemble des métaux et métalloïdes connus. Pour des taux de croissances similaires à ceux des dernières décennies, la quantité de métaux produite mondialement dans les vingt ou trente prochaines années serait plus importante que pendant toute l'histoire de l'humanité (Bihouix & de Guillebon, 2010). Enfin, les matières premières minérales, et en particulier certains métaux, sont nécessaires au développement de technologies pour la transition énergétique, comme les éoliennes et les panneaux solaires.

Enfin, cette forte dépendance de nos sociétés industrielles aux matières premières minérales pose la question de la durabilité de nos modèles de sociétés. Tout d'abord parce que leur exploitation génère d'importants impacts sociaux (Bednik, 2015; Martinez-Alier, Kallis, Veuthey, Walter, & Temper, 2010; Muradian, Walter, & Martinez-Alier, 2012; Svampa, 2011) et environnementaux (A. Behrens, Giljum, Kovanda, & Niza, 2007; IPBES, 2019; Nuss & Eckelman, 2014; Prior, Giurco, Mudd, Mason, & Behrisch, 2012). Mais également, parce que les matières premières minérales sont non-renouvelables et que leurs stocks sont par définition amenés à s'épuiser.

Face à ces trois constats, il peut être affirmé que l'absence de prise en compte des enjeux de durabilité des filières de matières premières minérales constitue un enjeu de société important. Le développement d'indicateurs de durabilité applicables à ces filières pourrait ainsi permettre d'éclairer ces enjeux. C'est cette idée, faisant le lien entre le souhait du Basic d'approfondir le cadre

construction d'origine minérale.

méthodologique de l'évaluation des coûts sociétaux à l'échelle des filières mondialisées et la volonté de l'autrice de contribuer à la connaissance sur les impacts sociétaux liés aux activités minières qui ont conduit à formuler l'objectif de cette thèse. C'est-à-dire la consolidation de la méthodologie du Basic d'analyse des impacts économiques, sociaux et environnementaux et des coûts sociétaux de ces impacts pour application aux filières de matières premières minérales, et en particulier des métaux, qui constituent le cœur de l'analyse de cette thèse.

Or, au-delà de cet objectif général, la question de la durabilité dans les filières métalliques soulève immédiatement une problématique spécifique aux ressources non-renouvelables : celle de l'épuisement. Non seulement la question de l'épuisement pose un problème dans la recherche de modèles durables de production et de consommation, mais cette question de l'épuisement est en lien, dans le cas des métaux, avec l'augmentation des impacts sociaux et environnementaux. En effet, parmi les impacts engendrés par l'augmentation de l'extraction, la diminution du stock de ces ressources se traduit notamment, pour les métaux, par une baisse de la qualité des gisements primaires[2] exploités, c'est-à-dire une baisse de la teneur du minerai et une ressource moins facilement accessible (Prior et al., 2012). Or, la diminution des teneurs des minerais exploités implique une augmentation des impacts environnementaux, puisque pour extraire un minerai plus faiblement concentré, il faut extraire plus de minerai, faire de plus grandes mines, donc produire plus de déchets miniers et pomper une plus grande quantité d'eau, utiliser souvent plus d'intrants et plus d'eau lors de la phase de traitement puisque celui-ci est moins aisé, et donc dépenser plus d'énergie. Cette baisse de teneurs est donc à son tour à l'origine de l'augmentation des impacts environnementaux de l'extraction des métaux (G. M. Mudd, 2007b; Gavin M. Mudd, 2012; Prior et al., 2012).

De plus, cette question de l'épuisement des métaux est une problématique émergente dans les indicateurs de soutenabilité existants. En effet, au sein de la recherche en analyse de cycle de vie - méthode reconnue et très usitée dans un objectif de développement durable permettant une évaluation normalisée afin de réaliser un bilan environnemental multicritère d'un système sur l'ensemble de son cycle de vie - la prise en compte de l'épuisement est relativement récente et est toujours débattue (N. Adibi, Lafhaj, Yehya, & Payet, 2017; De Bruille, 2014; Yellishetty, Ranjith, Tharumarajah, & Bhosale, 2009) : données partielles, différentes définitions de l'épuisement utilisées, pas de prise en compte des potentialités de recyclage des métaux, etc. De même, du côté des sciences économiques, l'approche majoritairement utilisée pour rendre compte des impacts sociaux et surtout environnementaux, soit l'évaluation des externalités, a peu été utilisée pour prendre en compte les impacts de l'extraction des métaux (Gérand, Dubosc, & Pochat, 2018), et pas du tout sur la question de l'épuisement (comme nous le verrons dans le chapitre 2).

Le faible nombre de propositions dans ce domaine, le manque de définition commune de ce qui est entendu par « épuisement », et la centralité de cette question dans une approche de durabilité des filières de matières premières minérales ont conduit à orienter plus spécifiquement la thèse sur l'épuisement. L'objet de cette recherche peut donc être précisé comme la mise au point d'une méthode intégrée d'analyse des coûts sociaux et environnementaux de l'épuisement dans les filières métalliques. Ainsi, la thèse vise à contribuer à la fois au renforcement du cadre méthodologique des coûts sociétaux développé par le Basic, mais aussi à la recherche émergente sur la prise en compte de l'épuisement dans la mise au point d'indicateurs de soutenabilité.

[2] Le terme de « gisements primaires » est ici utilisé pour qualifier les gisements du sous-sol, par opposition aux gisements secondaires qui sont les déchets pouvant faire l'objet d'un recyclage.

Approche et orientation

La thèse se situe, par construction, dans une approche résolument transdisciplinaire. En effet, le point de départ de la thèse est la méthodologie mise au point par le Basic qui croise une approche issue des sciences de gestion, soit l'analyse des chaînes globales de valeurs (CGV), mobilisée pour comprendre l'influence de l'organisation des filières mondialisées dans les impacts sociaux et environnementaux, et une approche issue des sciences économiques, celle des coûts sociaux, telle que développée par Karl William Kapp, qui s'intéresse aux coûts liés aux dommages sociaux et environnementaux inhérents à notre système économique.

Or, l'approche de Kapp, à la croisée de l'économie institutionnelle (au sens de la première école institutionnaliste) et de ce qui est aujourd'hui l'approche de l'économie écologique, est elle-même une approche transdisciplinaire qui s'intéresse à l'interaction de plusieurs variables, tant « économiques que non-économiques » (W. Kapp, 1963), dont les effets combinés mènent à l'apparition des coûts sociétaux. La démarche de Kapp a pour ambition de faire le lien entre des considérations économiques abordées avec une approche institutionnelle et « ouverte » (interrelations changeantes, approche dynamique, etc.) et la prise en compte d'autres savoirs, notamment issus des sciences naturelles (S. Berger, 2017), comme le phénomène d'épuisement auquel s'intéresse la thèse. Pour cela Kapp adopte « une approche intégrée et transdisciplinaire » telle que pensée dans l'approche en système ouvert.

L'approche des systèmes ouverts[3] (Chick & Dow, 2005) permet selon nous la prise en compte des interactions entre différents phénomènes, dont l'étude dépend de champs de la connaissance différents, sans pour autant réduire leur portée. Par exemple, dans le cas de la prise en compte de l'épuisement, il s'agit de voir en quoi ce phénomène a un impact et est impacté par des phénomènes socio-économiques complexes, et non pas de réduire l'approche socio-économique de l'épuisement à sa seule dimension biophysique. À l'inverse, la démarche ne se réduit pas à l'impact « strictement » économique de l'épuisement, mais prend en compte les effets de cet épuisement sur la société et l'environnement, effets dont l'étude dépend d'autres champs de la connaissance. Dit autrement, il s'agit autant d'éviter l'écueil de penser l'économie comme un système fermé en dehors de toute interaction, que d'une réduction de l'économie à des considérations biophysiques, ce que Nicolas Postel nomme le « réductionnisme biologique »[4] (Postel, 2007).

Enfin, la thèse s'ancre dans une approche de soutenabilité forte, qui est l'approche dominante en économie écologique. En effet, au sein des différentes approches du développement durable, sont distinguées deux approches principales : soutenabilité forte et faible. L'approche de la soutenabilité forte considère que les types de capitaux ne sont pas substituables entre eux, c'est-à-dire que le capital manufacturé ou humain ne peut pas venir pallier les dommages portés à l'environnement ou la réduction des stocks de ressources naturelles. Il s'agit donc de préserver ces ressources en quantité suffisante pour assurer des conditions de vie soutenables. Cette approche s'oppose donc à

[3] Il existe plusieurs approches des systèmes ouverts. Il est fait référence ici à l'approche de (Chick et Dow, 2005), qui met l'accent sur la compréhension des systèmes sociaux comme ouverts et dynamiques, mais structurés par des institutions, des habitudes, etc. Cette approche se distingue de celles des réalistes critiques qui rejettent la notion même de limites des systèmes posées comme moyen de construire des théories, ou même d'utiliser des modèles comme outil de théorisation.

[4] « Les institutionnalistes ont toujours refusé d'appliquer une méthodologie mécaniste aux sciences économiques, évitant par-là tout monisme méthodologique, et toute mécanisation de l'espace social. Il serait bien regrettable que leur mouvement les envoie finalement vers une autre forme de réductionnisme, le réductionnisme biologique, qui réduit toute action humaine à des pulsions et instincts physiquement identifiables » (Postel, 2007).

celle de la soutenabilité dite faible qui considère que les capitaux sont substituables et qui accorde une importance première au maintien du stock agrégé de capital.

Problématique

La thèse qui est défendue est que l'épuisement des ressources métalliques, au-delà de la question des limites économiques de l'exploitation, est un démultiplicateur des coûts sociaux et environnementaux générés par nos modes de production et de consommation actuels.

La recherche vise à explorer les liens entre épuisement, augmentation des coûts sociaux et environnementaux de l'exploitation, et influence des filières mondialisées sur l'apparition de ces coûts. La problématique de cette recherche peut être ainsi formulée :

Comment évaluer et prendre en charge les coûts sociaux et environnementaux liés à l'épuisement dans les filières d'exploitation des métaux dans une approche de soutenabilité forte ?

Cette problématique générale se décline en deux parties.

Tout d'abord, une partie théorique visant à contribuer à définir l'épuisement des métaux dans une perspective de soutenabilité forte et à formaliser un cadre d'évaluation des coûts sociaux cohérent avec cette définition.

Puis, une partie empirique et méthodologique qui applique les définitions et le cadre d'évaluation mis au point au cas d'étude de la chaîne du néodyme utilisé dans les aimants néodyme-fer bore (Nd-Fe-B).

Plan de la thèse

Une première partie, regroupant le premier et deuxième chapitre, a pour objectif de contribuer à définir l'épuisement des métaux dans une perspective de soutenabilité forte et à formaliser un cadre d'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement cohérent avec cette définition.

Le premier chapitre propose une redéfinition du concept d'épuisement pour pouvoir prendre en compte les enjeux sociaux et environnementaux dans une perspective de soutenabilité forte. Pour cela le chapitre s'appuie sur une revue du concept d'épuisement tel que développé dans les sciences économiques, et en particulier dans l'approche de l'école néoclassique (ENC). Cette définition mérite d'être développée, car elle est reprise par la plupart des approches étudiant la durabilité de la production et de la consommation des ressources minérales. Le chapitre 1 expose donc le concept d'épuisement tel que développé dans la théorie néoclassique et explique pourquoi celui-ci ne permet pas de rendre compte des impacts liés à la diminution de la qualité des ressources. Ainsi, ce chapitre fait une revue historique de la problématique de l'épuisement des ressources en science économique, détaille les angles morts de ces approches, et les caractéristiques spécifiques de l'épuisement des métaux. Ce chapitre propose en conclusion une définition de l'épuisement prenant en compte le caractère continu du phénomène et les impacts sociaux et environnementaux qui lui sont associés.

Le second chapitre passe en revue l'évolution de la prise en compte des coûts sociaux des activités de production en économie et en quoi ils ont été appliqués ou non au phénomène d'épuisement tel que décrit dans la première partie. La définition du coût social de l'épuisement des ressources métalliques est précisée. Il est proposé d'analyser cet épuisement via l'approche des coûts sociaux telle que développée par K.W.Kapp. Cette théorie définit les coûts sociaux comme l'« ensemble des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble » générés par « les modes de production » et de consommation, dont les acteurs privés « ne sont pas tenus responsables » et qui « auraient pu être évités » (W. Kapp, 1963). Ce chapitre s'applique à adapter cette approche à l'analyse de l'épuisement à l'échelle des chaînes globales de

valeur. Il est ensuite précisé les principaux types de coûts sociaux étudiés : les dépenses publiques liées à la prévention de l'impact économique de l'épuisement, les « déséconomies »[5], et les coûts liés à la démultiplication des impacts sociaux et environnementaux. La démarche générale d'évaluation construite à partir de la structure d'argumentation de Kapp est proposée. Enfin, le chapitre expose les méthodes existant à ce jour pour évaluer le phénomène d'épuisement des ressources et les coûts sociaux associés à cet épuisement. La pertinence de ces méthodologies au regard des problématiques soulevées dans le chapitre 1 est discutée et selon les cas il est proposé d'utiliser les méthodologies existantes, de les étendre ou de les compléter, ou de proposer de nouvelles méthodes d'évaluation.

La deuxième partie, constituée du chapitre 3, est un cas d'étude visant à appliquer l'approche d'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement. Il s'agit de montrer les apports d'un point de vue social et écologique de l'analyse de l'épuisement par les coûts sociaux. Ainsi, le troisième chapitre décrit l'application de cette méthode au cas d'étude d'un métal ayant une importance économique particulière dans les nouvelles technologies (disques durs, haut-parleurs miniaturisés, etc.) et certaines technologies dites « vertes » (éoliennes offshore, moteurs de voitures électriques): le néodyme utilisé dans les aimants Nd-Fe-B. L'étude se fait depuis l'extraction du métal en Chine jusqu'à la fabrication des aimants en Chine et au Japon, et aborde la question du recyclage en Europe. Le néodyme a été choisi, car le paradoxe entre une utilisation du néodyme pour lutter contre l'épuisement des ressources fossiles et le changement climatique, et les nouveaux impacts et phénomènes d'épuisement induits par l'exploitation de cette ressource, apparaît particulièrement intéressant. Cependant, aucune comparaison ne sera faite avec la production des énergies fossiles puisque l'objectif de la présente étude n'est pas de remettre en question la pertinence de la transition énergétique, mais bien de documenter les effets de l'épuisement afin de se prémunir des coûts sociaux qu'ils peuvent engendrer. Cette étude permet de décrire les enjeux des systèmes de production liés au développement des économies vertes et de comparer les coûts sociaux liés à l'approvisionnement minier et ceux issus du recyclage.

[5] Kapp définit les déséconomies comme suit : « une approche institutionnelle du problème de l'utilisation des ressources non renouvelables révèle l'existence de déséconomies substantielles dans le sens d'un gaspillage techniquement et économiquement évitable que l'exploitation de ces ressources sous le régime de la concurrence rend apparemment inévitable » (Kapp, 1963).

PARTIE 1 : LE COUT SOCIAL DE L'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES MÉTALLIQUES

Introduction de la première partie

Le phénomène de l'épuisement des ressources non renouvelable fait référence à la disparition des stocks « primaires », c'est-à-dire faisant l'objet d'une exploitation minière ou pétrolière. Depuis les années 1950, il a régulièrement été rappelé à l'opinion publique que le rythme accéléré de la croissance économique avait des effets dommageables sur l'environnement, avec un impact mesurable sur la santé publique (Levallois, 2010), et notamment un impact sur l'épuisement des ressources. En effet, la croissance du Produit Intérieur Brut (PIB) a toujours été corrélée avec la consommation de ressources non renouvelables. Les travaux de Krausmann et ses collaborateurs montrent notamment que contrairement à la consommation des ressources agricoles, qui a été dans une certaine mesure découplée de la croissance du PIB, le rapport entre la consommation de ressources minérales et la croissance est resté stable depuis 1870 (Krausmann et al., 2016). Les années 2000 ont marqué un tournant quant à la consommation mondiale des ressources naturelles renouvelables et non renouvelables par point de PIB qui a augmenté (Schandl & West, 2010) pour la première fois depuis les années 1950 (Krausmann et al., 2016).

L'augmentation de cette consommation a soulevé depuis les années 1970 (Meadows, Meadows, Randers, & Behrens, 1972; Solow, 1974) des débats importants sur les réserves restantes des différentes ressources non renouvelables à la suite du premier choc pétrolier. Le débat sur l'épuisement des ressources s'est donc concentré sur les hydrocarbures, bien que des enjeux existent pour les ressources renouvelables et les autres ressources non renouvelables sur ce sujet. Notamment, les ressources métalliques (Bihouix & de Guillebon, 2010) qui sont à la fois non renouvelables et non détruites par leur utilisation, c'est-à-dire potentiellement recyclables, rouvrent le débat sur la capacité de notre système économique à gérer de façon acceptable l'allocation de ces ressources, c'est pourquoi la présente thèse s'intéressera particulièrement au cas des ressources métalliques. Au-delà de la question de la taille des réserves restantes, il a été constaté que les gisements étaient de moins en moins riches (Prior et al., 2012), de moins en moins accessibles et de moindre qualité, et que le recyclage de la plupart des métaux dans les produits en fin de vie était encore anecdotique (Graedel, Allwood, Birat, Buchert, Hagelüken, Reck, Sibley, & Sonnemann, 2011; Grosse, 2011; Guyonnet et al., 2015). Nous montrerons comment certains aspects de l'épuisement ne sont pas pris en compte dans les modèles économiques. En effet, les impacts sociaux et environnementaux des chaînes de valeur, de la mine aux produits de fin de vie, sont massifs et ces impacts peuvent être liés au phénomène d'épuisement : lorsque les ressources diminuent, les impacts environnementaux augmentent (G. M. Mudd, 2007b; Gavin M. Mudd, 2012; Prior et al., 2012), conduisant par conséquent à plus d'impacts sociaux (Muradian et al., 2012; Vallejo, 2010; Vallejo, Rincón, A, & Martinez-Alier, 2011).

Ainsi, dans un premier chapitre, sera exposé en quoi la problématique de l'épuisement des ressources a été abordée en sciences économiques, quels sont les angles morts de ces approches et les caractéristiques spécifiques de l'épuisement des métaux. Cela permettra de proposer une définition de l'épuisement prenant en compte le caractère continu du phénomène et les impacts sociaux et environnementaux qui lui sont associés.

Par ailleurs, la réédition du rapport du club de Rome de 2004 (Meadows, Randers, & Meadows, 2004) à la suite des controverses entamées dans les années 1970 sur la fin des ressources, fait l'hypothèse que les dommages irréversibles causés aux limites planétaires et l'incapacité de l'économie réelle à supporter les coûts sociaux et environnementaux croissants de l'extraction des ressources constituent un problème au moins aussi important. Si la possibilité d'une distribution intergénérationnelle équitable des ressources était déjà remise en question par les tenants d'une soutenabilité forte (Herman E. Daly, 1990; Nicholas Georgescu-Roegen, 1979) ; le fait de considérer l'épuisement des ressources minérales et pétrolières comme un facteur augmentant encore les impacts environnementaux, sociaux et sanitaires de la production est une assertion nouvelle. Il ne s'agit pas uniquement de savoir si les générations futures auront accès à des ressources, mais également de s'assurer du maintien de conditions de vie considérées comme acceptable par les

sociétés qui peut être mis en péril par l'exploitation des dites ressources. Cette affirmation lie donc la question de l'équité intergénérationnelle de la distribution des ressources par le marché (au sens de la possibilité d'une distribution équitable des ressources dans le temps) avec la question de la soutenabilité (au sens des impacts environnementaux et sociaux de la production). Cependant, cette affirmation manque aujourd'hui d'évaluations quantitatives et qualitatives sur lesquelles s'appuyer pour étayer ou rejeter l'importance des dommages liés à la production de ressources métalliques et aux coûts pour la société de ces activités économiques. La thèse se propose de s'appuyer sur le cadre conceptuel développé par Karl William Kapp, dans son ouvrage « Les coûts sociaux de l'entreprise privée » (W. Kapp, 1963), qui se penche notamment sur la question des coûts liés à la production de ressources non renouvelables et reportés par les acteurs économiques sur la société.

Dans un deuxième chapitre, il s'agira donc de passer en revue l'évolution de la prise en compte des coûts sociaux des activités de production en sciences économiques et en quoi ils ont été appliqués ou non au phénomène d'épuisement tel que décrit dans le premier chapitre. La définition du coût social de l'épuisement des ressources métalliques est précisée et un cadre est proposé afin de documenter les coûts sociaux liés à l'épuisement des ressources.

CHAPITRE 1 : REVUE ET DÉFINITION DE L'ÉPUISEMENT DES RESSOURCES MÉTALLIQUES

Introduction du chapitre 1

Ce premier chapitre synthétise les différentes définitions en sciences économiques du phénomène d'épuisement des ressources dans le but de formuler une définition compatible avec une approche de soutenabilité forte. Si la revue qui est faite dans ce chapitre s'attarde particulièrement sur l'approche de l'épuisement des ressources en science économique et particulièrement de l'école néoclassique (ENC), c'est parce que cette définition est reprise par la plupart des approches étudiant la durabilité de la production et de la consommation des ressources minérales comme nous le verrons dans le chapitre 2.

Ce chapitre expose tout d'abord dans la section 1, la conception de l'épuisement des ressources telle qu'elle s'est formée dans le courant dominant des sciences économiques, l'ENC. Cette première section ne fait qu'évoquer les débats sur la soutenabilité de l'économie qui ont été soulevés par d'autres courants de pensée. Il s'agit de voir comment les critiques émises ont conduit l'ENC à expliciter les 3 principaux axes de l'école néoclassique sur la question des ressources : l'optimisation intertemporelle de la valeur d'échange, l'allocation des ressources par un marché corrigé de ses défaillances, la poursuite d'un idéal de progrès technologique et la modélisation de ce progrès.

Ensuite, la section 2 détaille les problématiques spécifiques liées aux ressources métalliques. En effet, alors que certains travaux ayant soulevé la question de la soutenabilité de notre modèle de production et de consommation portaient sur les métaux (Meadows et al., 2004), le débat s'est peu à peu concentré sur les hydrocarbures. Il s'agit donc de se demander en quoi la question de l'épuisement se pose de manière spécifique pour les ressources métalliques et notamment de montrer que le recyclage ne saurait constituer un levier de progrès technologique à même d'accomplir dans son entièreté l'idéal de progrès et de croissance durable des économistes néoclassiques détaillé dans la première section.

Enfin, la section 3 revient sur le traitement de l'ENC de la question de l'épuisement, pour en souligner les limites et les angles morts, dans le cadre d'une approche de soutenabilité forte. L'approche historique de la première section est abandonnée pour exposer les aspects théoriques et les observations de terrains nous permettant de proposer une redéfinition de la question de l'épuisement des ressources qui prenne en compte les interactions entre les sphères biophysique, sociale et économique.

1. L'épuisement des ressources dans l'histoire de la pensée néoclassique et néo-institutionnelle

Cette section ne fait qu'évoquer les débats sur la soutenabilité de l'économie qui ont été soulevés par d'autres courants de pensée, pour mieux se concentrer sur la conception de l'épuisement des ressources dans l'ENC. Ces remises en question seront évoquées plus avant dans la section 3.

Dans ce paragraphe, nous nous appuierons en particulier sur les travaux de Fizaine (Fizaine, 2014), de Gómez-Baggethun et al. (Gómez-Baggethun, de Groot, Lomas, & Montes, 2010) et de Morales Belpaire (Morales Belpaire, 2013). En effet, ces trois revues explicitent avec une approche historique comment l'ENC, puis une partie des économistes de la nouvelle économie institutionnelle, se sont saisis de cette question. Ces trois revues ont été choisies pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elles abordent de manière chronologique et sur la même période de temps, la question de la prise en compte de la base matérielle de l'économie dans l'ENC. Ces trois auteurs font état d'un consensus d'une prise en compte tardive de l'épuisement des ressources dans l'ENC et partage tous les trois l'idée du manque de théorie unifiée sur cette question.

Enfin, il est à noter que le concept de finitude des ressources s'entremêle en économie avec de nombreuses autres questions, comme celle de la possibilité de découpler la croissance économique de l'utilisation croissante de ressources (la question de la dématérialisation), du rapport à la nature tel que conceptualisé dans la société dite « moderne », du caractère spontané du verdissement de l'économie de type *environmental Kuznets curve* (Grossman & Krueger, 1993, 1995), etc. Si ces questions pourront être évoquées dans cette partie, elles n'en constitueront pas le propos central et nous nous concentrerons sur la question de la prise en compte de la finitude des ressources dans la pensée de l'ENC.

1.1. Les débuts de la science économique et l'absence de concept d'épuisement

L'avènement de la première révolution industrielle en Europe est aussi celui de la naissance de l'économie qui « se structure en tant que discipline scientifique […] à la fin du XVIIIème siècle avec le physiocrate François Quesnay (1694-1774) et peu après le classique Adam Smith (1723-1790) » (Boutillier & Matagne, 2016). La question de l'épuisement des ressources naturelles n'est abordée en tant que telle par aucune de ces deux écoles. L'explication à cela peut être que l'« énergie utilisée par l'homme jusqu'au début du XIXème siècle comporte principalement des énergies renouvelables comme la biomasse, le vent et l'énergie animale voire l'énergie humaine dans certaines configurations. Il a fallu attendre la fin du XVIIIème siècle pour voir se répandre les premiers usages des ressources énergétiques épuisables comme le charbon en Angleterre. Du côté des métaux, les premiers usages datés remontent à 15 000 avant J.C. et sont attribués à l'or et au cuivre (Craig, Vaughan, & Skinner, 2001). […] Néanmoins leurs productions restent largement anecdotiques en […regard] des quantités produites aujourd'hui, confinant dès lors la question de l'épuisement à des périodes précises, temporaires et locales. » (Fizaine, 2014).

Pour les physiocrates « l'objectif n'était […] pas de protéger ses ressources parce que l'on craignait qu'elles ne s'épuisent en raison d'une exploitation irraisonnée, mais parce qu'un ennemi est susceptible de les accaparer » (Boutillier & Matagne, 2016). Les physiocrates sont les premiers à parler du lien entre l'économie et la Nature, principalement à travers la question de la création de richesse. Pour les physiocrates, la seule activité qui est créatrice et non transformatrice est « la production agricole, [grâce à] l'énergie du soleil et de la richesse de la terre. Toute autre industrie serait donc stérile au sens où elle ne créerait point de richesse. » (Morales Belpaire, 2013). L'importance des ressources naturelles agricoles est donc soulignée dans les travaux des physiocrates : « sans nature pas d'activité économique. Il y a l'idée sous-jacente qu'une dégradation ou un épuisement de la nature conduirait à la perte de l'économie. » (Fizaine, 2014). C'est en tout cas une assertion qui peut être déduite de la thèse des physiocrates, même si elle n'est pas explicitée : si la terre est seule créatrice de richesse, la dégradation des terres conduirait à la dégradation de la production. Cependant, la question de la dégradation des terres par l'homme ou de la surexploitation des ressources n'est pas abordée telle quelle par les physiocrates qui se préoccupent « davantage [des…] aléas de la nature qui détruisent parfois la quasi-totalité des récoltes (gelée, grêle, inondation, mortalité des bestiaux, etc.). » (Boutillier & Matagne, 2016). A la même époque le théoricien, et administrateur Anne-Robert Jacques Turgot, en partie considéré comme un disciple des physiocrates va jeter les bases de ce qui sera nommé plus tard la théorie des rendements décroissants. Cette théorie peut être résumée ainsi : la production d'une unité supplémentaire de ressource agricole nécessite de plus en plus d'apport en termes de travail et de capital, ou encore, les rendements sont décroissants[6]. A la base de cette théorie, il existe plusieurs

6 Il s'agit bien sûr ici d'une réécriture a posteriori avec un vocabulaire néoclassique des concepts physiocrates et, comme nous le verrons plus tard, de certains propos de Ricardo. Ainsi, ni Turgot, ni Ricardo n'utilisent le mot « rendement », ni le concept de « fonction de production » comme cela est formulé aujourd'hui : « On considère une fonction de production à deux facteurs (travail, capital) du type Q=f(K,L). On appellera rendement décroissant d'un facteur si, pour une variation constante donnée de ce facteur, l'accroissement permis de la production totale tend vers zéro (on considère l'autre facteur comme fixe et ne variant pas). Autrement dit, pour une variation dL=k, dQ1/dL >dQ2/dL. » (Isaac, 2002).

hypothèses dont l'une d'elle a été développée par Turgot : la qualité des terres agricoles est répartie de manière hétérogène dans l'espace. Ainsi pour Turgot, les « dépenses de la culture consistent à donner aux terres les préparations les plus propres à les rendre fécondes. Or, il s'en faut beaucoup que le succès de ces préparations dont dépend la production, soit proportionné à la dépense : […] Si l'on donnait à une terre légère autant de labours qu'à une terre forte, on dépenserait davantage, et peut-être recueillerait-on moins. […] La production suppose des avarices mais des avances égales dans des terres d'une inégale fécondité donnent des productions très-différentes, et c'en est assez pour faire sentir que les productions ne peuvent être exactement proportionnelles aux avances » (Turgot, 1844). Ainsi, pour Turgot l'hétérogénéité des ressources se traduit ainsi : pour une même quantité de travail ou de capital, la même production ne sera pas obtenue selon l'endroit d'exploitation. De plus, Turgot formule l'idée qu'il existe une limite de productivité pour une même parcelle : « La terre a certainement une fécondité bornée, et en la supposant labourée, fumée, marnée, fossoyée, arrosée, sarclée autant qu'elle peut l'être, il est évident que toute dépense ultérieure serait inutile, et que telle augmentation pourrait même devenir nuisible. Dans ce cas, les avances seraient augmentées sans que le produit le fût. Il y a donc un maximum de production qu'il est impossible de passer, et lorsqu'on y est arrivé, les avances non-seulement ne produisent pas 250 pour 100, mais ne produisent absolument rien » (Turgot, 1844). Ainsi, Turgot formule-t-il l'idée de rendements marginaux décroissants sur une même parcelle de terre agricole, et évoque-t-il même la possibilité de rendements absolument décroissants sur une même parcelle à travers la mention de dépense supplémentaire "nuisible".

De manière concomitante à ce mouvement des physiocrates dont l'apogée est marquée par l'œuvre de Quesnay, « Tableau économique » en 1758, d'énormes progrès sont effectués pour améliorer la productivité agricole et diminuer l'impact des aléas climatiques. Ainsi, pour l'historien Paul Bairoch (Bairoch, 1997, p. 317), ce seraient les progrès agricoles importés des Pays-Bas en Angleterre au début du XVIIIème siècle qui auraient initié un « processus cumulatif d'interactions » (Bairoch, 1997, p. 317) avec l'industrie (notamment à travers les besoins sidérurgiques de l'agriculture) et conduit à la révolution industrielle. Pour Morales-Belpaire, « ces progrès diminuent le sentiment de rareté des ressources naturelles. Le goulot d'étranglement dans l'accroissement du bien-être se situe maintenant dans le progrès technique et dans la lutte pour la répartition de la richesse » (Morales Belpaire, 2013). L'intérêt des physiocrates pour la production agricole et la considération de la Nature comme seule productrice de richesse sera donc « vivement contestée par les courants classiques et marginalistes qui voient plutôt dans le travail et le capital la création de valeur d'une économie » (Fizaine, 2014).

Chez les classiques, il n'existe pas non plus de pensée explicite de l'épuisement des ressources dites non renouvelables (voir définition paragraphe 2.1). Cependant, les limites physiques à la croissance de la production font l'objet de certaines préoccupations, principalement « au travers de la question du facteur terre, mais dans une vision étroite et réductrice. » (Fizaine, 2014). Malgré la révolution agricole récente, la peur de manquer de ressources agricoles reste perceptible après « plusieurs siècles de famines, de guerres et d'épidémies » (Boutillier & Matagne, 2016) en Europe, pour les classiques il existe deux solutions pour lutter contre les pénuries : «augmenter les autres facteurs de production (travail et capital) ou accroître la surface productive (cultiver plus de champs, ouvrir d'autres mines) » (Fizaine, 2014). Chez Malthus, c'est le premier facteur qui est étudié (Malthus, 1798). L'augmentation de la main d'œuvre sur une surface limitée de terres agricoles n'est pas suffisante pour pouvoir subvenir à l'augmentation des besoins liés à l'augmentation de la population. Ce qui conduira à des catastrophes (famines, etc.). C'est pourquoi ses théories ont été qualifiées de *dismal science* ou science lugubre notamment par l'historien victorien Thomas Carlyle en 1848 (Fizaine, 2014; Morales Belpaire, 2013). Chez Ricardo, c'est le deuxième facteur qui est étudié : ses préoccupations concernent la quantité limitée et la qualité hétérogène de terres arables disponibles. Ainsi, Ricardo est-il également un contributeur de la théorie des rendements décroissants, à la suite de Turgot. En effet, en plus de considérer la qualité des terres comme hétérogène, Ricardo émet également l'hypothèse que les meilleures terres sont utilisées en priorité,

ce qui conduit à formuler l'idée de rendements décroissants au cours du temps (Fizaine, 2014; Gómez-Baggethun et al., 2010; Morales Belpaire, 2013). Ricardo développe cette idée dans sa théorie de la rente, définie comme « cette portion du produit de la terre que l'on paie au propriétaire pour avoir le droit d'exploiter les facultés productives et impérissables du sol » (Ricardo, 1817, Chapitre 2). Pour lui, l'existence d'une rente s'explique par la qualité hétérogène et l'appauvrissement des sols aux cours du temps : « Si la terre jouissait partout des mêmes propriétés, si son étendue était sans bornes, et sa qualité uniforme, on ne pourrait rien exiger pour le droit de la cultiver […]. Dès que par suite des progrès de la société on se livre à la culture des terrains de fertilité secondaire, la rente commence pour ceux des premiers, et le taux de cette rente dépend de la différence dans la qualité respective des deux espèces de terre. […À] l'époque où les terrains sont le plus fertiles, le plus abondants, le plus productifs, ils ne donnent point de rente ; et ce n'est qu'au moment où ils s'appauvrissent, - le même travail donnant moins de produit, - qu'on détache une partie du produit primitif des terrains de premier ordre, pour le paiement de la rente » (Ricardo, 1817, Chapitre 2). Selon Ricardo, ces rendements décroissants conduisent à un état stationnaire de l'économie, dans lequel la production n'augmenterait plus (Morales Belpaire, 2013), et c'est cette conclusion qui sera rejetée par le mouvement néoclassique comme cela sera souligné dans le paragraphe 1.3. Cependant, la principale préoccupation de Ricardo dans sa théorie de la rente (et donc des rendements décroissants) est liée à la répartition du produit national entre ouvriers (salaires), propriétaires de terres agricoles (rente) et capitalistes (profits) : « C'est d'après la répartition du produit total d'une exploitation agricole entre le propriétaire, le capitaliste, l'ouvrier, que l'on juge de l'accroissement ou de la diminution de la rente, des profits et des salaires : ce n'est pas, ce ne saurait être d'après la valeur qu'aurait ce produit si on le comparait à une mesure type, reconnue variable, mobile, inconstante. » (Ricardo, 1817, p. 33). Pour lui le problème est que la part de la rente dans le produit grandit au fur et à mesure que les rendements agricoles décroissent. Ce phénomène profite donc aux propriétaires fonciers au détriment des ouvriers et des capitalistes : «l'augmentation portera sur cette partie du revenu qui appartient aux propriétaires fonciers et aux ouvriers : ils obtiendront plus que le produit additionnel, et par leur position ils pourront même empiéter sur les profits antérieurs du capitaliste. […] Chaque ouvrier recevra plus d'argent ; mais sa condition, comme nous l'avons déjà montré, sera moins heureuse, en ce qu'il ne pourra plus se procurer qu'une moindre quantité des produits nationaux. Les propriétaires gagneront à cet état de choses ; ils recevront de plus fortes rentes, d'abord parce que les produits auront plus de valeur, et ensuite parce qu'ils recevront une plus grande quantité de ces produits [... . L]orsqu'on commence à défricher des terrains peu fertiles, ou lorsque plus de capital et de travail sont consacrés aux vieux terrains avec un moindre retour de produits, cet effet est alors permanent ».

En ce qui concerne les ressources minières, Ricardo fait le même constat de l'hétérogénéité de la ressource : « les mines sont de qualité différente, et, avec la même quantité de travail, chacune donne un résultat différent » (Ricardo, 1817, Chapitre 3). Cependant, il n'applique pas le raisonnement de rendements décroissants, car il ne fait pas l'hypothèse que les meilleures ressources sont exploitées en premier et les moins bonnes ensuite. Un élément d'explication à cela vient du fait que Ricardo écrit son ouvrage après une longue période de « découverte » de ressources minières de qualité exceptionnelle notamment des mines d'or et d'argent exploitées lors de la colonisation espagnole sur le continent américain[7] : la « découverte de l'Amérique, et celle des riches

[7] La chercheuse Marie Helmer, qui a étudié l'histoire de Potosi, un des plus grands gisements d'argent qui ait été découvert, établit la chronologie suivante en s'intéressant à la production de cet argent : « Il est certain que le sommet du rendement a été atteint vers 1580 […]. Stationnaire un temps, elle amorce un déclin vers 1619 et semble baisser constamment pendant les XVIIème et XVIIIème siècles, tandis que les mines mexicaines prennent leur essor, sans toutefois jamais s'arrêter complètement" (Helmer, 1956, p. 347). Bien plus récemment Desaulty et al. ont pu établir la chronologie de production, et de mise en circulation en Europe de ces métaux précieux à travers une étude de la composition isotopique de la monnaie (Desaulty, Telouk, Albalat, & Albarède, 2011). Ils estiment à 300 tonnes la production annuelle d'argent exploité dans « les Amériques espagnoles » du XVIème au XVIIIème siècle et confirment un début de l'expansion de la production minière des Amériques au milieu du XVIème siècle, puis l'essor de l'argent mexicain qui devient dominant dans

mines qu'elle renferme, produisit un effet remarquable sur le prix naturel des métaux précieux. » (Ricardo, 1817, Chapitre 3).

Enfin, John Stuart Mill développe le concept d'état stationnaire introduit par Ricardo. Il introduit également pour la première fois dans *Principles of Political Economy* (1848), une différence entre l'activité minière et l'activité agricole. « Mill adhère à la thèse de Ricardo selon laquelle on recourt de plus en plus à des ressources inférieures (rendements moindres), mais il accepte que cette tendance puisse être interrompue ponctuellement par la découverte de nouvelles mines plus efficaces. Cette différence s'explique par l'antagonisme entre production future et production présente dans le cas de la mine. Mill marque ainsi les prémisses de l'analyse d'optimisation intertemporelle néoclassique qui naîtra au début du XXème siècle. La pensée de Mill traduit aussi la présence d'un état stationnaire inéluctable, mais à l'inverse de Ricardo et Smith, l'auteur se félicite de cette issue qui permettra aux individus de se détourner de l'accumulation des richesses au profit d'autres activités comme l'art, l'éducation, le sport ou la religion » (Fizaine, 2014).

Il a donc été vu qu'une première définition d'un problème lié à l'épuisement des ressources fait jour à travers la question de l'hétérogénéité des ressources agricoles et la théorie des rendements décroissants pensée par Turgot et Ricardo. Pour Ricardo, le principal problème lié aux rendements décroissants est la part croissante que va prendre la rente des propriétaires au détriment des salaires des ouvriers et des profits des capitalistes. Dans le paragraphe suivant, il sera montré que la pensée néoclassique s'est focalisée sur la question de l'état stationnaire de la production dans le travail des classiques. Pour Fizaine, il existe un « paradoxe dans l'économie classique qui bien qu'elle ne perçoive plus la nature comme la source de la création de la valeur (désormais attribuée au travail et au capital) ressasse la sempiternelle menace de l'état stationnaire au travers des rendements décroissants affectant la production des ressources naturelles.» (Fizaine, 2014).

1.2.Le marginalisme et l'épuisement

Si les physiocrates et les classiques ont en commun une certaine préoccupation concernant les ressources agricoles, aucun des deux mouvements ne théorise un risque d'épuisement du stock des ressources non renouvelables. Nous verrons au paragraphe suivant que la question de la finitude des ressources, et des outils économiques permettant de la prendre en compte, est réellement devenue un objet de débat à partir de la fin des années 1960. Cependant, certains travaux économiques se sont intéressés à la question de l'épuisement avant cela (Hotelling, 1931; W. S. Jevons, 1906; Zimmermann, 1933) et deviendront les bases théoriques de son traitement par l'école néoclassique. Ce paragraphe présente leurs travaux, ainsi que la formation du courant que constitue l'ENC.

En 1865, dans le livre *The coal question*, William Stanley Jevons effectue la première tentative de modélisation de la déplétion d'une ressource (William Stanley Jevons, 1866) et traite de la question de l'épuisement à travers le principe des rendements décroissants. Il est important de souligner que pour Jevons, il n'y a pas de problème lié au caractère fini du stock de ressource, ce qu'il annonce dès la préface de son ouvrage : « *It is almost needless to say […] that our mines are literally inexhaustible* » (Preface, William Stanley Jevons, 1866). Cependant, il existe bien pour lui un problème d'épuisement des ressources, la qualité des ressources baissant au fur et à mesure de l'exploitation, la production du charbon devient de plus en plus coûteuse : « En bref, les couches de charbon les plus épaisses payent les dépenses générales de la mine, en plus du coût de leur propre exploitation, de ce fait il suffit que l'exploitation des couches les plus fines de charbon ne dégage qu'un petit profit. Mais il faudrait que le prix du charbon augmente à un niveau tout à fait extrême pour que l'exploitation des couches de charbon non encore exploitées [en Grande-Bretagne] puisse couvrir les dépenses générales liées au drainage, à la ventilation et à la maintenance en plus du coût de la taille elle-même. La même considération est vraie à l'égard des masses immenses de charbon

la production monétaire espagnole au XVIIIème siècle. Au moment de l'écriture de l'ouvrage de Ricardo, l'Europe vient donc de vivre trois siècles d'abondance d'imports de métaux précieux.

laissées dans le sous-sol lors des exploitations précédentes [...]. Il est difficile de se représenter comment cela [l'exploitation de ressource de qualité inférieure] pourrait empêcher les maux liés à l'épuisement des ressources. Tout comme l'usage des haveuses à disque n'affectera que peu cette question. » (traduit de William Stanley Jevons, 1866, p. 71-72). Jevons applique donc un raisonnement similaire à celui de Ricardo sur les ressources agricoles aux ressources minières : le capital et le travail nécessaires pour exploiter des couches de charbon de plus en plus profondes et de moins en moins épaisses sont de plus en plus élevés. Cependant, il existe quelques différences avec les considérations de Ricardo et de Turgot concernant les ressources agricoles. Tout d'abord les coûts en capitaux liés à la mise en production de ressources de moindre qualité peuvent être tels que la mise en production n'est économiquement pas possible, cas qui n'est pas envisagé par Ricardo. Cela découle d'une différence de conception de la valeur comme cela sera évoqué plus loin, mais également du fait que le capital à investir sur l'exploitation des ressources agricoles et minières de moindre qualité n'a rien de comparable. De plus, contrairement au cas des ressources agricoles où la production des terres fertiles continue quand les terres de moindre qualité sont mises en production, la production des nouvelles couches de charbon exploitées n'est pas nécessairement concomitante de l'exploitation d'anciennes couches de charbon de meilleures qualités, puisque les ressources sont non renouvelables. Si le charbon de moindre qualité est exploité après celui de bonne qualité, les rendements ne sont pas marginalement décroissants quand la qualité décroit, ils sont absolument décroissants. Si les ressources sont infinies, que les coûts de production augmentent de manière absolue au fur et à mesure de l'exploitation, le problème de l'épuisement correspond donc au moment où les acheteurs (en l'occurrence l'industrie) refusent de payer un prix permettant de couvrir les coûts de l'exploitation et d'en dégager un profit. Jevons en conclut que la déplétion finira par rendre le charbon tellement cher que l'industrie britannique ne pourra plus se permettre de l'extraire et la production commencera à baisser. Une des principales préoccupation lié à la baisse de la production étant la question de la dépendance de l'industrie britannique à d'autres nations (William Stanley Jevons, 1866, p. 74). Un siècle plus tard, le géologue M.K. Hubbert (Hubbert, 1956) prévoyait que la production de pétrole aux Etats-Unis dans les années 1970 suivrait une courbe de Gauss, courbe qui serait cohérente avec le principe des rendements décroissants de Jevons. C'est ainsi qu'est né le concept de ce qui a été renommé plus tard le « pic pétrolier » (Bardi, 2015).

Un autre apport de Stanley Jevons à la question de l'épuisement est le « paradoxe de Jevons », récemment « redécouvert » en tant qu'effet rebond. Ce paradoxe souligne que les gains d'efficience énergétique augmentent en réalité la consommation totale de ressources énergétiques (Gómez-Baggethun et al., 2010). Ainsi, pour Jevons : "*It is wholly a confusion of ideas, to suppose that the economical use of fuel is equivalent to a diminished consumption. The very contrary is the truth. As a rule, new modes of economy will lead to an increase of consumption according to a principle recognised in many parallel instances […]. The same principles apply, with even greater force and distinctness, to the use of such a general agent as coal. It is the very economy of its use which leads to its extensive consumption […] Nor is it difficult to see how this paradox arises […] If the quantity of coal used in a blast-furnace, for instance, be diminished in comparison with the yield, the profits of the trade will increase, new capital will be attracted, the price of pig-iron will fall, but the demand for it increase; and eventually the greater number of furnaces will more than make up for the diminished consumption of each. And if such is not always the result within a single branch, it must be remembered that the progress of any branch of manufacture excites a new activity in most other branches, and leads indirectly, if not directly, to increased inroads upon our seams of coal […] Civilization, says Baron Liebig, is the economy of power, and our power is coal. It is the very economy of the use of coal that makes our industry what it is; and the more we render it efficient and economical, the more will our industry thrive, and our works of civilisation grow* » (W. S. Jevons, 1865).

Jevons a également participé à créer le marginalisme, un courant de pensée en économie qui a contribué à la fondation de l'école néoclassique (ENC), qui deviendra l'école dominante au cours du XXème siècle.

Les fondements de la pensée néoclassique déclinés en trois axes permettent d'éclairer les débats sur l'épuisement du XXème siècle.

Ainsi, un premier trait du marginalisme ou de la pensée néoclassique est l'assimilation du concept de valeur économique à celui de valeur d'usage, ce qui conditionnera la perception d'une ressource à la question de ses usages. Chez les classiques, même s'il existe des variations de conception, la valeur d'un bien est la valeur du travail nécessaire pour fournir ce bien (théorie de la valeur travail) (Boutillier & Matagne, 2016). Pour les marginalistes la valeur d'un bien dépend de son utilité marginale, c'est-à-dire de l'utilité qu'un agent économique tirera de la consommation d'une unité supplémentaire. Cette utilité marginale décroît avec la quantité de biens déjà disponibles (phénomène de satiété). Ainsi, ces conceptions différentes de la valeur éclairent en partie les conclusions différentes qui sont tirés des rendements décroissants. Pour Ricardo il « est […] exact de dire, ainsi que Smith l'avait avancé auparavant, « que les quantités proportionnelles de travail nécessaires pour obtenir chaque objet, paraissant offrir la seule donnée qui puisse conduire à poser une règle pour l'échange des uns contre les autres » ; ou, en d'autres mots, que c'est la quantité comparative de denrées que le travail peut produire, qui détermine leur valeur relative présente ou passé » (Ricardo, 1817, Chapitre 1)**.** Cependant, au début du XXème siècle va avoir lieu une « révolution » de la théorie de la valeur (Schumpeter, 1954, p. 796). Elle est initiée vers 1870 avec le courant marginaliste par des auteurs comme Jevons, mais aussi Menger et Walras. Jevons « estime que la valeur d'un bien ne provient pas des facteurs qui interviennent dans sa fabrication, mais plutôt du plaisir subjectif qu'en tire un agent lors de sa consommation » (Morales Belpaire, 2013). Comme cela a été évoqué dans le paragraphe précédent, la préoccupation de Ricardo est liée à la place grandissante de la part de la rente au détriment des salaires et des profits liés aux rendements décroissants : Ricardo se focalise sur les conditions de la production. En revanche, pour Jevons la question est de savoir quel prix les industries consommatrices sont prêtes à payer pour un charbon de plus en plus coûteux : le raisonnement est focalisé sur la demande. Avec cette façon de considérer la valeur d'un bien ou d'une ressource, nulle ressource n'a de valeur intrinsèque, elle n'a de valeur qu'à travers l'usage qui en est fait. Cette révolution de la valeur aura des effets profonds sur la prise en compte de la nature en économie. En effet, à partir des marginalistes, l'ENC restreint petit à petit son analyse à la question des valeurs d'échange (Gómez-Baggethun et al., 2010), et c'est dans cette perspective que Pigou analysera les impacts environnementaux de l'économie dans les années 1920 à travers le concept d'externalités comme nous le verrons dans le chapitre 2. Cela participe à expliquer pourquoi l'ENC se focalise sur l'usage des ressources naturelles (théorie de la valeur utilité) et non sur la conservation des ressources naturelles pour elles-mêmes : pour l'ENC, ancrée dans une vision utilitariste, les ressources n'ont pas de valeur économique en elles-mêmes.

Le deuxième pilier est la volonté d'objectivation des choix économiques, grâce à l'individualisme méthodologique, faisant du marché l'outil privilégié d'allocation des ressources. Alexandre Rambaud souligne dans sa thèse (Rambaud, 2015), en s'appuyant sur les travaux de Bruno Latour que la dichotomie entre les notions d'objectivité et de subjectivité sera déterminante dans la théorisation du capitalisme par les économistes classiques, puis néoclassiques. Ainsi, pour l'approche néoclassique il s'agit d'opérer une « Objectivation systématique » (Rambaud, 2015, p. 133), ce qui va donner naissance à l'individualisme méthodologique. En effet, pour les néoclassiques cette objectivation « nécessite que les préférences et valeurs soient renvoyées au domaine privé et dès lors prises comme données. Cette abstraction par rapport aux jugements de valeur fait des mathématiques l'outil d'expression privilégié des économistes [néoclassiques], au sens où elles les rapprochent de leur idéal de scientificité. » (Morales Belpaire, 2013). Cela est rendu possible avec la naissance de l'école marginaliste dont le cœur de l'analyse repose sur le calcul différentiel mathématique. C'est avec le marginalisme que « l'économie néoclassique opère concrètement la fusion entre la théorisation économique […] et le formalisme des mathématiques» (Annexe A.2.2. Rambaud, 2015, p. 77). L'outil privilégié pour accorder les différentes préférences individuelles reste bien entendu le marché dans la lignée des économistes classiques libéraux. L'individualisme méthodologique sera vivement contesté notamment quant à son efficience pour lutter contre les

problématiques environnementales, ou pour la question de l'épuisement des ressources comme nous le verrons plus loin.

Enfin, la volonté de réhabilitation du « Progrès » est le troisième pilier sous-tendant les travaux de l'ENC et conduira à faire de l'innovation technique une composante incontournable des travaux néoclassiques sur l'épuisement. En effet pour Rambaud, l'ENC est issue d'une volonté de réhabilitation d'un idéal de Modernité suite à ce qui est considéré comme un échec théorique des classiques : « les classiques échouent finalement à rendre compte de l'« esprit du Capitalisme » pour plusieurs raisons […]. Tout d'abord, ils ne parviennent pas à intégrer la notion de Progrès Moderne ; […]. Le premier « échec » se décline notamment de deux façons : par l'argumentation d'une convergence de l'économie vers un état stationnaire et la non-prise en compte de la force de la Technique comme moteur du Progrès. » (Annexe A.2.2. Rambaud, 2015, p. 69). Les écrits de Jevons sur la question du charbon attestent de ce qu'il considère comme un échec des classiques, ainsi dès l'épigraphe Jevons cite Adam Smith pour critiquer l'état stationnaire : « *the progressive state is in reality the cheerful and the hearty state to all the different orders of the society : the stationary is dull ; the declining melancholy* » (Adam Smith in W. S. Jevons, 1865). Face à cela, le « souci néoclassique est […de] : réimposer la notion de Progrès […], Léon Walras expliquait que : « grâce à la substitution du système des cultures alternées au système de la jachère, grâce à l'emploi des engrais […], de machines […], un hectare de terre peut produire annuellement un nombre de plus en plus grand d'hectolitres de blé. Et, généralement, on peut, dans la confection des produits et des capitaux neufs, faire entrer des quantités de plus en plus faibles de rente de terres, à la condition d'y faire entrer des quantités de plus en plus fortes de profit de capitaux proprement dits. De là la possibilité du progrès indéfini » (Walras, 1874). Il conteste donc clairement la théorie de la rente de Ricardo que nous avons vu précédemment, en avançant que les rendements décroissants peuvent être évités grâce aux progrès technologiques, assurés par l'investissement des produits du capital. S'articulent ainsi Technique […] et Progrès» (Annexe A.2.2. Rambaud, 2015, p. 72). L'idée que les ressources peuvent être remplacées par du capital est donc présente dès les écrits marginalistes et réside dans une croyance dans le Progrès.

Il a donc été montré ici que le principal apport du marginalisme sur la question de l'épuisement se situe dans les travaux de Jevons (W. S. Jevons, 1865) qui définit le problème de l'épuisement comme le point de tension entre l'offre et la demande, point de tension qui correspond au moment où les coûts d'exploitation ont augmenté de manière telle, du fait de la baisse de qualité des ressources, que le prix de la ressource est trop élevé pour les industries consommatrices. Cette définition de l'épuisement est liée à la révolution du concept de valeur qui est opéré par le courant marginaliste, focalisé sur le consentement à payer et non sur la « valeur travail » du produit comme c'était le cas chez Ricardo, et pour l'ensemble des économistes classiques.

1.3. La réponse néoclassique au mouvement conservationniste : le concept d'efficience intergénérationnelle

Les travaux précurseurs sur la question de l'épuisement comme ceux de Jevons n'ont pas trouvé un très grand écho de leur temps. En effet, « la déplétion était une perspective lointaine, cette problématique a été mise de côté et n'a été étudiée à nouveau qu'après la Première Guerre mondiale, moment où la disponibilité des substances minérales utiles s'est muée en question stratégique fondamentale» (Bardi, 2015, p. 254). C'est à ce moment-là que vont émerger les travaux d'Hotelling. Pour Fizaine et Tilton (Fizaine, 2014; Tilton, 2003) les travaux d'Hotelling se font en réaction à un mouvement en faveur de la conservation de la nature qui a lieu au même moment. « Ces auteurs [dont Hotelling] contemporains de la mise sous tutelle de plusieurs types de ressources naturelles par l'Etat sous l'impulsion du mouvement de conservation s'interrogent sur le bienfondé de telles pratiques. Cette influence du mouvement de conservation est très claire dans l'article de Hotelling (1931, p.137) : « *Contemplation of the world's disappearing supplies of minerals, forests, and other exhaustible assets has led to demands for regulation of their exploitation. The feeling that these products are now too cheap for the good of future generation, that they are being selfishly*

exploited at too rapid rate and consumed wastefully has given rise to the conservation movement.» » (Fizaine, 2014). En effet, le mouvement de conservation « est un courant ayant émergé et connu son principal essor à la fin du XIX siècle aux Etats-Unis, bien que d'autres idées similaires aient pu être lancées de façon plus précoce en Europe. […] Ce courant est donc l'un des tout premiers à s'intéresser à l'épuisement des ressources naturelles sous un angle non économique. Ce premier courant soulève la difficile question de la gestion et l'équité intergénérationnelle des ressources » (Fizaine, 2014). C'est-à-dire que ce mouvement énonce le problème des ressources laissées aux générations futures et pose les bases des réflexions sur la soutenabilité du système ou du « développement durable » comme cette problématique sera renommée plus tard (avec le rapport Bruntland en 1987 présenté ci-après).

Face à cela « Harold Hotelling [… a] proposé un modèle quantitatif de la déplétion des ressources finies. » (Bardi, 2015, p. 254). Son modèle, portant aujourd'hui le nom de règle d'Hotelling a eu d'importantes répercussions sur la pensée économique (Bardi, 2015), et est essentiel dans le courant néoclassique. Cependant, Hotelling définit la problématique de l'accès aux ressources des générations futures différemment du mouvement de conservation. En effet, ce qui est recherché chez Hotelling c'est l'efficience (et non l'équité) intergénérationnelle de l'allocation des ressources. C'est-à-dire qu'une répartition efficiente de l'allocation des ressources dans le temps, est une répartition qui maximise la valeur présente des bénéfices nets dégagés à partir de l'exploitation des ressources. Pour cela, il s'agit de calculer un optimum privé en estimant « l'espérance de vie économique d'un bien physique et [en escomptant] le flux de profits [futurs] de façon à les ramener à leur valeur actuelle » (W. Kapp, 1963). La valeur présente, chez Hotelling est donc une valeur actualisée ou valeur actuelle nette (VAN). Pour ramener les bénéfices futurs à une valeur présente, un taux d'actualisation est utilisé qui est censé prendre en compte de « la préférence des agents économiques pour le présent », et l'aversion au risque financier. L'actualisation a été développée par « I. Fisher. […] qui rendit possible la concrétisation du calcul en valeur actualisée (I. Fisher, 1930; Hodgson, 2014; Mouck, 1995; Nitzan & Bichler, 2012) » (Rambaud, 2015). Le choix du taux d'actualisation est une variable clé comme cela sera discuté au paragraphe 1.5 et « contient un facteur psychologique complexe, à savoir l'importance subjective que chacun accorde au futur » (Morales Belpaire, 2013).

D'après la règle d'Hotelling (Hotelling, 1931) à mesure que les stocks d'une ressource non renouvelable diminuent, le prix de celle-ci augmente. En effet, dans ce modèle, afin de maintenir leurs revenus dans le temps, les exploitants de la ressource peuvent choisir d'en vendre moins mais plus cher, afin d'accumuler une rente de rareté qui, une fois placée sur les marchés financiers, leur permettra de dégager un revenu régulier et de financer les investissements nécessaires au développement de produits de substitution (Gadrey & Lalucq, 2015). Dit autrement la règle énonce que « le taux de croissance du prix unitaire d'une ressource naturelle non renouvelable (calculé après déduction des coûts d'extraction) doit être égal au taux d'intérêt attendu sur les marchés » (Rambaud, 2015). Hotelling a démontré cela en prenant un certain nombre d'hypothèses fortes, notamment il est parti du principe que le propriétaire disposait d'un contrôle absolu de la ressource et pouvait décider du prix auquel il la mettrait sur le marché. Le propriétaire aura ainsi tendance à augmenter les prix exponentiellement à mesure que la production diminuera. Le modèle montre qu'il faut s'attendre à des problèmes de déplétion dans le futur, mais nous verrons dans le paragraphe suivant que les disciples d'Hotelling font l'hypothèse qu'une ressource de substitution est censée résoudre ce problème.

Au cours des années 1930, l'intérêt des économistes néoclassiques pour la question des ressources a peu à peu diminué. De plus, « L'ENC […] a été très fortement remise en cause après la crise de 1929, et en particulier par les idées innovatrices de John Maynard Keynes (1936). La révolution Keynésienne tient peu compte des problématiques environnementales, voire les ignore complètement.» (Morales Belpaire, 2013). Cependant, une autre école de pensée : les économistes institutionnalistes ont été actifs durant cette période, notamment à travers le travail de John R.

Commons qui publie en 1934 *Institutional Economics* (Crocker, 1999). D'après Crocker, Commons insiste tout d'abord sur le fait que le prix de marché n'est qu'une information parmi d'autres influençant les décisions des agents économiques. Pour Commons au-delà du marché, les institutions, qu'il définit comme *« an institution is defined as collective action in control, liberation and expansion of individual action »* (Commons, 1931), comme la propriété, sont des formes d'interaction sociale et d'expression de la valeur tout aussi valides que le marché. Pour ses raisonnements, Commons s'appuie souvent sur la question de la gestion des ressources (Crocker, 1999). Plus tard, Ciriacy-Wantrup développera la question du rôle des institutions dans la gestion des ressources naturelles et de leur épuisement (S. V. Ciriacy-Wantrup, 1952; S. v. Ciriacy-Wantrup, 1946). Ses travaux seront repris dans les années 1960, notamment par Karl William Kapp, qui reprendra sa critique de la pratique de l'actualisation de la valeur future pour la gestion des ressources, mais aussi sa documentation des phénomènes de pertes dus à la gestion des ressources menée par des propriétaires privés. Ces travaux seront détaillés plus loin dans le chapitre 2.

Enfin, un autre modèle est aujourd'hui couramment utilisé en économie, notamment chez les abondancistes (voir paragraphe 1.7), et a été développé dans les travaux d'un économiste de la même époque qu'Hotelling : Erich Zimmermann (1888-1961). Il a développé le modèle fonctionnel des ressources minérales (Zimmermann, 1933) et a travaillé sur le concept de ressource. Sa vision fournit une base théorique à la pensée «expansionniste» moderne (par opposition aux «déplétionistes» tels qu'Hotelling et Hubbert, qui prévoient un déclin de la production de ressources). Dans le modèle fonctionnel, comme chez Jevons, les ressources les plus rentables sont exploitées les premières et les ressources de moins bonnes qualités ensuite. Zimmermann ajoute que les ressources de moins bonnes qualités sont présentes en plus grandes quantités. Dans son approche, cela produit l'effet inverse de Jevons sur les coûts : lors de la progression vers des ressources de moins bonnes qualités les prix élevés stimulent le développement de nouvelles technologies d'extraction qui font baisser les coûts. Le passage à des ressources de moins bonne qualité provoquerait donc une augmentation des ressources disponibles et une baisse du prix (Bardi, 2015). C'est par exemple le phénomène qui peut être observé aujourd'hui avec le passage à l'exploitation les gaz et pétroles non conventionnels jugé abondants (Agence internationale de l'énergie, 2013).

Ce paragraphe montre donc que face à l'émergence des questions de développement durable à travers la question de l'équité intergénérationnelle dans l'accès aux ressources, la théorie néoclassique définit au début du XXème siècle la question de l'épuisement comme une problématique d'efficience : l'objectif est de maximiser dans le temps la valeur créée par l'exploitation de la ressource. La théorie néoclassique répond aux craintes soulevées quant à la stagnation ou la diminution de la production dans les travaux de Jevons et dans la théorie des rendements décroissants par la création du concept de substituabilité qui émerge dans les travaux d'Hotelling. En effet, pour Hotelling la substitution d'une ressource est toujours possible si la rente dégagée lors de l'exploitation d'une ressource qui se raréfie est investie dans une ressource de remplacement. La question de l'épuisement est donc traitée comme une question de maximisation de la valeur et une question d'investissement.

1.4.À partir des années 1960 : controverse sur l'épuisement

Après la Seconde Guerre mondiale, sous l'impulsion des recherches menées notamment aux Etats-Unis, la théorie néoclassique s'impose peu à peu comme la théorie économique dominante (Légé, 2007) ou théorie standard. A partir des années 1960, l'accès aux ressources pétrolières pose problème, autrement dit, il s'agit d'une « période de rareté relative » (Fizaine, 2014), ce qui va permettre à des théories et des controverses d'émerger sur la question de la prise en compte de l'épuisement. En effet, l'« absence flagrante des ressources naturelles dans les modèles de croissance économiques des années 1950» (Fizaine, 2014), héritée du manque de réflexion sur l'épuisement dans les théories classiques, fait l'objet d'une controverse. Les principaux travaux sur

la question de l'épuisement réalisés avant 1960 (Hotelling, 1931; W. S. Jevons, 1906; Zimmermann, 1933) seront alors remis au goût du jour par les néoclassiques dans le cadre de cette controverse.

Le débat entre déplétionistes et expansionnistes sur l'épuisement prit la forme d'une controverse dans le milieu des années 1960 avec comme principale inquiétude pour les économistes néoclassiques l'impact que pourrait avoir l'épuisement des ressources sur la croissance. Ainsi, « *For economists, a major landmark was the publication of Scarcity and Growth by Harold Barnett and Chandler Morse (1963) […]. This book […] questioned the classical wisdom that natural resources would become scarcer in the course of history and cause diminishing returns. […] Their optimistic thesis was resoundingly challenged by a number of publications on the limits to growth. […] Economists […] began to voice concerns about a looming conflict between economic growth and the environmental system. Kenneth Boulding (1966), for instance, compared the open-system "cowboy economy" to the closed-system "spaceman economy," and Nicholas Georgescu-Roegen (1971) pled for an alternative economic approach based on recognizing the importance of the entropy law. The issue grabbed the headlines of newspapers and magazines when Donella Meadows et al. (1972), using the systems-dynamics approach […] published the first report for the Club of Rome* » (Erreygers, 2009).

Dans le modèle de la consommation des ressources non-renouvelables exposé dans *Limits to Growth* (Meadows et al., 1972), la question de la déplétion est traitée d'après deux modèles différents de consommation des ressources (en s'appuyant sur l'exemple du chrome). Le premier modèle fait état d'une décroissance exponentielle des réserves, due à une croissance exponentielle de la consommation jusqu'à rupture et épuisement du stock. Le deuxième modèle fait état d'une première phase où la ressource est abondante et où la consommation augmente fortement, puis d'une deuxième phase où la ressource se raréfie et la consommation diminue (W. W. Behrens, 1972). Cette baisse de la consommation est justifiée par l'augmentation des coûts : c'est la loi des rendement décroissants de Jevons qui est reprise ici (W. S. Jevons, 1906), même si l'ancrage théorique n'est pas explicité. Celle-ci finit par rendre l'exploitation de la ressource moins rentable et faire baisser la production. Dans le modèle du rapport Meadows, une part des ressources est substituée à mesure que les coûts augmentent, et des progrès technologiques exponentiels permettent l'exploitation de ressources de plus en plus faibles qualités, reprenant ainsi une des hypothèses de Zimmermann (Zimmermann, 1933). Cependant dans ce modèle le progrès technologique ne permet pas de stopper l'augmentation des coûts de production, contrairement au modèle fonctionnel de Zimmerman (Zimmermann, 1933). La diminution des réserves dans ce cas est sigmoïde et si l'on n'atteint pas l'épuisement complet de la ressource physique, on tend vers un seuil bas à 5% des réserves estimées, correspondant au moment où l'exploitation n'est plus rentable (Meadows et al., 1972). Dans ce cas, on ne peut pas nécessairement évoquer un épuisement « physique » de la ressource, mais un épuisement économique, dont le résultat pour l'humanité est le même : la ressource devient indisponible. Selon les deux modèles, la question de la déplétion des ressources constituera un frein à la croissance d'ici à 2100. Bénéficiant d'une grande publicité, le rapport a ainsi gagné en popularité quand la première crise pétrolière (hiver 1973-1974) a mis en évidence la dépendance des sociétés occidentales à l'égard du pétrole (Levallois, 2010).

La méthodologie du rapport a été fortement critiquée par la communauté des économistes néoclassiques (Cole, Freeman, Jahoda, & Pavitt, 1973; Solow, 1974). Ainsi Robert Solow a-t-il consacré sa conférence de décembre 1972 à réfuter les arguments de *Limits to Growth* (Solow, 1974). Solow cite l'hypothèse de Nordhaus selon laquelle la production peut être libérée de toute dépendance aux ressources non renouvelables à un coût limité grâce à une technologie qui émerge au moment où la ressource s'épuise ("*backstop technology*"). Cette technologie s'appuie sur la consommation d'une ressource renouvelable ou avec des stocks très importants et règle donc la question de l'épuisement (Nordhaus, Houthakker, & Solow, 1973). Dans son exemple, il traite le sujet de la production énergétique et des *backstop technologies* permettant l'utilisation de l'^{238}U et des gaz de schistes, la technologie nucléaire étant considérée comme une technologie « ultime » en termes d'économie de ressources. Il met cette hypothèse en vis-à-vis de celle développée par ceux

qu'il appelle les « catastrophistes » (les déplétionistes), pour qui l'intensité matérielle (consommation intérieure apparente de matières/PIB qui traduit le besoin apparent en matières pour générer de la valeur) a atteint un palier : l'intensité matérielle continuerait donc à diminuer avec le progrès technologique qui accompagne la croissance. Pour Solow, entre ces deux hypothèses, il y a de nombreux scénarios intermédiaires qui peuvent être relativement optimistes sur l'impact de l'épuisement sur la croissance. Et il est possible que les mécanismes de prix, la substitution et le progrès technologique permettent à des niveaux de consommation positifs d'être maintenus à l' « infini », c'est-à-dire pendant « un très long temps » (Solow, 1974, p. 11) et qu'une adaptation sans crise puisse se produire. Enfin, il est intéressant de noter que Solow pointe lui-même l'absence d'études de terrain pour appuyer l'hypothèse d'une baisse des coûts de production au cours du temps : « *The market price can fall or stay constant while the net price is rising if extraction costs are falling through time, and if the net price or scarcity rent is not too large a proportion of the market price. That is presumably what has been happening in the market for most exhaustible resources in the past. (It is odd that there are not some econometric studies designed to find out just this*. » (Solow, 1974). Cet article de Solow et celui de Nordhaus (Nordhaus et al., 1973) « vont relancer l'engouement pour la thèse d'Hotelling […]. Ces auteurs souhaitent, par la réappropriation de la thèse d'Hotelling, apporter une réponse économique au phénomène d'accroissement du prix des ressources non renouvelables énergétiques.

Ainsi, pendant la controverse, la définition de la question de l'épuisement des économistes néoclassiques reste similaire à la définition d'Hotelling. Cependant, pour la première fois le rapport Meadows (Meadows et al., 1972) en soulevant la question de la fin des stocks de ressources minérales adopte une définition de l'épuisement qui correspond à la définition que nous utilisons aujourd'hui dans le langage courant : « action d'épuiser, de mettre à sec, de stériliser, d'user jusqu'au bout ou de s'épuiser ; fait d'être épuisé, tari » (Nimmo, 2017). Cette définition est au cœur du débat entre les tenants du rapport Meadows et les économistes néoclassiques. En effet, les économistes néoclassiques ont également mis en avant, dans leur critique du rapport Meadows, la distinction entre la rareté physique augmentant inéluctablement, et la pénurie économique, cette dernière étant pour eux atténuée par les adaptations de la capacité productive et les comportements de demande induits par le mécanisme des prix (Levallois, 2010). Cette critique semble en partie justifiée, pas parce qu'il n'est pas pertinent pour l'analyse économique de s'intéresser à la rareté physique, mais parce qu'il existe en effet un flou sur la définition utilisée dans le rapport. En effet, le rapport Meadows n'explicite pas quelle définition du terme « ressource » est prise dans l'ouvrage. Les termes utilisés laissent à penser qu'il s'agit d'un stock « physique », puisque les ressources sont évoquées sous l'angle des « besoins physiques » de la croissance : *« What will be needed to sustain world economic and population growth […]? […] The first category includes the physical necessities that support all physiological and industrial activity-food, raw materials, fossil and nuclear fuels, and the ecological systems of the planet which absorb wastes and recycle important basic chemical substances. »* (Meadows et al., 1972, p. 45). Cependant les modèles utilisent comme données d'entrée pour qualifier la quantité de ressource non renouvelable disponible, les données de l'USGS (à l'époque appelé « US Bureau of Mines ») concernant les « réserves ». Or la définition de l'USGS, et de la plupart des institutions du monde (Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014), des termes « ressource » et « réserve » fait intervenir des aspects socio-économiques (voir Tableau 1).

Tableau 1 : Définitions des termes liés au stock de ressources

Terminologie commune	Source	Description
Ressources	(Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014)	Quantité de substance d'intérêt, évaluée à partir de connaissances géologiques et de données de terrain et considérée comme exploitable dans les conditions légales, économiques et techniques au moment de l'évaluation.
Réserves	(Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014)	Une ressource acquière le statut de réserve, si le gisement en question a été « mesuré » (une incertitude sur la quantité disponible persiste mais le niveau de confiance dans les données devient plus élevé) et que la possibilité d'obtenir un permis est considérée comme certaine.
Gisement		Concentrations ou indices minéralisés d'une substance naturelle solide organique ou inorganique présente au sein ou sur de la croûte terrestre, exploitable en totalité ou en partie
Ressources physiques	Auteur	La quantité totale d'une ressource non-renouvelable donnée présente sur la planète. Voir conclusion paragraphe 2 pour la définition d' « épuisement physique »

Il est donc très clair que les quantités évaluées dans le cadre de ces deux notions sont influencées par définition par des facteurs tels que le prix, la législation, les évolutions techniques, etc. En réalité le modèle de Meadows, comme celui de Solow, traite de la fin de l'exploitation de la ressource, déterminée par des facteurs économiques (en pointillés sur la Figure 1) et non de l'épuisement de ce que nous appellerons les « ressources physiques », c'est-à-dire à la quantité totale d'une ressource non-renouvelable donnée présente sur la planète (ce qui correspondrait au cadre extérieur sur la Figure 1). Ce stock physique fait l'objet de peu de recherches et d'indicateurs comme l'a montré Alicia Valero dans son travail de thèse (Alicia Valero Delgado, 2008). Le premier rapport Meadows avance ainsi l'hypothèse que la limite économique d'exploitation des ressources ne permettrait pas d'atteindre l'exploitation de l'ensemble des réserves estimées en ressources non-renouvelables (à droite de la Figure 1). Par exemple pour le chrome, le rapport envisageait que seule 95% de la réserve estimée en 1972 pourrait être exploitée. Alors que pour les détracteurs du rapport (les expansionnistes) la limite de l'exploitation recule à mesure de l'augmentation des prix, de la découverte de nouvelles ressources et de la baisse des coûts de production (à gauche de la Figure 1).

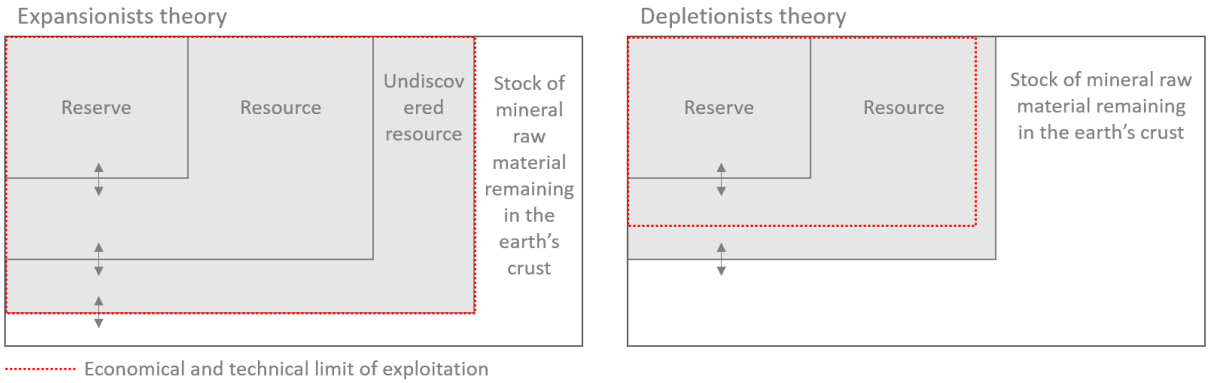


Figure 1 : Conceptions expansionniste et déplétioniste de la limite de l'exploitation des ressources non renouvelables. Source : autrice

1.5.Le courant néo-hotellinien : continuité du modèle néoclassique et approche de la question de développement soutenable

Les différentes contributions au sein de l'analyse néoclassique sur la question de l'épuisement qui suivirent cette controverse s'attachèrent à vérifier « les conséquences sur le chemin de prix et de la production suite au relâchement de certaines hypothèses du modèle d'Hotelling ou grâce à l'intégration d'autres hypothèses plus réalistes.» (Fizaine, 2014). L'objectif premier pour ces économistes néoclassiques, que Fizaine qualifie de « néo-hotellinien », est donc de « corriger » le modèle d'Hotelling pour pouvoir prendre en compte de nouveaux facteurs, notamment des facteurs qui permettent selon eux de dépasser le problème de l'épuisement des ressources tel que soulevé dans le modèle de Meadows (Meadows et al., 1972).

Parallèlement à cela, la question de la soutenabilité du modèle économique, devient progressivement avec le concept de « développement durable » une question de débat public. Ainsi, la question de l'équité intergénérationnelle de l'accès aux ressources naturelles, posée dès les années 1930 comme nous l'avons vu au paragraphe 1.3, est mise en balance avec l'idée de développement économique et notamment du maintien d'une croissance suffisante pour pallier les inégalités actuelles entre les pays. La parution du rapport de la commission Brundtland (WCED, 1987), couramment désigné comme « rapport Brundtland » est généralement vu comme la date d'institutionnalisation de ce concept, puisqu'il a « contribué largement à faire valoir l'importance d'un développement soutenable et a en réalité obligé les Nations Unies et les banques de développement multilatérales à mettre ce sujet à l'agenda » (Herman E. Daly, 1990). Cependant, la définition reste assez floue pour ne pas faire d'arbitrage entre l'efficience intergénérationnelle (c'est-à-dire la maximisation de la valeur tirée de l'exploitation des ressources au cours du temps) et l'exigence d'équité. Le développement durable y est défini comme un « développement qui permet la satisfaction des besoins présents sans compromettre les capacités des générations futures à satisfaire les leurs » (WCED, 1987). Comme le note Jacques Richard : « de l'avis de nombreux commentateurs, cette définition est susceptible de plusieurs interprétations contradictoires (Daly et Cobb, 1989) » (Richard & Plot-Vicard, 2014).

Fizaine propose un résumé des résultats de la littérature néo-hotellinienne selon les nouvelles hypothèses prises : « modification de la structure du marché (a), l'introduction d'un coût dépendant de la production cumulée (b), d'une *backstop technology* (c), de l'activité d'exploration (d), d'une qualité de gisement non uniforme (e), d'une incertitude portée sur l'offre ou la demande (f), de la possibilité d'un stock maintenu par le recyclage (g), et d'un effet du progrès technique (h), les théories liées à l'équité intergénérationnelle, au taux d'actualisation et à la durabilité de la croissance (i).

Il est proposé ici de reprendre cette classification des différentes hypothèses proposée par Fizaine. Cette classification est d'abord remise en perspective par rapport aux trois piliers fondateurs de l'ENC (voir résumé dans le Tableau 2 ci-après) exposés dans le paragraphe 1.2 : la question de la définition de la valeur comme valeur d'échange, l'allocation des ressources par le marché et rôle joué par le progrès technique, afin de souligner la continuité de l'évolution de la définition de l'épuisement dans ce courant. Puis le détail des travaux néo-hotelliniens sur ces hypothèses est exposé.

Tableau 2 : La conception de l'épuisement par l'école néo-hotellinienne. Source : adapté de Fizaine, 2014

Fondement de l'école néoclassique	Hotelling	Ecole néo-hotellinienne
La valeur est une valeur d'usage	Face au problème de l'épuisement, il faut maximiser la valeur nette actualisée : rechercher l'efficience intergénérationnelle de l'allocation des ressources, il n'est pas question d'équité	**Optimiser la valeur des ressources à travers le temps, tout en recherchant une certaine équité :** - Les théories liées à l'équité intergénérationnelle, au taux d'actualisation et à la durabilité de la croissance (i)
Allocation des ressources par le marché	Plusieurs scénarii (concurrence pure et parfaite, monopole, etc.)	**Prises en compte des défaillances de marché** - modification de la structure du marché (a) - l'activité d'exploration (d) - incertitude portée sur l'offre ou la demande (f)
Le Progrès est un idéal à atteindre	Pas de prise en compte direct du progrès technologique dans le modèle, mais la rémunération du capital issue de la vente des ressources doit permettre d'investir dans un substitut	**Prise en compte du progrès technique** 1. introduction d'un coût dépendant de la production cumulée (b) 2. *backstop technology* (c) 3. qualité de gisement non uniforme (e) 4. possibilité d'un stock maintenu par le recyclage (g) 5. effet du progrès technique [remplacé par efficience] (h)

- Optimiser la valeur des ressources à travers le temps, tout en recherchant une certaine équité

<u>Les théories liées à l'équité intergénérationnelle, au taux d'actualisation et à la durabilité de la croissance</u> : Face à l'ampleur grandissante de la question de la soutenabilité du développement, les auteurs néoclassiques essayent de prendre en compte cette notion, tout en conservant le concept d'efficience intergénérationnelle développé par Hotelling. Cette prise en compte donne lieu aux modèles de croissance durable. Pour le courant néo-hotellinien, « quatre auteurs ont développé des thèses sur la soutenabilité de la croissance et l'équité intergénérationnelle (Solow, 1974a ; 1974b ; Stiglitz, 1974 ; 1979 ; Dasgupta et Heal, 1974)» (Fizaine, 2014). La question de l'équité intergénérationnelle est traduite par les néo-hotelliniens comme le fait que la consommation par tête reste constante dans le temps (Solow in Hartwick, 1977). Tous concluent que l'épuisement doit être pallié par le progrès technologique (Stiglitz, 1974) ou que les ressources sont substituables par

le capital[8] comme facteur de la production (P. Dasgupta & Heal, 1974; Hartwick, 1977; Solow, 1974). Concernant la substitution des ressources non renouvelables dans la production par du capital, l'apport le plus célèbre est la règle dites « d'Hartwick » : « *the "Hartwick" rule […] states that consumption can remain constant in the face of declining availability of exhaustible resources so long as the rents from the exhaustible resource are invested in renewable capital* » (Norgaard, 1992). Le « renewable capital » faisant ici référence au capital reproductible ou physique (c'est-à-dire les machines et non les ressources non renouvelables). Cette approche de la transition par l'investissement fait donc l'hypothèse que les ressources sont fortement substituables par des machines dans la production. D'autres auteurs cherchent à atteindre cet objectif de croissance durable par des modèles de progrès technique dirigés (Acemoglu, 2002), qui prennent en compte l'existence d'innovation plus ou moins bénéfiques en termes d'utilisation de ressources. Une autre approche néoclassique traite la question du développement durable à travers le choix du taux d'actualisation (défini au paragraphe 1.3) à utiliser pour avoir une répartition de la valeur de l'exploitation des ressources qui soit juste envers les générations futures (c'est-à-dire qu'il y ait une notion d'équité), tout en gardant l'objectif premier de maximisation de la valeur dans le temps (c'est-à-dire l'efficience). Par exemple, Hoel et Sterner (Hoel & Sterner, 2007) proposent le calcul d'un taux d'actualisation à partir de la maximisation d'une fonction d'utilité qui prend en compte une part de substitution entre les ressources naturelles et le capital et Kula un « changement de repère temporel [via un] temps intragénérationnel (Kula, 1997 in Ferrari & Mery, 2009) sensé permettre de s'abstraire, dans le calcul économique, du moment particulier du temps où vit la génération concernée.

- Prendre en compte les défaillances de marché :

<u>Modification de la structure de marché</u> : « la règle d'Hotelling fut obtenue sous une hypothèse assez stricte respectant la présence d'un marché concurrentielle. Néanmoins, la réalité des marchés des ressources naturelles est assez éloignée de cette situation d'atomicité des marchés. Les activités d'extraction des ressources nécessitent des capitaux importants, c'est pourquoi ces marchés sont souvent concentrés et limités à quelques acteurs. La littérature théorique a investi cette problématique en supposant des modifications de la structure de marché diverses » (Fizaine, 2014)

<u>L'activité d'exploration</u> : Dans la plupart des travaux cités (Fisher, Arrow et Chang, Pindyck in Fizaine, 2014) l'idée est d'étudier l'impact de l'exploration, en termes d'apport d'information sur les stocks de ressources et d'augmentation des réserves appartenant à des producteurs, sur les trajectoires de prix des ressources. L'objectif étant d'expliquer comment les trajectoires de prix peuvent être différentes que celles prévues par Hotelling.

<u>L'incertitude portée sur l'offre ou la demande</u> : « L'intégration de l'incertitude [de l'offre et de la demande future et des droits de propriétés] dans les modèles néo-hotellinien a fait l'objet d'une attention toute particulière car elle s'apparente à un trait fondamental de la réalité des marchés. […] De manière générale, Hartwick et Olewiler (1986) montrent que les prix courants s'accroissent et que la vitesse d'extraction diminue à mesure que l'incertitude augmente » (Fizaine, 2014). Cependant certains auteurs (Deverajan et Fisher, 1981 in Fizaine, 2014) affirment que la vitesse d'extraction peut augmenter avec la peur d'une incertitude dans le futur. Le terme d' « incertitude » recouvrant des facteurs aussi différents que les politiques publiques (possibilité de nationalisation des ressources), l'apparition d'une ressource de substitut, etc.

- **Prendre en compte le progrès technique**

<u>Coût dépendant de la production cumulée</u> : L'hypothèse de Jevons selon laquelle les coûts de production augmentent à mesure de l'exploitation d'une ressource « modifie les résultats et conduit également à rejeter la règle d'Hotelling [dans laquelle les coûts de production ne sont pas pris en

[8] Le mouvement néoclassique n'est pas uniforme dans son approche de la conception du capital et donc du recours à l'actualisation comme nous le verrons dans le paragraphe 3 de ce chapitre

compte…]. Dans ces circonstances, le prix de la ressource ne croit plus au taux d'intérêt mais à un taux inférieur (Levhari et Liviatan, 1977; Deverajan et Fisher, 1981) égal au taux d'intérêt moins le pourcentage d'augmentation du coût d'extraction causé par l'augmentation de la production cumulée. » (Fizaine, 2014). La plupart des travaux académiques (Cleveland & Kaufmann, 1991; Ozdemiroglu, 1993) se donnant pour objectif de confronter les hypothèses sur l'évolution des coûts de production avec des données réelles travaillent avec des données concernant le prix, les données sur les coûts de production étant très rarement disponibles car relevant « de la sphère privée et stratégique de l'entreprise » (Fizaine, 2014) ou à des prix prohibitifs.

Backstop technology : Comme nous l'avons vu il s'agit de l'hypothèse de Nordhaus (Nordhaus et al., 1973) d'une technologie de remplacement. Pour Fizaine, les travaux de Heal (Heal, 1976) qui intègre l'hypothèse des coûts croissants de Jevons et de la *backstop technology*, montrent que la rente dégagée de l'exploitation des ressources « contrairement à son comportement postulé dans le modèle d'Hotelling part d'un niveau élevé pour ensuite chuter et s'éteindre arrivée à la date d'apparition de la *backstop technology* » (Fizaine, 2014).

Qualité de gisement non uniforme : « la règle d'exploitation du gisement le moins cher vers le gisement le plus onéreux » (Fizaine, 2014), toujours la même affirmation que Jevons, n'est que le pendant empirique de l'assertion de coûts de production qui augmentent au cours du temps, est remise en question par les néo-hotellinien, car selon eux, « au début de l'exploitation d'une ressource les agents économiques ne bénéficient pas de la totalité de l'information sur les gisements, ce n'est donc pas forcement les gisements les moins onéreux qui rentrent en production en premier » (Fizaine, 2014).

Le recyclage : « La possibilité du recyclage modifie considérablement les conclusions d'Hotelling puisque même dans le cas d'une ressource épuisable, une unité de ressource épuisable n'est pas détruite par sa consommation. L'introduction d'une hypothèse de recyclage peut être très instructive sur l'évolution du prix des ressources non énergétiques épuisables mais durables comme les métaux ou les minéraux » (Fizaine, 2014). Les néo-hotellinien étudient donc l'influence du recyclage sur le prix, en distinguant plusieurs scénarios selon que le stock de métaux à recycler se déprécie vite ou pas.

Effet du progrès technique : l'effet du progrès technique sur l'évolution du coût d'exploitation de la ressource et des prix reste aujourd'hui controversé au sein de la littérature néo-hotellinienne. Ainsi, «dans l'article de Slade (1982), un modèle alliant un progrès technique exogène pallie les augmentations du coût marginal suite à une diminution de la concentration de la ressource. Si le progrès technique évolue à un rythme assez rapide, il entraine une chute du coût marginal» (Fizaine, 2014). Cette hypothèse est donc similaire à celle de Zimmermann. « D'autres auteurs sont au contraire beaucoup moins optimistes sur l'effet du progrès technique et suggèrent que le progrès technique peut au contraire accélérer l'épuisement (Farzin, 1995) d'une ressource naturelle» (Fizaine, 2014). Il y a donc des auteurs (comme Farzin) qui séparent différents types de coûts en fonction qu'ils soient liés à l'accès aux ressources, ou à leur exploitation, afin de mieux modéliser l'effet du progrès technique sur le prix. Enfin, un nouveau changement va apparaitre dans la théorie néoclassique pour conceptualiser la croissance autrement. En effet, « cette dépendance de la croissance de long terme du produit par tête à la présence d'un terme exogène est [considérée comme] une des principales faiblesses du modèle de croissance néo-classique […] Dans le long terme, la croissance dépend du changement technique, lequel ne dépend de rien dans le modèle; il est même gratuit » (Amable, 2002)). En effet, pour Solow le progrès technologique restait exogène à son modèle de croissance. Le modèle de Robert Solow (1956), qui constitue le modèle canonique de l'ENC, converge vers un état stationnaire, et « même en admettant une croissance de la population, « *growth as measured by the rate of increase in output per person will cease in the long run* » (Aghion & Howitt, 1997). Il convient donc de rendre endogène ce progrès technique (Romer, 1994) pour réussir à rendre compte de l'imaginaire Capitaliste et Moderne. Pour répondre à cette nécessité, les théories du « Learning by Doing » (Arrow, 1962), la diffusion non contrôlable des connaissances

(Romer, 1986) ou les théories du capital humain (Lucas, 1988;Romer, 1990) sont notamment mobilisées » (Rambaud, 2015). L'idée est donc de dire que la croissance est intrinsèquement porteuse de progrès technologique, idée qui était déjà en germe dans les travaux de Jevons : « c'est en réalisant un formidable travail empirique que Jevons s'aperçoit qu'un progrès technique concourant à améliorer l'efficacité technique d'usage du charbon ne peut avoir lieu là où le charbon est bon marché. En d'autres termes, sa vision est déjà celle du progrès technique endogène » (Fizaine, 2014).

L'ENC a pris en compte de nombreux phénomènes liés aux problèmes environnementaux et au changement climatique, s'intéressant par exemple aux déterminants économiques permettant l'innovation dans les secteurs propres ou polluants (Acemoglu, 2002), ou s'intéressant à la substituabilité nécessaire pour mettre en place un développement durable.

Cependant, sur la stricte question de la définition de l'épuisement des ressources, l'approche des néo-hotelliniens n'a pas subi de changement fondamental : il s'agit principalement d'étudier l'éventualité de pénuries économiques et leurs impacts sur la croissance et les chemins de prix. L'ENC reste sur une conception de l'allocation des ressources assurée par un mécanisme de prix, le progrès technique (dirigé) permettant d'éviter l'augmentation des coûts d'exploitation liés à la baisse de la ressource, des substituts sont trouvés grâce à l'investissement, le capital et les ressources sont substituables. Cette définition des mécanismes d'épuisement est donc très liée à la croyance dans le Progrès et basée sur une approche de la Valeur comme Valeur d'usage. Si un intérêt est désormais accordé à la question de l'équité intergénérationnelle, abordée à travers la question du choix du taux d'actualisation et de l'investissement de la rente, cette réflexion reste cantonnée dans un cadre qui accorde la priorité à la maximisation de la valeur nette actualisée des ressources.

1.6. La nouvelle économie institutionnelle et la nouvelle économie des ressources

Le paragraphe précédent a montré comment la problématique de l'épuisement a été prise en compte par les économistes néo-hotelliniens selon le prisme de la « croissance durable ». Si la définition du problème et les fondements dans lesquels s'insèrent cette réflexion, ne changent pas fondamentalement par rapport à Hotelling, la possibilité d'une intervention des pouvoirs publics pour corriger les défaillances de l'allocation des ressources par le marché est envisagée. Ce qui n'est pas le cas dans les travaux de certains auteurs de la Nouvelle économie institutionnelle (NEI) ayant fondé la Nouvelle économie des ressources (NER), qui partage les hypothèses fondamentales de l'ENC, mais les mobilisent différemment sur la question des ressources. Ce paragraphe donne un bref aperçu des fondements de la NEI avec Williamson avant de se concentrer sur l'émergence de la NER et de son approche du problème de l'épuisement.

La NEI se fonde avec Oliver Williamson, qui « est l'inventeur de l'expression « nouvelle économie institutionnelle » qui devient à partir des années 1990 la référence de divers courants théoriques actifs, unis par l'idée que les institutions comptent et qu'elles peuvent être analysées avec les instruments de la théorie économique standard, sous réserve d'ajustements apportés à cette dernière » (Chavance, 2012). La NEI « conçoit les institutions comme une émanation directe des comportements et décisions individuelles des agents » (Morales Belpaire, 2013), cette école se réapproprie donc l'individualisme méthodologique de l'ENC, ainsi que l'idée que tous les producteurs cherchent à maximiser leur profit. En effet, Williamson développe la notion de coûts de transaction en se basant sur l'article de Coase (Coase, 1937) dans lequel il expliquait l'existence de la firme comme une stratégie de contournement des coûts liés à l'utilisation du mécanisme de prix. Pour Williamson, l'« approche des coûts de transaction affirme que ces institutions[9] ont pour principale finalité et conséquence d'économiser sur les coûts de transaction (Stone & Williamson,

[9] « Les principales « institutions du capitalisme » considérées [par Williamson] sont le marché et la hiérarchie (la firme, l'entreprise), auxquelles l'auteur ajoute les « formes hybrides » constituées par des relations durables entre entreprises (*relational contracting* : sous-traitance, partenariat, alliances diverses) [1975]. Dans un schéma postérieur, les « bureaux » (étatiques) complètent les trois structures originelle ». (Chavance, 2012)

1986). Ainsi, l'apparition des institutions du capitalisme se justifierait-elle par la volonté de minimiser des coûts de transaction et donc de maximiser la valeur marchande.

La NEI comprend des courants très différents, notamment en ce qui concerne la gestion des ressources. En effet, la NEI a donné naissance aussi bien à la NER, à la suite des travaux de Douglass North (Boisvert, Caron, & Rodary, 2012), qu'à la théorie des biens communs d'Elinor Ostrom (Weinstein, 2013). Cependant, la NER reprend la plupart des caractéristiques de la définition du problème de l'épuisement de l'ENC, avec un optimisme technologique plus marqué, c'est pourquoi nous nous attardons sur ce mouvement dans ce paragraphe et sur sa définition de l'épuisement. La NER se caractérise également par la prise en compte des externalités via la propriété, ce qui sera détaillé au chapitre 2. « La nouvelle économie des ressources *(New Resource Economics)* [est] également appelée *Free Market Environmentalism* ou écologie de marché » (Boisvert et al., 2012). Elle est ancrée dans la NEI même si l'approche historique ou les exemples institutionnels « ont avant tout pour objet de concourir à une célébration de la propriété privée et de servir des stratégies en faveur de la privatisation » (Boisvert et al., 2012). C'est « un courant formé d'économistes, de politistes et de juristes réunis, pour la plupart, au sein du Centre de recherches PERC de l'Université de Montana (USA), dirigé par Terry Anderson » (Petit, 2004). La NER peut être définie comme « une combinaison de la théorie des choix publics (*Public choice*), des droits de propriété et de l'école autrichienne dans une perspective néoclassique (Anderson, 1982) » (Petit, 2004). Ainsi, cette école puise une partie de son inspiration dans les travaux de Douglass North. Pour Douglass North, « les institutions apparaissent pour minimiser les coûts de transaction [North, 1984;1994]. Leur émergence peut donc s'expliquer par l'apparition de nouveaux coûts, induits par des activités ou des valeurs nouvelles consécutives, par exemple, à un progrès technique, et que les agents économiques vont chercher à capter. Dans la mesure où les institutions, parmi lesquelles les droits de propriété, résultent d'un calcul économique mené par des agents rationnels, elles sont toujours efficaces et constituent toujours l'arrangement le plus adapté à la nouvelle donne. » (Boisvert et al., 2012). Pour relativiser ces affirmations, il faut souligner que Douglass North a eu une approche de plus en plus dynamique dans sa manière de concevoir les institutions au cours de sa carrière. En effet, il se met progressivement à distinguer : les institutions formelles et informelles, les organisations et les institutions, leurs interactions, des changements institutionnels dépendant de l'environnement, mais aussi du chemin parcouru, etc. Cependant, il restera toujours dans une perspective proche de l'ENC et restera notamment attaché au principe d'institutions et agents économiques recherchant la maximisation (Chavance, 2012).

Des travaux de North, la NER reprend l'idée que les institutions apparaissent pour diminuer les coûts de transaction. Mais la question des institutions est réduite à la seule question de la propriété privée et la question des coûts est élargie à la question plus large de la mauvaise gestion des ressources. Ainsi, Robert Smith cite les travaux de North concernant l'épuisement des réserves de saumon : « *In an attempt to reverse the trend [of depletion], regulations over the season, fishing hours, boats, and gear increased in complexity. Naturally, the results in real life are more like a nightmare than a fairy tale. Fishermen are poor […]. The consumer pays a much higher price […], the preservation of the salmon run is still not assured. The root of the problem lies in the current non-ownership arrangement. It is not in the interests of any individual fisherman to concern himself with perpetuation of the salmon run. Quite the contrary: It is rather in his interests to catch as many fish as he can during any* one season » (North & Miller, 1973 in R. J. Smith, 1981). De cette analyse, Smith tire la conclusion que la surexploitation des ressources vient de l'absence de propriété privée de la ressource (Smith, 1981). Cette théorie a été développé à la suite d'Anderson par Robert Smith, Fred Smith et Yandle Bruce (Boisvert et al., 2012; Petit, 2004).

Ainsi pour la NER, il n'existe pas de problème d'épuisement des ressources à proprement parler : « *The first [des hypothèses implicites sur lesquels se base les partisans du développement soutenable] is that we are running out of resources, thus leaving future generations with less; the second is that market processes are the cause of these depletions. We challenge both of these assumptions* »

(Anderson & Huggins, 2003). Il n'y a donc pas de diminution des ressources. Notamment parce que l'épuisement des ressources permet de développer les substituts : *« The near depletion of whales may have threatened the biological diversity of the planet, but the loss of whale oil as a resource did not hamper future generations from meeting their needs. More plausibly, according to Steven Hayward (2002, 4), "the use of whale oil facilitated economic development— growing wealth, incomes, occupational specialization, and technological prowess—that put humankind in a position to adopt better, more efficient, more sustainable methods of production." The demand for whale oil contributed to the development of petroleum and electricity, which were more efficient than whale oil and hence helped restore the whale population* » (Anderson & Huggins, 2003). Le développement de ces substituts permet aux ressources renouvelables de reconstituer leurs stocks. Cette vision ne s'applique bien entendu pas aux ressources non renouvelables, mais pour la NER comme pour la TNC ces ressources n'ont pas de valeur en soi, leur épuisement n'est donc pas problématique à condition qu'un substitut se développe. La NER contourne le problème de savoir si les générations futures pourraient avoir à nouveau besoin des ressources du passé. Cela s'explique aisément par l'idéal du « Progrès » véhiculé par ces deux écoles : le Progrès est linéaire et les nouvelles technologies seront nécessairement « meilleures » que les anciennes, comme les ressources utilisées dans le futur sont nécessairement meilleures que les anciennes, comme cela est explicite dans l'exemple de l'huile de baleine. L'idée d'une progression « naturelle » et d'une amélioration continue est plus accentuée dans la NER que dans l'ENC, avec l'idée qui sera détaillée au paragraphe 3 du chapitre 2, que la seule intervention des pouvoirs publics devrait consister à attribuer des droits de propriétés pour assurer une bonne gestion des ressources (Boisvert et al., 2012).

Un des auteurs cité dans le paragraphe précédent, Daron Acemoglu, est également considéré comme faisant parti de la nouvelle économie institutionnelle. En effet, certains de ses travaux (Acemoglu, Johnson, & Robinson, 2001, 2012) s'intéressent au rôle des institutions. Cependant, les travaux d'Acemoglu sur la formation et le rôle des institutions ne portent pas sur les questions d'épuisement, mais sur l'économie du développement et ont pour but d'expliquer les différences de développement entre pays par les différentes institutions héritées des périodes coloniales. Ainsi, « Daron Acemoglu conjugue […] la théorie des jeux, des analyses économétriques et la modélisation – méthodes de référence de l'économie standard- avec des récits historiques illustratifs, en vue de fonder la thèse d'une opposition fondamentale entre les « institutions extractives » et les « institutions inclusives » dans l'histoire […]. Ainsi, […] là où les Européens (en fait essentiellement les Britanniques) ont établi des colonies de peuplement, en raison de conditions sanitaires favorables, ils ont mis en place des institutions inclusives, favorables au droit de propriété et donc à la croissance ; au contraire là où prévalait des maladies […], les Européens (souvent les Français) ont introduit des institutions extractives qui ont fait obstacle au progrès. […] Ces thèses sont particulièrement controversées. […] Cette opposition est ainsi centrale dans la théorie des « origines légales » […] qui affirme en particulier les vertus de la tradition des *common law* pour la croissance […] et les obstacles posés par l'influence du droit civil (français, allemand ou scandinave). [En effet …] trois décennies de croissance extraordinaire de l'économie de la Chine y opposent aussi un contre-exemple contemporain » (Chavance, 2012, Chapitre III). Cependant, dans les travaux concernant la durabilité de la croissance cités au paragraphe précédent, il n'y a pas de telle théorie. De plus, les références d'Acemoglu dans les deux articles sur le changement technique dirigé (Acemoglu, 2002; Acemoglu, Aghion, Bursztyn, & Hemous, 2012) ne font références à aucun des auteurs de la *New Resources Economics*, mais plutôt à Dasgupta et Nordhaus. Pour Acemoglu, dans le cadre méthodologique qu'il développe, le prix reste un bon indicateur de la rareté «*we will show that the presence of an exhaustible resource may help prevent an environmental disaster because it increases the cost of using the dirty input even without policy intervention* » (Acemoglu, Aghion, et al., 2012). La définition de l'épuisement reste donc sur des hypothèses néo-hotellinienne et c'est pourquoi ces travaux ont été présentés au paragraphe précédent.

La définition de l'épuisement de la NER, qui peut être incluse dans l'école de pensée des « nouveaux classiques », est une définition de pénurie économique, et reste toujours ancrée dans les principes

de maximisation de la valeur d'usage, du progrès technique et de l'allocation des ressources par le marché. Mais pour les auteurs de la NER, tout dysfonctionnement dans ce système peut être corrigé par l'attribution de droits de propriété privés et par une plus grande liberté du marché, car le progrès technologique et la découverte de substituts sont des phénomènes spontanés, linéaires et inéluctables dans les conditions d'une économie de marché. Il n'est donc pas question, comme c'est le cas pour les économistes des ressources néo-hotelliniens d'analyser les conditions dans lesquelles le progrès technique a lieu et les conditions dans lesquels ce progrès technologique est bénéfique pour les problématiques environnementales ou d'épuisement des ressources.

1.7.Les théories de l'abondance

Ce paragraphe présente succinctement les théories développées sur l'abondance des ressources. Ces économistes partagent les postulats de la NER concernant le progrès technologique, et fondent une théorie sur l'infinité des ressources disponibles. Le paragraphe montrera comment ces théories de l'abondance se sont d'abord formées autour des travaux de J.L. Simon avant de chercher à offrir un cadre conceptuel à cette approche en s'appuyant d'une part sur des économistes institutionnalistes tels que Zimmermann et Mitchell, et d'autre part sur une approche économique libérale, revendiquée comme héritière de l'école autrichienne en ce qui concerne Robert Bradley (Robert L. Bradley, 2004). Cependant, il est important de noter que la liste des auteurs présentés dans ce paragraphe n'est ni exhaustive ni ne constitue un courant ou une école économique cohérente et reconnue comme telle. L'intérêt d'analyser leur définition de l'épuisement réside principalement dans l'influence que celle-ci a sur la définition des enjeux liés à l'épuisement auprès d'acteurs non-académiques.

Dans les années 1980, JL Simon achève la première version de *the ultimate ressource*, qui va donner naissance à la théorie de l'abondance. Les écrits de Simon se font en réaction à certaines positions scientifiques, principalement des sciences environnementales. En effet, il réagit notamment aux travaux de Norman Myers qui font appel à « un large consensus scientifique selon lequel la croissance non contrôlée de la population et la perte de la biodiversité sont de sérieux problèmes potentiels qu'il faut prendre en charge » (traduit de Robert Costanza, 1995) . Simon tente également de confronter dans son approche les « conclusions tirées par le Club de Rome, Ehrlich[10]et plus généralement par l'approche biophysique. […] Ces économistes [travaillant dans la lignée de Simon] constituent en quelque sorte une branche radicale du courant néo-Hotellinien croyant au pouvoir de l'homme et du marché pour atténuer la rareté de l'épuisement d'une ressource. » (Fizaine, 2014). En effet, Simon reprend l'approche du progrès technique endogène (ou de la croissance endogène), pour lui la seule à même d'expliquer la continuité de la croissance, et il se rapproche en cela d'une partie des auteurs néo-hotellinien : « La théorie Malthusienne des rendements décroissants ne correspond pas à l'observation des faits et n'est pas intellectuellement solide : une théorie de l'invention endogène est plus convaincante de mon point de vue » (Julian Lincoln Simon, 1990). Cependant, il s'en distingue en ne s'intéressant pas aux conditions dans lesquelles ce progrès est opérant, d'où la qualification de « branche radicale » donnée par Fizaine.

Pour cela Simon étudie une série de « données statistiques pour montrer que les prix des minéraux et des ressources naturelles ne se comportaient pas […] différemment de ceux des biens reproductibles » (Bradley, 2007) sur laquelle il s'appuie pour affirmer que l'épuisement des ressources n'est pas un problème économique et que, au contraire, le développement économique génère des solutions aux problèmes de rareté des ressources. « Sur la base de l'Enquête Géologique américaine », J.L. Simon « réfute la notion de rareté « physique », pour proposer une définition économique de la rareté, saisie à travers les tendances du prix réel ou des coefficients budgétaires (mesurés sur longue période). Il en vient ainsi à formuler trois arguments économiques limitant

[10] Notamment son argumentation remettant en question la confiance que les économistes accordent aux arguments s'appuyant sur la substituabilité comme moyen de régler le problème de l'épuisement des ressources

cette rareté ; l'élasticité de l'offre, la rentabilisation des technologies nouvelles d'extraction, enfin et surtout l'extension, quasi illimitée, de la substituabilité. » (Chesnais, 1982). L'idée centrale de Simon est que la connaissance, en permettant la substituabilité et le progrès technologique permet une croissance économique infinie. « Pour cela Simon s'appuie sur des tendances bien spécifiques [… qui pour lui] montrent qu'il suffit de regarder l'histoire pour voir que le bien-être matériel des humains s'est toujours amélioré » (traduit de Robert Costanza, 1995). Costanza critique l'approche de Simon que ce soit dans le choix des données comme dans les conclusions tirées selon lesquelles il serait inutile de se préoccuper de l'épuisement des ressources ou des dégradations environnementales. Ces critiques seront approfondies dans le paragraphe 4.

Fizaine désigne par le terme d'abondancistes (Fizaine, 2014) les économistes qui dans la lignée de Simon (Julian L. Simon & Bartlett, 1985; Julian Lincoln Simon, 1998) remettent en question les conclusions du rapport du club de Rome et prônent à travers l'analyse de certaines données une conception illimitée des ressources. Ce terme est traduit de la désignation « *Cornucopians* » utilisée par Tilton (Tilton, 1996 in Fizaine, 2014), et apparue pour la première fois dans la classification de Kahn (Kahn, Brown, & Martel, 1976). Il a été choisi de qualifier sous ce terme l'ensemble des économistes ayant une conception illimitée du stock de ressources que leur analyse soit empirique comme celle de Simon ou théorique. Dans les contributeurs les plus récents et les plus libéraux on compte par exemple Robert L. Bradley. Pour R.L. Bradley, J.L. Simon a apporté une avancée empirique appuyant une théorie de l'abondance mise au point à l'origine par Zimmermann : *« Yet Simon spent precious little time on this theory. Erich Zimmermann did and provided a theoretical framework that Simon encountered but scarcely acknowledged*. » (Bradley, 2007). Bradley fait donc le lignage suivant, qui n'est pas fait de façon explicite par Simon lui-même : Mitchell et Zimmerman pour l'aspect théorique, Adelman et Simon pour l'aspect « empirique » (Anderson & Huggins, 2003; Bradley, 2007) enfin lui-même et De Gregori. Ces deux auteurs (DeGregori, 1987; Bradley, 2007) ancrent leurs travaux dans la pensée des premiers institutionnalistes à s'être intéressés à la question des ressources, Wesley Mitchell et Erich Zimmermann.

Une partie des références entre NER et des abondancistes sont communes, principalement Milton Friedman (Anderson & Huggins, 2003; Bradley, 2007) et J.L. Simon (Anderson & Huggins, 2003; Bradley, 2007) pour appuyer leur propos concernant l'importance du progrès technologique. Cependant le cadre conceptuel dans lequel s'ancre la NER (notamment la NEI) diffère de celui évoqué dans ce paragraphe : les auteurs issus de la nouvelle économie institutionnelle comme North ne sont pas cités par Robert Bradley. En effet, Bradley, s'intéresse avant tout à l'approche relativiste du concept de ressource de Zimmermann, qu'il cite pour expliquer l'inexistence du problème d'épuisement.

Ainsi, Bradley et DeGregori cherchent-t-ils à développer une théorie abondanciste des ressources et à rejeter l'approche néoclassique : « *it should be clear that, though mainstream economics [eg neoclassical economy] can explain short-term trends by techniques such as substitution and increasing efficiency, their basic theory of finite resources does not allow for indefinite resource expansion* » (DeGregori, 1987). Ils reprennent une réflexion entamée par Wesley Mitchell et Erich Zimmermann sur la définition d'une ressource. Pour Zimmermann, les ressources ne sont pas des choses connues et fixées, elles sont ce que les humains utilisent pour subvenir à leurs besoins à un moment donné : seule l'évaluation humaine transforme les choses en « ressources » (Robert L. Bradley, 2004). «Les ressources sont des concepts fonctionnels très dynamiques: elles ne sont pas, elles deviennent, elles évoluent à partir de l'interaction triple de la nature, de l'homme et de la culture, dans laquelle la nature établit des limites extérieures, mais l'homme et la culture sont largement responsables de la partie physique qui est mise à la disposition de l'homme » (Zimmermann, 1951 in Robert L. Bradley, 2004). Cette approche établit une distinction entre les ressources physiques et les ressources telles qu'appréhendées par l'économiste : «Pour le physicien, la loi de conservation de la matière et de l'énergie est fondamentale, mais l'économiste s'intéresse moins à la totalité de l'offre qu'à sa disponibilité » ((Zimmermann, 1933) in Robert L. Bradley, 2004). Son approche fonctionnelle des

ressources considère l'examen des différents aspects (géographique, économique, historique, sociologique, technologique, politique) influençant la définition du stock de ressources mondiales. Mais pour Zimmermann, ces facteurs sont tous influencés par le changement institutionnel sur lequel les économistes devraient se concentrer. Pour Mitchell, les principaux facteurs influençant le stock de ressources sont la connaissance et le progrès technologique. C'est cette mise en avant de la connaissance comme capable d'étendre le stock de ressources qui est mise en avant par Bradley et DeGregori : "*Incomparably greatest among human resources is knowledge. It is greatest because it is the mother of other resources."* Et "*The bulk of MAN's resources are the result of human ingenuity, aided by slowly, patiently, painfully acquired knowledge and experience* » (Mitchell, 1941 in Bradley, 2007; DeGregori 1987). En partageant cette affirmation du rôle clef de la connaissance et du progrès technologique, tout en adoptant un optimisme technologique très marqué, les auteurs concluent à une absence de limite exercée par les ressources sur la croissance : le stock des ressources peut être redéfini à l'infini via la substitution et le progrès technologique eux-mêmes sans limites. Pour Swanney, la lecture de DeGregori des travaux de Zimmermann est tronquée, et DeGregori passe à côté de la question des problèmes liés à la surexploitation des ressources en les rejetant par une définition d'un progrès technologique constant et dont les effets sont par définition bénéfiques : « *Utilizing an analytic definition of technology (volitional application of knowledge to the material world) allows inquiry to proceed without defining away the problem at the outset*. »(Swaney, 1987).

Enfin, Robert Bradley croise l'approche institutionnaliste, avec les travaux de l'école autrichienne : « *Zimmermann's neglected beginning, when combined with brief insights provided by Ludwig von Mises, and the empirical work of M.A. Adelman regarding crude oil and Julian Simon regarding minerals in general, offers a theory of resource expansion that challenges the distinction between renewable and nonrenewable resources and the depletionist mindset it engenders* » (Bradley, 2007). Si pour Bradley « aucun des auteurs [de l'école autrichienne] ne développent une théorie complètement subjectiviste des ressources [… et que] Mises, Hayek et Rothbard acceptent de travailler dans un cadre où les ressources sont fixées [comme c'est le cas dans la théorie néoclassique] » (traduit de Bradley, 2007), l'auteur souhaite tout de même ancrer sa proposition de théorie « subjectiviste » (que nous avons appelée « abondanciste ») dans la pensée de l'école autrichienne. Pour Bradley, l'école autrichienne a théorisé avec Israel Kirzner une « vigilance entrepreneuriale [qui est…] inépuisable en principe » (Bradley, 2007). De là, si les ressources sont définies par la connaissance et l'innovation, ce qu'il appelle la théorie des ressources « institutionnalistes » (sensu DeGregori, 1987), l'auteur en conclut qu'une théorie des ressources de l'école autrichienne devrait raisonner avec un stock de ressource inépuisable. Une seconde caractéristique de la théorie de l'abondance est prônée par Bradley : traiter les ressources physiques comme du capital reproductible. On retrouve ici l'hypothèse néoclassique de la substituabilité entre capital et ressources, mais qui serait totale. Pour justifier cela, Bradley met en avant le fait que l'industrie extractive n'a pas de limite dans la mise à disposition de nouvelles ressources : « *Resourceship*[11] *uses land, labor, and capital to create economic goods. The fact that minerals cannot be naturally or artificially created in significant quantities (within a human time-frame)—giving rise to the natural-science concept of mineral fixity—is secondary*. » (Bradley, 2007). Une troisième caractéristique, qui découle du fait de ne plus prendre en compte la finitude (d'un point de vue physique) des ressources est de raisonner en termes d'offre limitée à un temps t face à la demande, sans prendre en compte le phénomène de déplétion physique : « *The causal factor is whether or not human action views a supply as fixed, and thus production/consumption as drawing on a strictly limited, nonaugmentable, supply. "Stock economics" is a concept very different from "mineral economics"; the latter may or may not provide examples for the former*. » (Bradley, 2007). Bradley ajoute ensuite qu'une théorie autrichienne des ressources devrait s'intéresser à la structure du capital permettant l'exploitation des ressources à un coût toujours plus bas et s'intéresser à la question de l'inégalité de répartition géographique des ressources. Mais le point le plus important de l'ancrage de Bradley dans la théorie autrichienne, est la question du rôle des institutions. Cette

[11] Qu'il définit comme l'acte positif de création de nouvelles ressources

ancrage dans la pensée autrichienne a surtout trait, comme dans la NER avec les références à Milton Friedmann (Anderson & Huggins, 2003), au fait de prôner la propriété privée comme solution au problème de la surexploitation (comme pour les externalités comme nous le verrons dans le chapitre 2) : « *It is true that where a considerable part of the costs incurred are external costs from the point of view of the acting individuals or firms, the economic calculation established by them is manifestly defective and their results deceptive. But this is not the outcome of alleged deficiencies inherent in the system of private ownership of the means of production. It is on the contrary a consequence of loopholes left in this system. It could be removed by a reform of the laws concerning liability of damages inflicted and by rescinding the institutional barriers preventing the full operation of private ownership* » (Ludwig von Mises, 1949 in Bradley, 2007).

Ainsi, les économistes abondancistes rejettent-ils toute notion d'épuisement par définition. Il s'agit pour eux de revendiquer une définition des ressources prenant en compte des aspects institutionnels, techniques, économiques, géographiques, etc. Au paragraphe 1.4, il avait été montré que la notion de « ressources », telle que définie par les instituts publics de géologie, et telle qu'utilisée par les économistes néoclassiques était effectivement imbriquée avec des considérations socio-économiques et ne mesurait pas la rareté physique. Cependant, chez les abondancistes, ce concept de ressources allié à une croyance dans un progrès technique lui aussi bénéfique (en termes d'efficience des ressources, de substitution entre ressources, de substitution entre les ressources et le capital) et sans limites, amène à rejeter la pertinence d'indicateurs d'épuisement des ressources physiques. Il s'agit de théoriser des ressources en expansion, sans que soit considérés les éventuels problèmes liés à la déplétion des ressources.

Le paragraphe 1 s'est intéressé à la définition de l'épuisement des ressources à travers l'histoire de la pensée économique, particulièrement de la pensée néoclassique et néo-institutionnelle. Ainsi, nous avons vu que marginalisme à travers les travaux de Jevons (W. S. Jevons, 1865) définit l'épuisement comme le moment où les coûts d'exploitation ont augmenté du fait de la baisse de qualité des ressources de manière telle que le prix de la ressource est trop élevé pour les industries consommatrices. Puis, face à l'émergence des questions de développement durable à travers la question de l'équité intergénérationnelle dans l'accès aux ressources posée par les mouvements conservationnistes dans les années 1930, la théorie néoclassique définit la question de l'épuisement comme une problématique d'efficience : l'objectif est de maximiser dans le temps la valeur créée par l'exploitation de la ressource. La théorie néoclassique répond aux craintes soulevées quant à la stagnation ou la diminution de la production dans les travaux de Jevons et dans la théorie des rendements décroissants par la création du concept de substituabilité qui émerge dans les travaux d'Hotelling. Dans la lignée de ces travaux, pendant les années 1970 la définition de la question de l'épuisement des économistes néoclassiques dits néo-hotelliniens reste similaire. Cependant, à la même époque, pour la première fois le rapport Meadows (Meadows et al., 1972) soulève la question de la fin du stock des « ressources physiques ». Cette définition est au cœur du débat entre les tenants du rapport Meadows et les économistes néoclassiques, qui distinguent la rareté physique augmentant inéluctablement, et la pénurie économique, cette dernière pouvant être atténuée. Il s'agit donc pour les économistes néo-hotelliniens d'étudier les mécanismes pouvant atténuer la pénurie économique (meilleure allocation dans le temps des ressources, substitution des ressources, substitution entre ressources et capital, progrès technologique permettant une utilisation/exploitation plus efficientes des ressources, etc.), ses impacts sur la croissance et les chemins de prix afin de pouvoir atteindre une croissance durable. Dit autrement ces derniers s'intéressent aux conditions d'investissement de la rente, au taux d'actualisation et à la mise en place de taxes, permettant de combattre les défaillances de marché. Enfin, nous avons vu que depuis les années 1980 sont apparues des analyses, comme celle de la NER ou des abondancistes, qui partagent la vision du Progrès de l'école néoclassique, permettant de faire face au problème de l'épuisement des ressources, tout en rejetant toute intervention visant à améliorer les défaillances

du marché pour prendre en charge les problèmes de pénuries économiques. Pour la NER, tout dysfonctionnement dans ce système peut être corrigé par l'attribution de droits de propriété privée et par une plus grande liberté du marché, car le Progrès technologique et la découverte de substituts sont des phénomènes spontanés, linéaires et inéluctables dans les conditions d'une économie de marché. Quant aux économistes abondancistes, ils rejettent la notion même d'épuisement physique. Il s'agit pour eux de théoriser des ressources en expansion, sans que soit considérés les éventuels problèmes liés à la déplétion des ressources.

2. Les spécificités de l'épuisement des ressources physiques en métaux

Le paragraphe précédent a esquissé le concept de ressources physiques et ce paragraphe vise à préciser la définition de l'épuisement physique de la ressource concernant les métaux. De plus, jusqu'ici la thèse a traité de manière quasi similaire les différents types de ressources et il s'agit de préciser en quoi la question de l'épuisement présente des particularités en fonction des différents types de ressources. Comme nous l'avons vu précédemment, l'épuisement des ressources non renouvelables a commencé à être un sujet médiatique avec le travail du club de Rome dans les années 1970 (Meadows et al., 1972). Le rapport prévoyait qu'en l'absence de changement majeur dans le système, la production industrielle par habitant atteindrait son sommet au début du XXIème siècle. Le rapport a gagné en popularité quand la première crise pétrolière (hiver 1973-74) a mis en évidence la dépendance des sociétés occidentales au pétrole (Levallois, 2010). C'est l'une des raisons expliquant pourquoi le débat sur l'épuisement des ressources est souvent axé sur les ressources énergétiques fossiles, la question des métaux ayant été presque absente du débat jusqu'à très récemment. Pourtant, elle soulève des enjeux qui lui sont spécifiques.

Nous verrons tout d'abord que la question de l'épuisement physique des ressources ne se pose pas de la même manière pour les ressources renouvelables et non-renouvelables, puis que les questions de l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et métalliques sont liées bien que présentant des spécificités, que l'épuisement des ressources minières métalliques peut être caractérisé par la teneur, avant de se concentrer enfin sur la principale problématique spécifique aux métaux par rapport aux autres ressources non renouvelables vis-à-vis de l'épuisement : le recyclage.

2.1. Les ressources non renouvelables et les ressources renouvelables, quelles différences sur la question de l'épuisement

2.1.1. La régénération du stock de ressources

La définition commune des ressources non renouvelables, aussi appelées ressources épuisables (Pearce & Turner, 1989), ou encore ressources extractives[12] (Schulze, 1974), correspond aux ressources qui « ne se renouvellent pas d'elle-même, elles incluent des ressources comme le charbon, le pétrole et les minéraux » (traduit de Pearce & Turner, 1989), ou encore qui ont une disponibilité finie (un stock fini) dans la croûte terrestre (Schulze, 1974). Contrairement aux « ressources renouvelables qui ont la capacité de se renouveler. Une forêt a une productivité durable, de telle manière que si l'on exploite X mètres cubes de bois tous les ans, le stock d'arbres restera le même si jamais les arbres ont poussé de X mètres cubes […]. Il est très clair que si l'on exploite une ressource renouvelable plus vite que son taux de renouvellement, le stock de la ressource sera réduit. En ce sens une ressource renouvelable peut tout à fait être « extraite», traitée comme une ressource épuisable. Si nous voulons maintenir nos ressources renouvelables il faut prêter attention à ne pas les exploiter au-dessus du taux de capacité de régénération naturel» (Pearce & Turner, 1989). Il est donc clair ici, que les ressources renouvelables peuvent également faire l'objet d'un épuisement physique. La principale différence est donc que pour les ressources

[12] Le terme de ressources extractives peut également faire référence à la notion d'extractivisme (Bednik, 2015; Gudynas, 2013) et dans ce cas-là elle fait référence de manière beaucoup plus large aux pratiques épuisant les ressources d'un pays et peut inclure des ressources dites renouvelables. Nous utilisons ici le terme comme parfait synonyme de ressources non renouvelables.

non renouvelables, le phénomène d'épuisement a lieu quel que soit le taux d'exploitation de la ressource.

Enfin, il faut souligner que la distinction entre ressources non renouvelables et renouvelables est parfois floue (Schulze, 1974), car la notion de renouvellement est imprécise. En effet les processus de décomposition biologique et de sédimentation à l'origine des ressources énergétiques fossiles (Schulze, 1974) et les divers processus géologiques à l'origine des ressources mécaniques sont encore à l'œuvre, quoiqu'à une vitesse très lente. Il y a donc renouvellement à l'échelle des temps géologiques. Il est d'usage de fixer la limite entre ressources renouvelables et non renouvelables à l'échelle d'une génération humaine.

Les métaux font partis des ressources non renouvelables, au même titre que les ressources minérales non métalliques et les ressources énergétiques fossiles. Le Tableau 3 expose différentes façons de classer les ressources, avec un focus sur les matières premières minérales et le Tableau 4 précise les définitions des différentes sous-catégories de ressources non renouvelables. On notera entre autres que la plupart des classifications n'incluent pas l'Uranium dans les ressources énergétiques fossiles et que la définition des minéraux industriels varie selon les auteurs.

Tableau 3 : Typologie des différents types de ressources d'après deux classifications

			Classification (Krausmann et al., 2009)	*Ressources*	*Classification* (EUROSTAT, 2013)	*Ressources*
// ressources physiques Matières premières	Ressources non renouvelables // épuisables // extractives // abiotiques	Matières premières minérales (MPM)	Minerais métalliques et minéraux industriels (*Ores and industrial minerals*)	Métaux (Tableau 6), et minéraux industriels	Ressources métalliques// métaux	Voir Tableau 6.
			Matériaux de construction d'origine minérale (*Construction minerals*)	Pierre concassée, sable et gravier	Ressources minérales non métalliques	Matériaux de construction, minéraux industriels, bitumes naturels, pierres précieuses et semi-précieuses, etc.
		Ressources énergétiques fossiles // hydrocarbures	-- (*Fossil energy carriers*)	Charbon, schiste et sable bitumineux, pétrole, gaz, tourbe	--	Charbon, schiste et sable bitumineux, pétrole, gaz, tourbe
	Ressources renouvelables //biotiques		Biomasse (*Biomass*)	Ressources agricoles (cultures, résidus de cultures, fourrages), sylvicoles	Biomasse	Ressources agricoles (cultures, résidus de cultures, fourrages), sylvicoles, halieutique

// ce symbole indique les termes qui sont des synonymes dans ce contexte (désignent les mêmes ressources)

-- ce symbole indique que les sous-catégories de ressources énergétiques ne sont pas développées

Tableau 4 : Définition des différentes sous-catégories de ressources non renouvelables et renouvelables

Terminologie commune	Source	Description
Ressources énergétiques fossiles	(EUROSTAT, 2013; Krausmann et al., 2009)	La plupart des classifications considèrent cette catégorie comme un synonyme d'hydrocarbures : charbon, schiste et sable bitumineux, pétrole, gaz, tourbe. L'Uranium est classé comme un métal.
Matières premières minérales		Ressources non renouvelables autres que les ressources énergétiques fossiles. Abréviation : MPM
Ressources minérales métalliques	(EUROSTAT, 2013)	Ressources minérales qui sont extraites pour la production de métaux.
Métaux		La définition physique : corps conducteur de l'électricité et de la chaleur, malléable et ductile et réfléchissant la lumière. La thèse prend une acception plus large du terme métal, comprenant les métalloïdes.
Ressources minérales non métalliques	(EUROSTAT, 2013)	Toutes les MPM qui ne sont pas extraites pour la production de métaux : matériaux de construction d'origine minérale, utilisations pour l'agriculture (comme le phosphate), ou pour des procédés industriels (kaolin, talc, feldspath, silice, etc.), les pierres ornementales, précieuses et semi-précieuses.
Minéraux industriels	(Arbogast et al., 2011; Krausmann et al., 2009)	Selon les définitions : synonyme de ressources minérales non métalliques (Arbogast et al., 2011) ou certaines définitions (Arndt, Ganino, & Allègre, 2010; Krausmann et al., 2009) exclues les matériaux de construction, les pierres ornementales, précieuses et semi-précieuses.
Biomasse	Eurostat 2013	La biomasse comprend des matières organiques non fossiles d'origine biologique. La biomasse qui n'est pas considérée comme de la biomasse "extraite" : celle issue d'animaux issus d'élevages, et de plantes issues de l'aquaculture.

2.1.2. Une industrialisation basée sur la consommation de ressources non renouvelables

Nous avons vu que la différence entre les ressources non-renouvelables et renouvelables est caractérisée par un taux de renouvellement de la ressource plus ou moins rapide. Au-delà de cette considération sur le plan biophysique, il est intéressant de noter qu'il existe également des différences entre ces ressources par rapport à l'épuisement économique de la ressource. La thèse néo-hotellinienne d'un progrès technologique accompagnant la croissance et diminuant la consommation de ressources a été expliquée dans le paragraphe 1.4. Cette thèse se traduit notamment par une diminution de l'intensité matérielle (consommation intérieure apparente de matières/PIB) au fur et à mesure que le PIB augmente (Nordhaus et al., 1973) Les travaux de Krausmann (Krausmann & Eisenmenger, 2014; Krausmann et al., 2009, 2016) montrent que si cette diminution de l'intensité matérielle est caractéristique de l'évolution de l'exploitation des ressources renouvelables (ou biotiques, voir Tableau 3), aucune diminution de cette intensité n'est observable à l'échelle mondiale pour les ressources non renouvelables depuis le début de l'industrialisation (deuxième moitié du XIXème siècle) comme le montre la Figure 2.

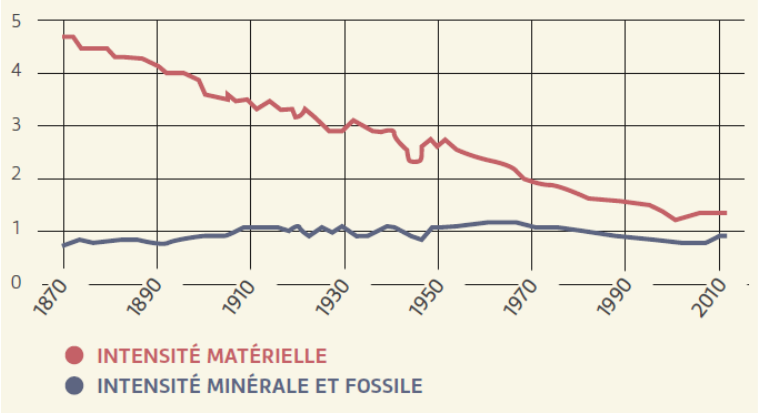


Figure 2 : Quantité de matières (en kg) nécessaire pour produire un dollar (PIB en dollar international constant de 1990). Source : Krausmann & Eisenmenger, 2014

Ces différences d'évolution s'expliquent par le phénomène d'industrialisation qui a lieu depuis le XIXème siècle. Ainsi, pendant les 10 000 ans qui précèdent la révolution industrielle, la consommation de matières premières (biomasse, énergies fossiles, minerais métalliques et industriels, minerais pour le bâtiment) augmente-t-elle. Cependant, 90% de la masse des matières premières consommées au cours de cette période reste composée de biomasse, car cette augmentation est due à l'adoption progressive de l'agriculture, en particulier de l'élevage (Krausmann et al., 2014). Les révolutions industrielles du XVIIIème et XIXème siècle vont bouleverser ces modes de consommations et de productions des matières premières. Tout d'abord, la première révolution industrielle débute en Angleterre vers 1760 avec l'invention de la machine à vapeur par James Watt. Les applications industrielles de la machine à vapeur permettent une augmentation considérable de la force de travail et donc de la productivité. Ceci est particulièrement remarquable dans les mines et les hauts fourneaux fabriquant la fonte et l'acier (mélanges de fer et de carbone) dont l'industrie a besoin. Ce développement est concomitant des débuts du chemin de fer dont les trains et les rails consomment une partie de l'acier et du charbon produit. Ainsi, à la fin de la première moitié du XIXème siècle, 10 000 kilomètres de voies ferrées ont été mises en place en Angleterre. L'apparition de nouveaux moyens de transport induit une accélération des échanges. Cette révolution augmente donc conjointement les besoins de l'industrie en matières premières minérales et la capacité de production de ces matières premières minérales. En 1850, la plupart des pays européens ont rejoint le modèle industriel britannique et la consommation annuelle de matières premières mondiale a doublé en 50 ans pour atteindre 4 milliards de tonnes. Cependant, l'économie mondiale repose encore majoritairement sur la biomasse qui représente 80% de la consommation de matières premières (Krausmann et al., 2014).

Pendant la seconde moitié du XIXème siècle avec le développement de l'électricité et du moteur à explosion, l'industrialisation s'intensifie dans les économies européennes et aux États-Unis. Cette intensification est due tout d'abord à une démultiplication des moyens de transports. Ainsi, en Europe et en Amérique du Nord, c'est la période d'un grand développement du chemin de fer, avec en 1870 l'Allemagne et l'Angleterre qui comptent environ une vingtaine de milliers de kilomètres de chemin de fer. En 1869, la première automobile avec moteur à explosion fait également son apparition, dont le développement de l'utilisation est lié à celui de l'exploitation industrielle du pétrole (premier puits en 1859). De plus, c'est le début du développement des moyens de communication, réclamant là encore l'usage de métaux, comme le cuivre pour le télégraphe. Ainsi, la première ligne du télégraphe électrique est construite en 1843 aux États-Unis, et l'essor a lieu dans le reste du monde après 1850. En 1896, la télégraphie sans fil apparaît. Les lignes de communication sont donc été établies entre les continents. Ceci va influencer les échanges et notamment au niveau de la fixation des prix. En effet, dans la seconde moitié du XIXème siècle, le Royaume-Uni n'est plus auto-suffisant pour les métaux, bien qu'il soit toujours le fleuron de l'industrie de l'acier, et doit donc

importer des tonnages importants de l'étranger. Les négociants en métaux sont confrontés à un risque financier important, car l'importation se fait depuis des destinations lointaines à intervalles irréguliers. Avec le développement du télégraphe, les commerçants peuvent désormais anticiper le moment de l'arrivée d'une cargaison et c'est l'invention des "*forward contracts*", c'est-à-dire que les acheteurs et vendeurs s'engagent pour l'échange d'une quantité déterminée de produit à une date ultérieure donnée à un prix fixé au moment du contrat (OMC, 2010), se protégeant ainsi contre une baisse des prix au cours du voyage. C'est ce qui donnera plus tard la mise au point des marchés à terme. En 1869, l'ouverture du canal de Suez a réduit le délai de livraison de l'étain depuis la Malaisie pour correspondre parfaitement à celui de trois mois du cuivre du Chili. Cela donne lieu à la mise en place du système unique de la LME basé sur une échéance du contrat à trois mois, avec une *livraison journalière, c'est-à-dire pouvant être fixée n'importe quel jour ouvrable*. Comme le commerce des contrats à terme de métaux augmente rapidement pour répondre à la demande croissante de l'industrie britannique, de plus en plus de commerçants participent au commerce et ils structurent ce marché en 1877 pour former la "Metal Market and Exchange Company ", c'est la naissance du marché "London Metal Exchange"(Mouak, 2010).

L'utilisation du charbon, des métaux et des minéraux de constructions bondit donc au cours de ce demi-siècle et la part de la biomasse régresse pour ne plus couvrir que 75% des besoins matériels (Krausmann et al., 2014).

Tout au long du XXème, l'augmentation de la consommation de matières premières minérales se poursuit, et accompagne la mise en place du libéralisme et du consumérisme. Ainsi, l'extraction totale de matières premières a-t-elle augmenté d'un facteur 8 de 1900 à 2005, passant d'environ 7 milliards de tonnes produites par an à près de 60 milliards. La plus forte augmentation au cours de cette période est celle observée pour les minéraux de construction, dont la production a été multipliée par 34, suivie de près par la production de minerais métalliques et minéraux industriels dont la production a été multipliée par 27. Alors que la production de biomasse n'a augmenté que d'un facteur 3,6. Pourtant, sur la majeure partie du XXème siècle, la production de biomasse était la plus importante en termes de masse parmi les quatre types de matières premières, et c'est seulement dans les années 1990 qu'elle a été dépassée par les minéraux de construction (voir Figure 3) dont la consommation a été multipliée par 34, et celle des minéraux industriels et métalliques qui a été multipliée par 27 (Krausmann et al., 2009).

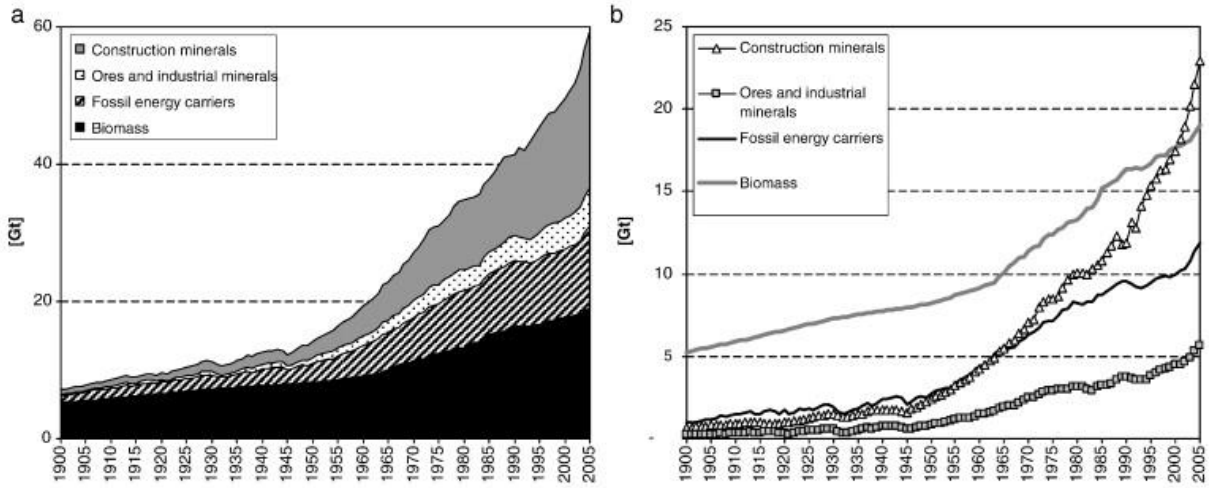


Figure 3 : Consommation totale des matières premières en Gigatonnes par an. Source : Krausmann et al., 2009

Les différentes catégories de ressources liées à ces graphiques sont présentées dans le Tableau 3

Krausmann note que « lorsque le rythme de développement industriel s'accélère durant le demi-siècle qui suit la Seconde Guerre mondiale, la part de la biomasse dans l'utilisation de matières chute [à nouveau] et finit par atteindre environ 30 % en 2010 » (Krausmann et al., 2014).

En effet «l'utilisation de matières repart à la hausse durant la première décennie du XXIème siècle au rythme sans précédent de 2,2 % par an. » (Krausmann et al., 2014). Les années 2000 ont marqué un tournant quant à l'évolution de l'intensité matérielle qui a augmenté (voir Figure 4) pour la première fois depuis les années 1950.

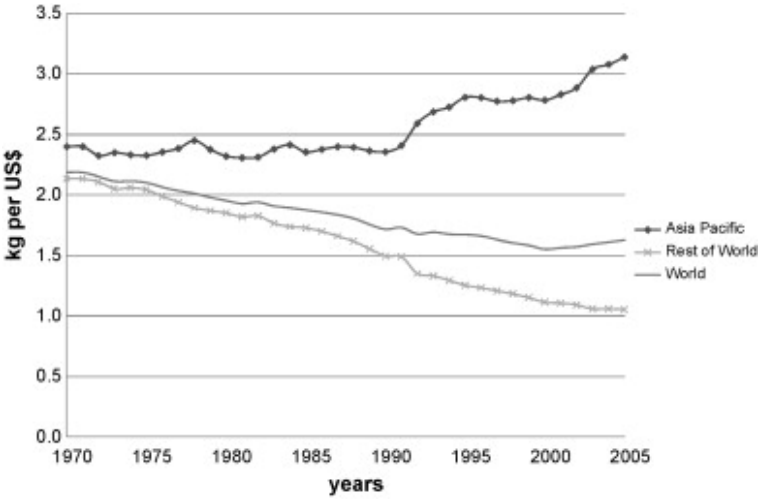


Figure 4 : Intensité matérielle (les ressources prises en compte étant biomasse, métaux, minéraux industriels et de construction, ressources énergiques fossiles), en dollars US constants 2000, basés sur le taux de change. Source : Schandl &West, 2010

Un exemple frappant de cette augmentation brutale pour les métaux est celui du fer, dont le minerai présente les plus forts tonnages de l'extraction métallique au niveau mondial, avec un taux de production annuel pour 2014 de près de 2 milliards de tonnes pour environ 1 milliard de tonnes au début des années 2000, et moins de 200 millions au début du XXème siècle (Figure 5).

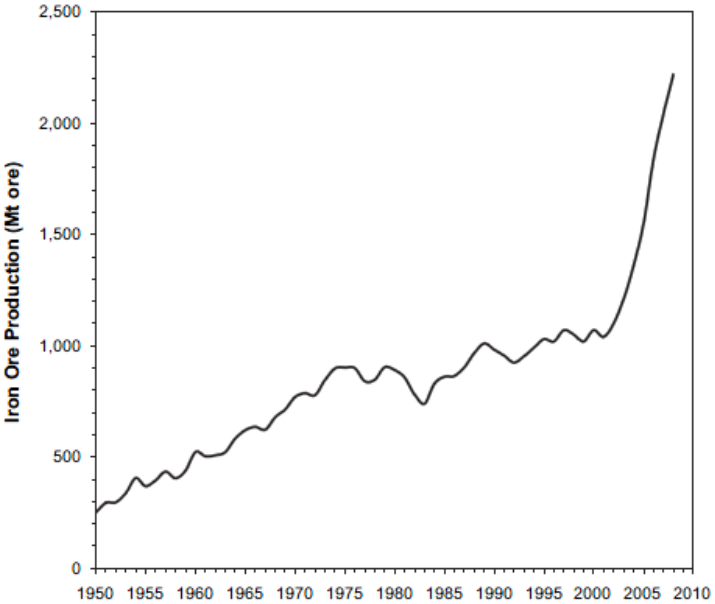


Figure 5 : Production de minerai de fer mondiale en million de tonnes. Source : Yellishetty et al., 2011

Philippe Bihouix dans son ouvrage « Quel futur pour les métaux », résume ainsi ce phénomène d'accélération : pour des taux de croissances similaires à ceux des dernières décennies, la quantité de métaux produite mondialement dans les vingt ou trente prochaines années serait plus importante que pendant toute l'histoire de l'humanité (Bihouix & de Guillebon, 2010).

Ainsi, ce paragraphe a-t-il montré que la chute de l'intensité matérielle est attribuable aux ressources renouvelables et que la croissance du PIB a toujours été corrélée avec la consommation de ressources non renouvelables. En effet, les travaux de Krausmann et al. montrent notamment que contrairement à la consommation des ressources agricoles, qui a été dans une certaine mesure découplée de la croissance du PIB, le rapport entre la consommation de ressources minérales et la croissance est resté stable depuis 1870 (Krausmann et al., 2016). L'intensification de la production a été particulièrement remarquable pour les matériaux de construction suivie de près par les minéraux industriels et les métaux. Enfin, il semblerait que depuis les années 2000 l'intensité matérielle mondiale soit en augmentation. Ces observations semblent écarter l'hypothèse pour les métaux d'un progrès technologique permettant de diminuer l'utilisation des ressources qui serait inhérent à la croissance.

2.2. Les ressources énergétiques fossiles, les métaux et l'interdépendance des exploitations

Skinner remarquait déjà il y a 40 ans l'interdépendance entre les différentes ressources concernant la question de l'épuisement : « nous nous fourvoyons […], si nous nous préoccupons uniquement de l'énergie. Les différentes utilisations des ressources naturelles sont imbriquées. Le pétrole est de peu d'utilité sans machines construites en fer, cuivre, zinc, et autres métaux. […] L'incapacité à fournir une ressource en particulier va inévitablement influencer d'autres ressources. En prêtant attention à la diversité des ressources naturelles, nous voyons qu'une catégorie, les métaux, occupe une position unique. Sans les métaux nous ne pourrions pas construire de machines pour remplacer les muscles humains. Sans les métaux nous ne pourrions utiliser qu'une infime partie de l'énergie disponible. Les métaux sont les enzymes de l'industrie» (Skinner, 1976). En effet, ce paragraphe montre que les métaux sont indissociables de la question énergétique : d'une part ils sont utilisés pour la production d'énergie (qu'elle soit conventionnelle, non conventionnelle, ou renouvelable) et d'autre part les filières métallurgiques sont elles-mêmes de grandes consommatrices d'énergie, essentiellement d'énergie fossile.

Tout d'abord, il est à noter que l'extraction pétrolière nécessite des métaux. Ainsi d'après le rapport 2014 (Annexe C de Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014) de l'Union européenne sur les matières premières minérales critiques (voir Tableau 6 pour la définition de ce terme), les métaux d'importance dans l'industrie pétrolière sont : le molybdène, le niobium, les platinoïdes, le rhénium, les terres rares. Les minéraux industriels utilisés sont la barytine, la bentonite. Comme le montre le Tableau 5, la plupart des métaux utilisés sont très peu substituables dans l'usage qu'en fait l'industrie pétrolière (la note de substituabilité établie par l'UE va de 0 à 1, 1 étant le moins substituables), autrement dit ils sont quasi irremplaçables. De plus, l'industrie pétrolière utilise également les métaux habituels aux installations industrielles (équipements, infrastructures, etc.) : acier, nickel, cuivre, titane, chrome, molybdène, etc.

Tableau 5 : MPM utilisées dans la production du pétrole. Source : Ad-hoc Working Group on defining critical materials, 2014

		Part de la production utilisée dans l'industrie pétrolière	Usage	Substituabilité
Métaux	Molybdène	18%		1
	Niobium	24%	acier des pipelines	0,7
	Platinoïdes	1%	raffinerie	1
	Rhenium	2%	raffinerie	1
	Terres rares légères	14%	FCCs *(fluid cracking catalysts)*	1
Minéraux	Barytine	95%	Fluides de forage	1
	Bentonite	2%	Fluides de forage	0,7

Il existe une dépendance des énergies renouvelables aux métaux. Ainsi, le programme des nations unies pour l'environnement (PNUE) notait-il en 2016 une utilisation de métaux importante pour les éoliennes et les panneaux photovoltaïques (Hertwich et al., 2016). Le rapport montre également que les centrales solaires thermodynamiques et que l'énergie hydraulique sont des énergies consommatrices de fer. La Figure 6 résume ainsi les besoins en ressources des différents types d'énergie : les ressources énergétiques fossiles ont une forte demande cumulée en énergie non renouvelable (CED) et de faibles besoins en matériaux en vrac, contrairement aux énergies renouvelables.

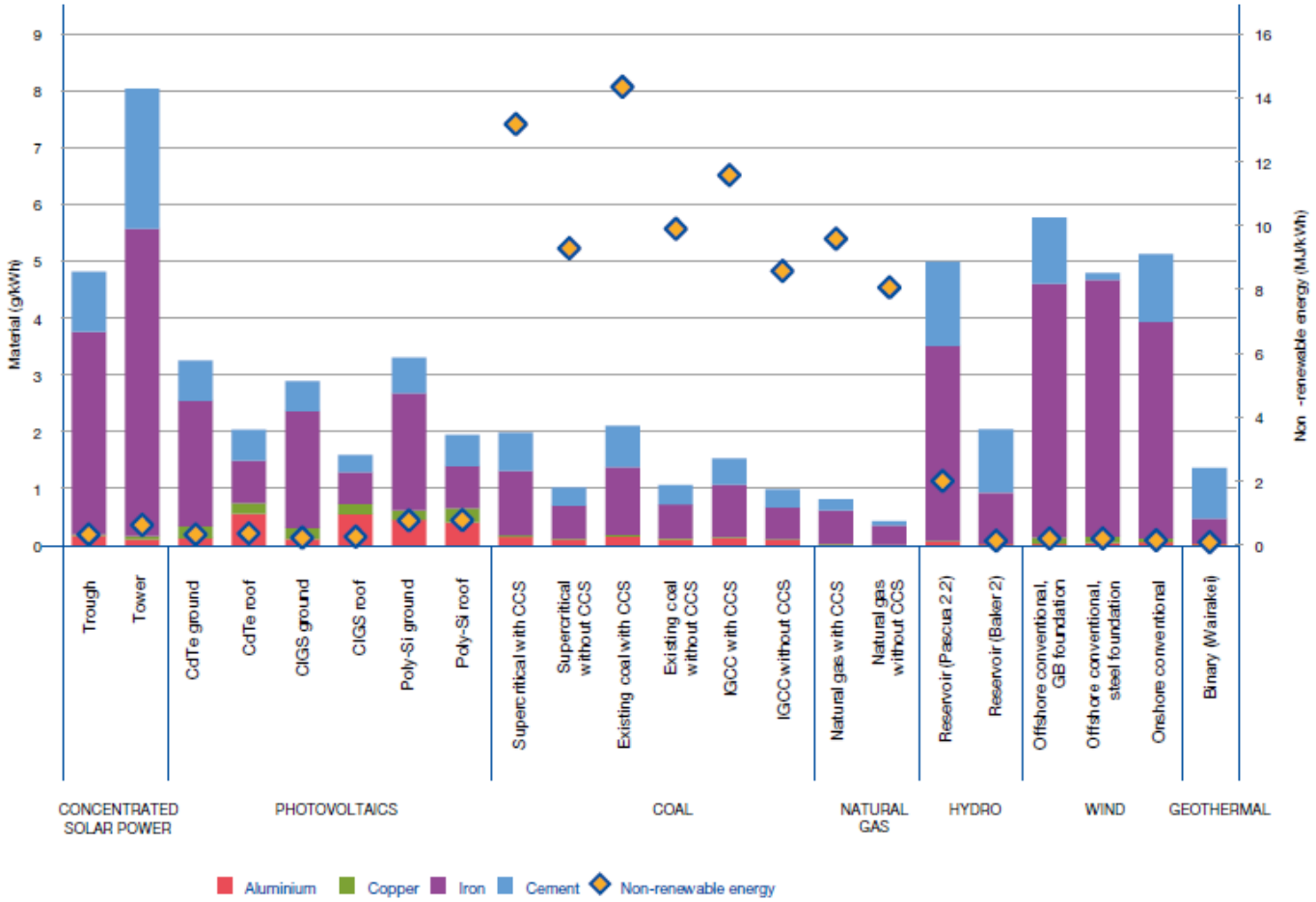


Figure 6 : Besoins en matières premières et en énergie non renouvelable par unité de puissance produite. Source : Hertwich et al., 2016

À gauche la quantité de MPM en g/kWh et à droite la demande cumulée en énergie non renouvelable en MJ/kWh

Enfin, en ce qui concerne la dépendance de la production de métaux aux énergies fossiles, il est important de souligner que l'immense majorité de l'énergie nécessaire à l'exploitation minière et au traitement des minerais est pourvue par des ressources énergétiques fossiles, comme c'est le cas en général pour l'industrie. Nuss et Eckelman qui ont publié un article (Nuss & Eckelman, 2014) sur les impacts environnementaux des métaux soulignent que la demande énergétique de la production métallique est très fortement liée à la production de gaz à effet de serre du fait d'une énergie principalement fournie par des énergies fossiles. Dans un rapport de l'agence internationale de l'énergie (IEA) est ainsi indiqué que l'industrie représente environ 30% de la demande mondiale d'énergie et que cette énergie est fournie à 90% par des ressources énergétiques fossiles (Philibert, 2017). De plus, les contributions (directe et indirecte) du secteur minier et métallique en 2008 aux émissions mondiales de gaz à effet de serre étaient-elles estimées par Nuss et Eckelman à 3,4 Gt CO_2-eq/an et l'utilisation d'énergie primaire à 49 EJ/an, soit 9,5% de la demande mondiale en énergie primaire (Nuss & Eckelman, 2014), la filière de l'acier représentant environ 70% de cette demande. L'estimation de l'IEA pour l'utilisation d'énergie primaire sur la même période étant plus faible : 35 EJ/an, mais représente tout de même 6,8% de la demande mondiale (Nuss & Eckelman, 2014). De plus, il s'agit d'une estimation de la mine au métal, qui n'inclut pas le transport des métaux affinés, l'utilisation de ces métaux dans l'industrie et leur potentiel recyclage. Concernant le transport, le commerce de matières premières minérales génère un transport très important, lui aussi fonctionnant grâce à des ressources énergétiques fossiles. Ainsi, de « 1950 à 2010, le volume des exportations [de ressources] passe de 0,9 à 10,6 Gt/an. Le commerce croît beaucoup plus vite que l'extraction et la part des matières exportées fait plus que doubler, de 7 % à 16 %. En 2010, environ

40 % de tous les combustibles fossiles, métaux et minéraux industriels extraits ont traversé une frontière internationale » (Krausmann et al., 2014).

Tableau 6 : Typologie des différentes catégories de métaux

Catégorie	Source	Description	Sous-catégories	MPM concernées (en gris les ressources non métalliques)			
MPM critiques	(Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014)	MPM dont le risque d'une pénurie économique européenne, et l'impact économique sont élevés : 1) Risque d'approvisionnement : stabilité politique et économique des pays producteurs où la production est concentrée, substituabilité, et taux de recyclage UE. 2) Impact économique : la somme des valeurs ajoutées des secteurs utilisant cette ressource pondérée par la part relative de ce secteur dans l'utilisation de la ressource. L'appellation « stratégique » est réservée au secteur militaire		Be	Borates	Charbon coke	Co
				Cr	Fluorine	Ga	Ge
				Graphite	In	Magnésite	Mg
				Nb	PGM	Phosphates	Sb
				Silice	Ta	TR	W
Grands métaux industriels	(Bihouix & de Guillebon, 2010; Intervention C. Hocquard in Kert & Birraux, 2011)	Métaux exploités à plus d'un million de t/an. Sont également souvent classés comme tels ceux à plus de 200 000 t/an (Sn, Mg, Mo). Le chiffre d'affaire de leur exploitation est très élevé. Ils sont majoritairement utilisés dans la construction, les équipements mécaniques et électriques. Les métaux ferreux sont utilisés majoritairement dans le secteur de l'acier. Ces métaux (à part Mo), étaient déjà utilisés avant les années 1970.	Métaux ferreux	Cr	Mn	Mo	Ni
				Fe	Si		
			Métaux de base	Al	Co	Cu	Mg
				Pb	Sn	Zn	Ti
Métaux précieux et petits métaux	(Arndt et al., 2010; Bihouix & de Guillebon, 2010; Hocquard & Lefebvre, 2015)	Métaux d'une grande valeur économique. Cette catégorie est fluctuante selon les époques.	Métaux précieux	Ag	Au	PGM	
		La catégorie des petits métaux est constituée par tous les autres éléments métalliques. Elle présente un tonnage, et donc un « chiffre d'affaires très faible », mais une forte valeur ajoutée et une grande importance économique, « en particulier pour les nouvelles filières industrielles » (usage dans l'électronique, les énergies renouvelables, etc.). Ces métaux sont pour beaucoup d'usage récent (sauf W, Hg, Bi, Sb,...), c'est-à-dire postérieur aux années 1970, et présente des gisements de teneurs plus faibles que les grands métaux industriels. Sont utilisé de manière quasi synonyme les appellations : rares, mineurs, high-tech, verts, exotiques, technologiques.	Petits métaux	Be	Bi	Cd	Co
				Ga	Ge	Hf	Hg
				In	Li	Nb	Re
				Sb	Sr	Ta	Tl
				Te	TR	V	W
				Zr			

Les catégories sont variables d'un auteur ou d'un organisme à l'autre : par exemple le niobium (Nb) et la vanadium (V) sont souvent classés dans les métaux ferreux, car ils sont très utilisés pour produire des alliages, mais ils sont classés dans les petits métaux ici, car leur production est inférieure à 200 000 tonnes par an.

2.3. Les métaux : des usages non énergétiques en expansion

Nous avons vu que les métaux font partie des ressources non renouvelables, ressources dont l'usage a augmenté depuis le XIXème siècle et qui est très fortement corrélée à la croissance du PIB. Nous avons également vu qu'il y avait une certaine interdépendance entre la production des ressources énergétiques fossiles et des ressources métalliques. Malgré l'existence de ces liens, la croissance des usages non énergétiques des matières premières depuis le début du XXème siècle fait des métaux une problématique spécifique, qui ne saurait être réduite à la seule question énergétique.

Le paragraphe 2.1 a déjà montré que la production et la consommation de ressources métalliques était en expansion en termes de volume. Il faut également souligner que la diversité des métaux employés croît également. En effet, le développement de la chimie industrielle lors des révolutions industrielles entraine la découverte de nouveaux métaux (zinc, aluminium, cobalt, nickel, manganèse, molybdène, titane, yttrium, chrome, tellure). Toutefois, la plupart de ces métaux ne seront utilisés à l'échelle industrielle qu'au XXème siècle (Mérenne-Schoumaker, 2014). Ainsi, depuis les années 1970, le nombre de métaux utilisés est passé de moins de vingt à une soixantaine, c'est-à-dire à l'ensemble des métaux et métalloïdes connus.

Cette augmentation de la diversité et de la quantité de métaux utilisés va de pair avec une augmentation des usages non-énergétiques des métaux. En effet, en « 1850, […] la plus grande partie des matières consommées le sont pour fournir de l'énergie, principalement de la biomasse sous forme de nourriture, de fourrage et de bois de chauffage. L'utilisation non énergétique des matières se limite à certains bois de construction, aux minéraux de construction et à une petite quantité d'autres minéraux. L'ensemble ne constitue pas plus de 20 % de toutes les matières utilisées. Pendant 150 ans, la consommation de minéraux augmente à un rythme beaucoup plus rapide que celle des combustibles, dont la part en tant que matières utilisées tombe à 40 % ». (Krausmann et al., 2014)

2.4. Les métaux : diminution des teneurs

Au-delà du débat sur la perception économique des réserves de ressources non-renouvelables, voire des stocks physiques de ressources restantes, difficilement évaluables, il existe des études s'intéressant à la qualité des ressources et à sa diminution au fur et à mesure de l'exploitation des ressources.

Concernant les ressources énergétiques fossiles, une étude sur la qualité des ressources au court du temps (Court & Fizaine, 2017) à travers la variation du taux de retour énergétique (en anglais *Energy return on investment* EROI)[13] montre que pour le pétrole et le gaz, le EROI diminue depuis les années 1940 environ et prévoit que celui du charbon commencerait à diminuer entre 2020 et 2050. Cette étude explique ces données par un modèle prenant en compte une déplétion des ressources (exploitation de ressources de qualité moindre au cours du temps) et l'atteinte de limites technologiques concernant l'amélioration de l'efficience de la production. Il est cependant à noter que les séries de données sur lesquelles se base cette étude sont des données de prix en l'absence de données disponibles sur les coûts réels de production ou d'énergie utilisée pour l'exploitation de ces ressources.

[13] Le taux de retour énergétique, ou EROI, est le ratio d'énergie utilisable acquise à partir d'une source donnée d'énergie, rapportée à la quantité d'énergie dépensée pour obtenir cette énergie.

Tableau 7 : Définitions des termes liés à la teneur

Terminologie commune	Source	Description
Stériles (*overburden, interburden*)	(EUROSTAT, 2013; Poulard, Daupley, et al., 2017)	Matériaux enlevés (en général, sols ou roches grossières) pour permettre l'accès au gisement, i.e. au minerai. On distingue : les terrains de recouvrement (stériles francs ou de couverture, *overburden*), les parties du gisement jugées insuffisamment riches d'un point de vue économique (stériles de sélectivité, *interburden*) ou un mélange des deux précédents (stériles mixtes).
Tout-venant, minerai brut (*Run of mine, gross ore, crude ore*)	(EUROSTAT, 2013; Poulard, Charles, & Kister, 2017)	Roche contenant des minéraux ou des substances utiles (comme les métaux) en proportion économiquement intéressante pour justifier l'exploitation, et nécessitant une transformation pour être utilisée par l'industrie. Le minerai est distingué des stériles de sélectivité par la teneur de coupure (*cut-off grade*, teneur minimale en dessous de laquelle l'exploitation n'est pas rentable), qui varie en fonction du prix, des coûts d'opération, etc. Ainsi, à l'échelle d'une exploitation, la limite du gisement est-elle changeante dans le temps et l'espace : tout comme la notion de ressource, la notion de minerai est une notion socio-économique.
Concentré (*Ore concentrate*)	(EUROSTAT, 2013; Poulard, Charles, et al., 2017)	Minerai ayant subi des étapes de concentration : le traitement du minerai, ou minéralurgie (*mineral processing*). La minéralurgie regroupe un ensemble de techniques de traitement physiques et physico-chimiques ayant pour objet d'obtenir des produits ayant une valeur commerciale et transformables par la métallurgie (transformation du concentré au métal ou en alliage).
Métal et teneur du minerai (*Net ore or metal content and grade*)	(EUROSTAT, 2013)	La teneur (généralement en g/t ppm) désigne la quantité de la substance recherchée contenue (*metal content or net ore*) dans le minerai brut extrait : Teneur = quantité métal dans le minerai / minerai brut

Concernant, les ressources métalliques, il existe des études se basant directement sur les données minières. Les ressources métalliques sur lesquelles la baisse de qualité des ressources est la plus documentée sont les grands métaux industriels et les métaux précieux (voir Tableau 6), les petits métaux faisant pour la plupart l'objet d'une exploitation industrielle depuis seulement quelques dizaines d'années il est plus difficile de se défaire d'évènements ponctuels et d'avoir une vision des tendances de long terme. Ainsi, Mudd et Prior ont-ils documenté une tendance de long terme à la baisse des teneurs (voir Tableau 7) pour les minerais de nickel, de cuivre, de plomb, de zinc et d'or exploités en Australie depuis 1844, jusqu'en 2004 (voir Figure 7). L'intérêt d'un pays comme l'Australie pour compiler des données minières et suivre l'évolution des teneurs réside dans le fait

que c'est un pays où l'exploitation minière est très importante depuis « près de deux siècles » (G. M. Mudd, 2007a).

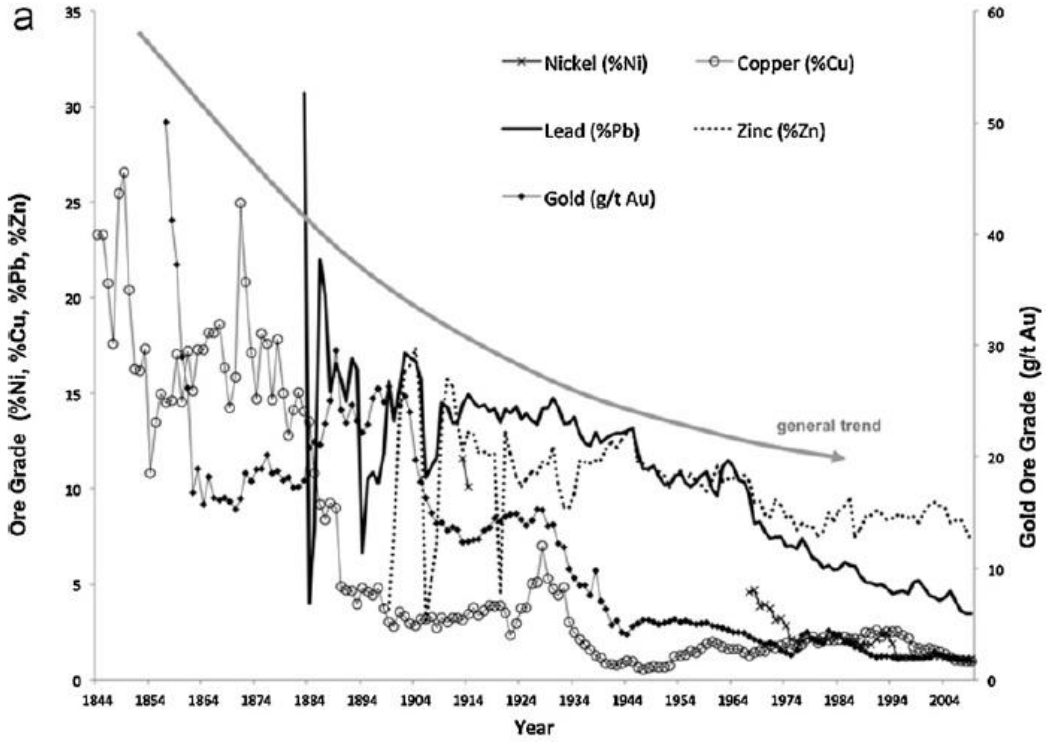


Figure 7 : Déplétion des teneurs de différents minerais depuis 1834 en Australie. Source : Prior, 2012

Les teneurs du minerai en or sont données sur l'axe de droite en ppm, les autres teneurs sont données en % à gauche

La question de la possibilité de généraliser ces résultats à l'échelle mondiale se pose donc. L'étude des tendances pour les minerais aurifères pour différents pays (Figure 8) montre un déclin des teneurs pour l'ensemble des pays. De même une étude portant sur la production du Nickel (Gavin M. Mudd, 2010) montre que les teneurs des minerais diminuent pour les principaux pays producteurs étudiés (Russie, Canada et Australie qui représentaient 50% de la production mondiale dans les années 1980 et environ 40% aujourd'hui). Pour Mudd (Gavin M. Mudd, 2010), la croissance continue de la production du Nickel a été notamment permise par le développement de technologies métallurgiques au Canada et en Nouvelle-Calédonie. Les ressources aux sens économiques du terme n'ont donc cessé de s'accroître au cours du XXème siècle suggérant que la notion de « pic de Nickel » au sens où on l'entendrait pour le pétrole n'est pas un concept réaliste. Ces études permettent donc d'étayer l'hypothèse d'un déclin généralisé des teneurs au fur et à mesure de l'exploitation des ressources métalliques.

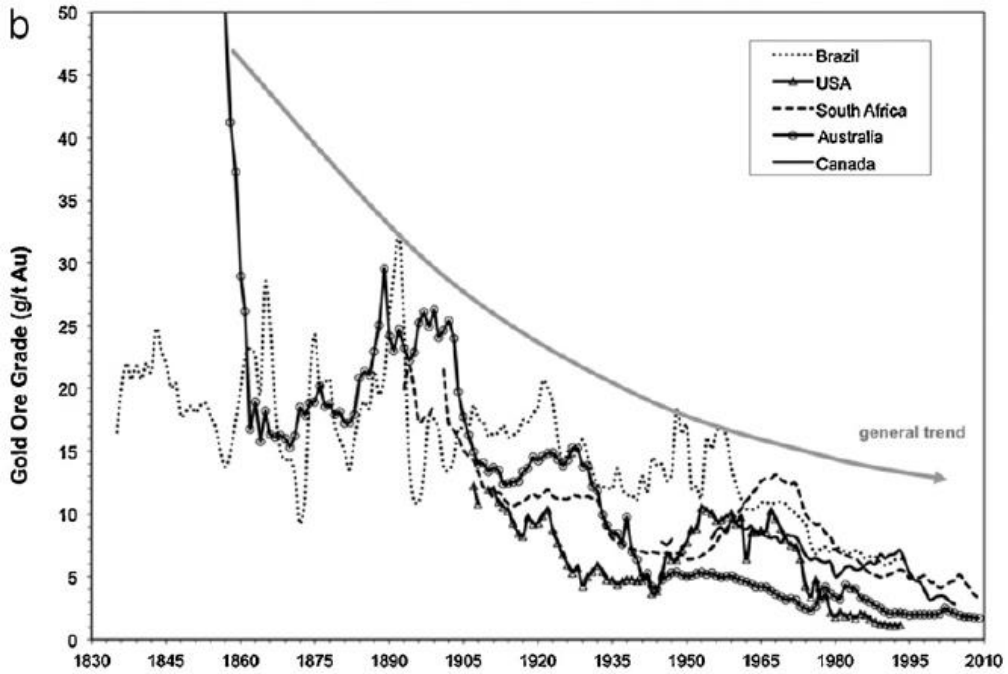


Figure 8 : Déplétion des teneurs de minerais aurifères dans différents pays du monde depuis 1830 Source : Prior et al., 2012

Cela permet donc de voir quel effet peut avoir sur la qualité des ressources une production intense et prolongée : « dans beaucoup de cas, les minerais de haute qualité ont largement été exploités, et il reste les minerais dont le traitement industriel est plus complexe » (Prior et al., 2012). Certains auteurs ont une interprétation différente du déclin des teneurs et pensent que c'est justement « le progrès technologique au niveau de l'extraction et du traitement qui a permis l'exploitation des ressources à une teneur plus faible que ce qui était possible avant. Par conséquent la taille des mines a augmenté […] baissant effectivement la teneur moyenne des mines » (West 2010 in Prior et al., 2012). Le progrès technologique évoqué fait référence au passage massif pour l'exploitation des grands métaux aux mines à ciel ouvert en lieu et place des mines souterraines. Ces deux formulations de la problématique de l'épuisement rappellent d'une part celle de Jevons expliquant que les ressources de bonnes qualités sont exploitées en priorité (ce qui est basé sur l'observation de la façon de procéder à l'échelle d'une mine) et d'autre part le modèle fonctionnel de Zimmermann, pour qui l'exploitation des ressources de basse qualité (plus nombreuses) est permise par les avancées technologiques. Cependant, dans un cas comme dans l'autre la conséquence matérielle des exploitations successives est bien la diminution des teneurs. La distinction entre ressource économique et ressource physique (Tableau 1) établie au paragraphe 1.4, peut ainsi commencer à être caractérisée: si le stock de ressources économiquement exploitables (selon les termes de l'ENC) grandit au fur et à mesure de l'exploitation et du progrès technologique, le stock de ressources physiques est lui caractérisé par un déclin en terme de qualité de ressources se traduisant par une diminution des teneurs.

2.5.Le recyclage et ses limites physiques

Les métaux se caractérisent donc par une forte expansion de la production et une diversification des usages. L'augmentation de la production, provoque une augmentation des stocks économiques des ressources (notamment des réserves estimées) et une diminution de la qualité des ressources physiques au niveau des mines (teneurs). Analyser l'évolution du stock physique des ressources métalliques demande également de se pencher sur une de leur caractéristique spécifique : les métaux en usages constituent des gisements secondaires (voir Tableau 8).

Tableau 8 : Définitions des termes liés aux gisements métalliques issus du recyclage

Terminologie commune	Source	Description
Ressources primaires	(Graedel, 2010)	Métaux issus de l'approvisionnement primaire : l'exploitation minière.
Ressources secondaires	(Graedel, 2010)	Tous les métaux entrés dans l'économie mais qui ne sont plus en usage et peuvent être réutilisés ou recyclés. Ces métaux constituent donc des stocks de métaux « en usage » que l'on peut également qualifier de gisement secondaire. L'approvisionnement en ressource non renouvelable issu de l'exploitation de ces gisements se nomme approvisionnement secondaire.

En effet, contrairement aux hydrocarbures, les métaux ont de nombreuses utilisations non destructives, ils peuvent donc être réutilisés ou recyclés (Figure 9). De ce fait la quantité totale de ressource physique exploitée jusqu'à aujourd'hui ne peut être totalement assimilée au stock physique épuisé.

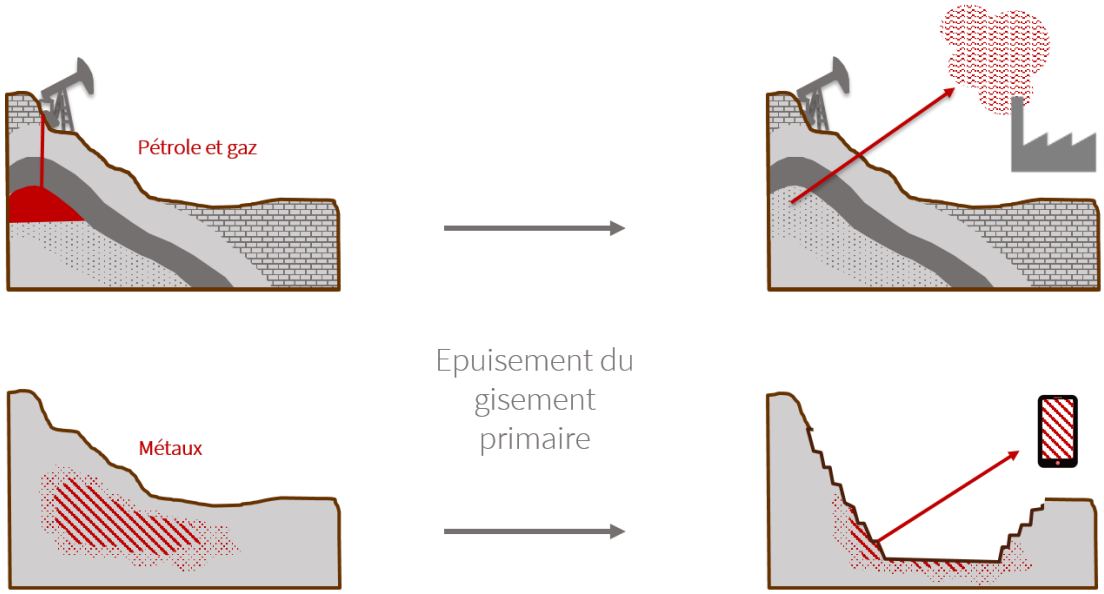


Figure 9 : Épuisement du gisement primaire pour les ressources énergétiques fossiles et les métaux. Source : autrice, d'après éléments graphiques ISF SystExt, 2014

Pour les métaux, le problème de l'épuisement des ressources ne se limite pas à l'exploitation des gisements géologiques, mais est également affecté par la capacité de l'humanité à organiser le système productif pour rendre les ressources métalliques exploitables dans les produits en fin de vie. Ainsi, le recyclage fait-il partie intégrante des procédés de production quasiment depuis la découverte des métaux (Bihouix & de Guillebon, 2010, p. 45). Evaluer l'épuisement des ressources métalliques demande donc de regarder toute la chaîne de l'amont jusqu'à la fin de vie et en particulier les possibilités de recyclage : « la catégorie des métaux, représente un stock utile qui devrait être étendu par leur réutilisation après l'extraction initiale.

Cependant il est à noter que selon le principe d'équivalence entre masse et énergie, l'entropie nous certifie que l'épuisement aura toujours lieu » (Schulze, 1974). Le recyclage d'un métal ou d'un matériau à 100% est physiquement impossible : il y aura toujours des usures et des pertes (Ayres,

1997; Ekins et al., 2017; Graedel, 2010; Labbé, 2013). Comme le souligne Schulze, l'impossibilité du recyclage à 100% découle du second principe de la thermodynamique. Ce principe stipule que toute transformation réelle s'effectue avec création d'entropie, ce qui signifie que toutes les transformations réelles sont irréversibles. Parmi les causes d'irréversibilité existent : la tendance à l'homogénéisation de la matière (d'un point de vue de la densité, de la température, etc.), les phénomènes dissipant l'énergie comme les frottements, la réorganisation spontanée de la matière notamment via les réactions chimiques. Les métaux ayant des temps de résidence[14] dans le stock en usage relativement longs, des phénomènes spontanés conduisent à des pertes de matière avant la fin de vie des produits : la tendance à l'homogénéisation de la matière conduit à l'érosion des matériaux qui se trouvent ensuite à des concentrations infinitésimales dans la biosphère ou l'atmosphère, et des réactions chimiques ont lieu comme les réactions d'oxydations (la rouille pour le fer).

Les difficultés liées à des aspects thermodynamiques sont également présentes dans les différents procédés du recyclage. Elles se traduisent par des pertes d'énergie, de qualité, et de matière :

- Ainsi, toute activité est-elle accompagnée d'une dissipation énergétique (Patrick Wollants Appendix 2 in Worrell & Reuter, 2014). D'un point de vue global, il y a donc perte d'énergie et donc de ressources non renouvelables au cours du recyclage, puisque le paragraphe 0 a montré l'interdépendance des ressources métalliques et énergétiques.

- La perte de qualité dans le recyclage des métaux est souvent due à la difficulté d'obtenir le matériau pur. En effet, la tendance à l'homogénéisation du second principe de la thermodynamique se traduit notamment par un procédé spontané de mélange de différents composants (Patrick Wollants Appendix 2 in Worrell & Reuter, 2014). « Ces combinaisons n'existent généralement pas dans les minerais à l'état naturel et les procédés métallurgiques comme la réduction ou l'affinage ne sont pas toujours en mesure de gérer ces combinaisons à causes de contraintes thermodynamiques » (Castro, Remmerswaal, Reuter, & Boin, 2004). Pour la plupart des grands métaux industriels cela induit des limites techniques pour le recyclage : « par exemple, il est plus difficile de contrôler le taux d'alliages dans le recyclage de l'acier que dans la production primaire » (Ekins et al., 2017). Or, les problèmes de contaminations produisent des alliages de basse qualité. Ceci est dû à des problèmes survenant au moment du refroidissement. Par exemple, la présence d'une contamination au fer dans l'aluminium induit des phénomènes de précipitation de composés pendant le refroidissement, endommageant les propriétés mécaniques de l'aluminium et compromettant son utilisation dans des applications technologiques. De même pour les contaminations au cuivre dans le recyclage du fer (Castro et al., 2004). De plus ces contaminations sont très dures à retirer, car certains éléments contaminants ont des liaisons interatomiques très fortes avec l'élément du mélange, ces interactions ayant tendance à être d'autant plus fortes que le contaminant est en faible quantité (Castro et al., 2004). « Or, les applications de haute qualité (comme l'acier ultra-haute résistance) requiert un contrôle strict de la composition de l'alliage […]. Ce qui a une conséquence en terme de qualité : « les aciers de haute technologie comme les aciers micro-alliés ne peuvent pas être recyclés dans leur matériau premier : ils ne peuvent qu'être recyclés pour des utilisations de moins bonne qualité (ou *down-cycled*) » (Ekins et al., 2017).

- Les contaminations ont aussi des conséquences en termes de pertes de matières : « durant le recyclage, les contaminants s'accumulent de manière irréversible dans plusieurs flux industriels et des métaux de haute pureté doivent être ajoutés pour diluer ces

[14]Le temps de résidence ou temps de séjour est le temps moyen qu'une substance demeure dans un stock donné. Il s'agit ici du stock de métal en usage dans la société (ou qui n'est plus en utilisation mais qui n'est pas encore rentré dans les filières de fin de vie).

contaminations. Dans cette situation l'utilisation des ressources n'est pas soutenable » (Allwood, 2014; Castro et al., 2004)

Enfin, du fait de leurs propriétés physiques les métaux ne présentent pas tous les mêmes pertes durant leur passage dans le stock en usage et dans le recyclage des produits en fin de vie. Notamment les métaux dits « nobles », parmi lesquels sont classés les métaux résistants à la corrosion et l'oxydation (les métaux précieux, le cuivre, le mercure et le rhénium), présentent des pertes moindres. Les procédés de réduction de ces métaux sont de plus moins énergivores que les autres métaux (Castro et al., 2004). Les métaux légers comme l'aluminium et le magnésium sont eux particulièrement sensibles aux contaminations (Castro et al., 2004).

Dans une société où la consommation de métaux reste constante, il est donc impossible d'assurer tout l'approvisionnement via le recyclage et les ressources métalliques restent donc des ressources non renouvelables sur le long terme : « ces ressources sont caractérisées par une disponibilité finie dans la croûte terrestre et sont donc épuisables, même en prenant en compte l'augmentation de la disponibilité au fur et à mesure que la qualité de la ressource décline et la possibilité du recyclage » (Schulze, 1974). Il y a aujourd'hui un large consensus parmi les chercheurs s'intéressant aux économies de ressources, comme le Groupe International d'Experts sur les Ressources[15] (GIER), et même parmi les états sur la hiérarchie entre les différentes stratégies à mettre en place dans la gestion des ressources (souvent résumée à la gestion des déchets) bien connue sous le nom de « la règle des 3R » : Réduire, Réutiliser, Recycler (Ekins et al., 2017). En effet, si le recyclage est seulement le 3ème pilier de cette règle, c'est « parce que la restructuration des matériaux dans les procédés de recyclage entraîne une pénalité en énergie et en ressources, et parce que tous les matériaux ne peuvent pas être facilement recyclés » (Gharfalkar et al., 2015 in Ekins et al., 2017). Pour Gharfalkar, il serait alors nécessaire de d'intéresser plus en détail à la réutilisation et de distinguer par exemple plusieurs catégories de réutilisations : réutiliser sans aucune opération telle qu'une réparation (par exemple, ventes d'occasion, etc.); réparer et réutiliser; remettre à neuf et réutiliser; reconditionner et réutiliser, remanufacturer et réutiliser toute autre opération suivie d'une réutilisation, par exemple remplissage et réutilisation "(Gharfalkar et al., 2015 in Ekins et al., 2017). Comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant, il existe également des problèmes économiques dans le développement du recyclage, qui limitent l'impact du recyclage en période de croissance et le développement de taux de recyclage élevés dans les filières actuelles.

2.6.Le recyclage et ses limites économiques

2.6.1. Le recyclage et la croissance

Les métaux demeurent dans le stock de matériaux en utilisation pendant plusieurs années, voire dizaines d'années, et la croissance de la consommation des métaux est forte (voir paragraphe 2.3). De ce fait, même s'il était possible de recycler à 100% (ce qui n'est pas le cas comme vu au paragraphe précédent) les métaux en fin de vie, cela ne permettrait pas un approvisionnement de la demande mondiale. En effet, l'exemple de l'acier de loin le matériau le plus recyclé au monde, éclaire les limites du recyclage face à la croissance : « au rythme actuel du développement de sa production-consommation de 3,5% par an au cours du XXème siècle, le taux de recyclage actuel au niveau mondial de l'ordre de 62% ne fait gagner à l'humanité qu'environ 12 années contre la raréfaction de la ressource en fer. C'est-à-dire que la consommation de minerai cumulée au cours du temps sera, en 2012, celle qu'on aurait connue en 2000 sans aucun recyclage. […] Amener, à l'échelle mondiale, le taux de recyclage à un niveau de 90% ne ferait gagner à l'humanité que 8 années supplémentaires. Ce n'est qu'au-dessous de 1 % de croissance annuelle de la consommation mondiale d'une matière première que l'effet positif du recyclage sur la ressource devient important. Il peut apporter alors sensiblement plus de 100 années de répit, à condition que le taux de recyclage soit très élevé (supérieur à 60-80%)» (Grosse, 2010).Même un recyclage de « 100 % des flux en fin de

[15] Un groupe d'experts scientifiques indépendant créé en 2007 par l'ONU pour aider les pays à utiliser les ressources naturelles de manière soutenable. Il est hébergé par le PNUE.

vie d'une matière première dont la consommation croît de plusieurs pourcents par an ne produit qu'un effet dérisoire à l'échelle de quelques décennies. Il n'est donc point d'économie circulaire qui n'inclue un ralentissement de la croissance matérielle et de l'accumulation » (Grosse F., « Économie circulaire » in Bourg & Papaux, 2015). Ou dit autrement « la clef pour une utilisation soutenable des métaux est d'en utiliser moins. Beaucoup moins » (Patrick Wollants Appendix 2 in Worrell & Reuter, 2014).

2.6.2. Le recyclage et l'organisation des filières de production

Les limites physiques du recyclage des métaux et l'impossibilité d'établir une économie complètement circulaire dans une économie en croissance n'expliquent cependant pas pourquoi le recyclage des produits en fin de vie est anecdotique, à l'exception des métaux précieux et des grands métaux industriels (Bihouix & de Guillebon, 2010; Graedel, Allwood, Birat, Buchert, Hagelüken, Reck, Sibley, & Sonnemann, 2011; Guyonnet et al., 2015). En effet, la Figure 10 montre que de nombreux métaux, c'est-à-dire presque l'ensemble des petits métaux, présentaient en 2011 des taux de recyclages inférieurs à 1%.

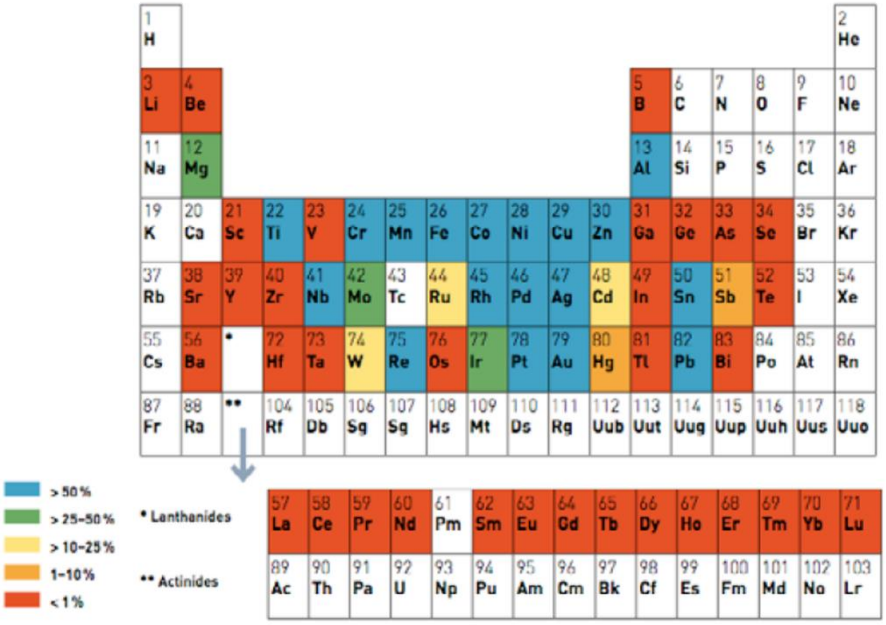


Figure 10 : Tableau périodique montrant les taux de recyclage fonctionnels moyens mondiaux en fin de vie (post-consommation) pour 60 métaux en 2011. Source :Ekins et al., 2017

Remarque: Le recyclage fonctionnel est un recyclage dans lequel les propriétés physiques et chimiques qui ont rendu le matériau désirable en premier lieu sont conservées pour une utilisation ultérieure. Les cases vides indiquent qu'aucune donnée ou estimation n'est disponible ou que l'élément n'a pas été traité dans le cadre de l'étude. Ces évaluations ne tiennent pas compte des émissions de métaux provenant des centrales au charbon.

Ces taux de recyclage excessivement bas s'expliquent par un certain nombre de choix techniques et économiques qui induisent des pertes à chaque étape des filières de production. Nous considérons ici comme pertes tout déchet de production ou tout métal contenu dans un produit en fin de vie qui n'est pas recyclé. En effet : « une fois mis en décharge, les métaux ne peuvent généralement pas être récupérés. […] Même si certains ont avancé que les décharges représentaient les mines du futur, la présence d'impuretés et la dilution ajoutent de la complexité à ces « minerais » et freine la récupération économiquement faisable des décharges […]. C'est pourquoi si nous voulons pouvoir exploiter les décharges dans le futur, les décharges doivent être conçues pour la récupération. […] Ce qui n'est actuellement pas le cas. » (Verhoef, Dijkema, & Reuter, 2004). C'est pourquoi, en se

basant sur les connaissances actuelles, nous considérons l'entrée en décharge comme une perte de matière.

Ainsi, les taux de recyclage sont-ils destinés à être limités dès la conception des produits utilisant des métaux : miniaturisation (dans l'électronique par exemple), dispersion (utilisation de l'antimoine comme retardateur de flamme), alliage (une dizaine de métaux utilisés comme additifs dans l'acier), conception de produits non aisément démontables (usage de colle) etc. Pour beaucoup de petits métaux qui sont utilisés en petite quantité dans les alliages et dans les applications électroniques l'énergie requise pour les séparer peut être significativement plus grande que celle des productions minières (Allwood, 2014). De même, la conception devrait inclure une réflexion sur les combinaisons (des métaux et éléments différents sont présents dans le même produit, mais dans différents composants) et alliages (produit métallique obtenu en incorporant à un métal un ou plusieurs éléments) utilisés dans les produits mis en circulations (Castro et al., 2004) Ainsi, les métaux légers comme étant sensibles aux contaminations et étant de plus en plus utilisés dans les produits, leurs combinaison avec d'autres matériaux devrait faire l'objet d'une attention toute particulière pour concevoir des produits permettant des taux de recyclage élevés, ce qui n'est l'aluminium et le magnésium pas le cas aujourd'hui (Castro et al., 2004)

Ces limites concernant la conception des produits s'accompagnent de limites dues à la gestion des filières : gestion historiquement non efficace qui conduit à ne plus savoir où se situe un grand nombre de métaux, gestion « court-termiste » des déchets, basée sur le prix des métaux qui va engendrer une dispersion encore plus grande de ces métaux, cycle d'innovation très rapide ne permettant pas la mise en place de filière de recyclage, composition différente pour chaque entreprise concurrente ne permettant pas de centraliser (Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014).

Un des phénomènes d'organisation des filières ayant un impact considérable sur les pertes de matière est la recherche d'économies d'échelle. Ainsi, Allwood explique-t-il que la génération de chutes de productions (*new scrap*) est une « conséquence automatique des économies d'échelle dans la production de matériaux » (Allwood, 2014). Les industries productrices de matières premières ont ainsi produit de plus en plus de produits intermédiaires, et les industries de l'aval des chaînes de productions «sont devenues des expertes dans la production efficace de chutes de production » (Allwood, 2014). Il cite dans les industries générant le plus de pertes de matière : l'industrie de la construction, la construction automobile dont 30% des achats de matières premières est transformé en scrap et enfin l'aérospatial, avec la construction d'un avion qui conduit à la transformation en scrap de 90 à 95% de l'ensemble des matériaux achetés (Allwood, 2014). La Figure 11 montre ainsi les pertes cumulées de matières tout au long du processus de production pour différents composants en aluminium. Sur cette figure illustre bien la perte de matière de plus de 90% du métal de départ, générée par la fabrication d'un panneau de revêtement d'aile d'avion (graphique en vert, le début de la production est en bas à droite et la fin de la production en haut à gauche). Le « choix de créer toutes ces chutes est basé sur une bonne logique commerciale. Cela minimise les coûts, mais au prix de créer un excès significatif d'excès de production matériel. Approximativement 25% de tout l'acier produit dans le monde chaque année est convertie en scrap (Cullen et al., 2012) et n'entre jamais dans un produit ; pour l'aluminium, ce chiffre est autour de 50% »(Allwood, 2014)

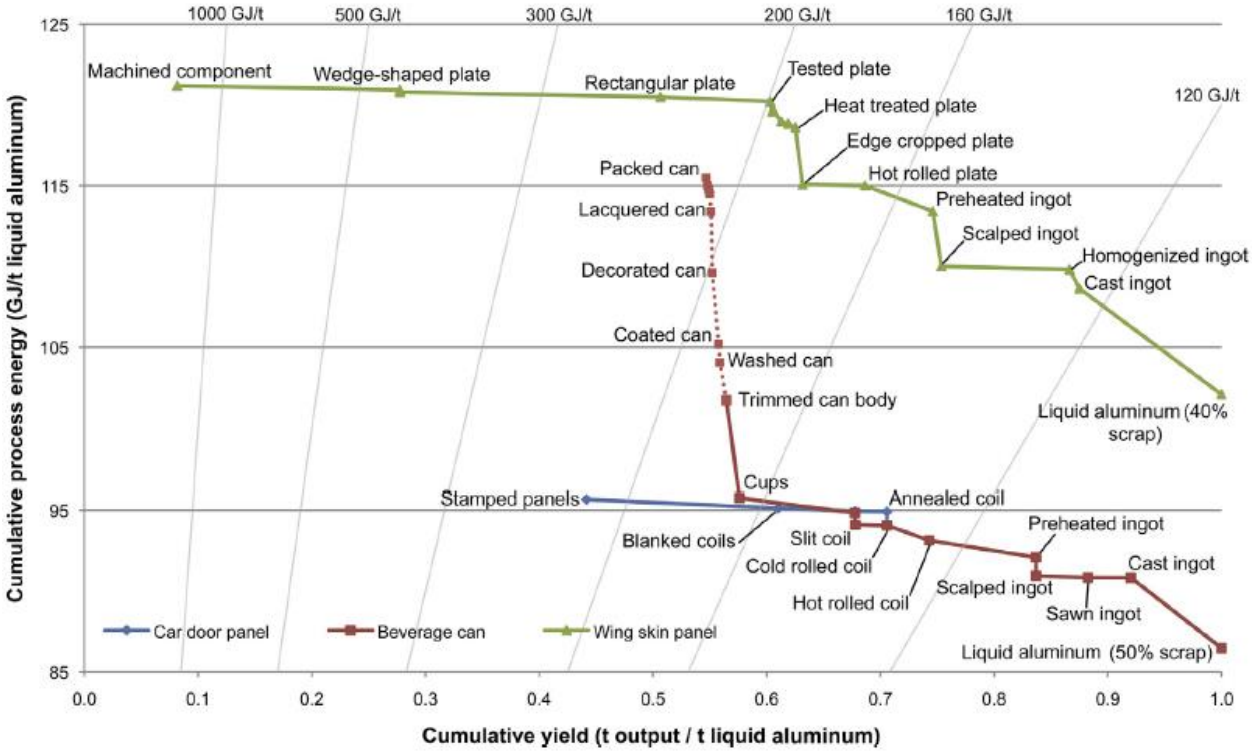


Figure 11 : Les causes du processus de pertes de rendement pour trois composants en aluminium. Source : Allwood, 2014

En abscisse le rendement cumulatif (en tonnes à la sortie/tonne d'aluminium liquide) en ordonnée l'énergie cumulative du procédé industriel (GJ/tonne d'aluminium liquide)

Toujours d'après Allwood, « la clef pour réduire ces pertes de rendement est de concevoir des procédés de production qui minimisent le découpage et l'émondage. Après des années de développement technologique concentrées sur les économies d'échelle produisant des pièces standardisées, il y a un grand potentiel d'invention et d'innovation dans ce domaine » (Allwood, 2014).

Les pertes au niveau du recyclage liées à des choix économiques existent également. En effet le paragraphe précédent a montré qu'une partie des contaminations peut être vue comme « spontanée », cependant ces pertes sont également dues à l'absence de développement des procédés industriels dans le recyclage pour permettre un meilleur contrôle des compositions (Allwood, 2014). Même si nous avons vu qu'il était difficile de séparer un métal fondu de ces contaminants dans certains cas, cela n'est pas impossible. Pour reprendre les deux exemples pris auparavant, de faibles quantités de fer dans l'aluminium peuvent être enlevées grâce à des méthodes techniques avancées, mais cela n'est pas économiquement faisable pour la plupart des alliages utilisés commercialement, de même pour la contamination au cuivre du fer (Castro et al., 2004). Quant aux petits métaux utilisés dans les nouvelles technologies le principal frein économique pour le recyclage est l'investissement nécessaire au développement d'infrastructures de recyclage : « *if end-of-life recyclates have sufficient economic value, they will be recycled when the appropriate technological infrastructure exists for recovering their contained elements. […] for technological metals, the existing metallurgical infrastructure […] for their recovery is limited, resulting in low recycling rates of these elements* » (Worrell & Reuter, 2014, p. 256).

Enfin, l'ajout de métal affiné issu de la production primaire au cours du recyclage imbrique l'organisation des filières primaires et secondaires, ce qui rend difficile de faire du recyclage une solution complète au problème de l'épuisement. Par exemple le recyclage de l'acier est « couplé de

manière étroite avec la production primaire : les chutes de production et ferrailles sont utilisées dans la production primaire (minière) pour aider à refroidir la fonte et de l'acier issu de la production primaire est utilisé dans la production secondaire (à partir des scraps) pour contrôler la composition du métal » (Allwood, 2014).

Enfin, il faut souligner que ces choix techniques et opérationnels conduisant à des pertes de matières significatives sont liés à la recherche d'une réduction des coûts. Ainsi, si les grands métaux industriels sont plus recyclés que les petits métaux, leurs taux de recyclage respectifs dépendent en partie de leur valeur. Par exemple, « l'aluminium a une haute valeur, et l'industrie recycle actuellement tout l'aluminium qu'elle collecte, sans subvention. Le taux de recyclage mondial de l'aluminium approche les 90 pourcents pour le transport, les applications de construction » (Ekins et al., 2017).

Nous avons donc vu qu'il existe des pertes de matières tout au long des procédés d'extraction, de transformation, d'utilisation, et de recyclage. Ces pertes sont exacerbées par la croissance de la demande en ressources, la conception des produits qui rendent les gisements secondaires de plus en plus complexes à recycler et la gestion non efficace des filières. Or ces pertes tout au long des filières métalliques accélèrent l'exploitation des gisements primaires contribuant ainsi à les rendre de moins en moins riches (diminution des teneurs) et de moins en moins accessibles. Pour continuer à préciser la distinction opérée entre ressource économique et ressource physique (Tableau 1) établie au paragraphe 1.4 : si le stock de ressources primaires économiquement exploitables (selon les termes de l'ENC) grandit au fur et à mesure de l'exploitation et du progrès technologique, le stock de ressources physiques est lui caractérisé par une diminution des teneurs des ressources primaires, une complexification des ressources secondaires (dispersion, miniaturisation, alliages, combinaisons, collage, etc.), et des pertes de matière tout au long du processus de production.

Ce paragraphe 2 a donc montré, que ce soit en termes de transition énergétique ou plus généralement de durabilité de nos modes de production et de consommation, que la question de l'épuisement des métaux doit être posée avec ses problématiques spécifiques. En effet, les métaux font partis des ressources non renouvelables, c'est-à-dire : que les stocks ne sont pas renouvelés à l'échelle d'une génération humaine, et que ce sont des ressources liées au processus d'industrialisation depuis la seconde moitié du XIXème siècle dont l'exploitation n'a jusqu'à aujourd'hui jamais pu être décorrélée du phénomène de croissance du PIB mondiale. De plus, les métaux sont incontournables dans la question énergétique : d'une part ils sont utilisés pour la production d'énergie (qu'elle soit conventionnelle, non conventionnelle, ou renouvelable) et d'autre part les filières métallurgiques sont elles-mêmes de grandes consommatrices d'énergie, essentiellement d'énergie fossile. Malgré ces liens, la croissance de leurs usages non énergétiques depuis le début du XXème siècle fait des métaux une problématique spécifique, qui ne saurait être réduite à la seule question énergétique. Le recyclage présenté comme une solution à l'épuisement à travers le concept d'économie circulaire, présente des limites physiques, impliquant que sur une échelle de temps longue le stock des métaux n'est pas renouvelable. Or, cette échelle de temps tend à être considérablement réduite par la réalité des très forts taux de croissance de la consommation des métaux et des très faibles taux de recyclage, particulièrement pour les métaux rares (ou petits métaux). Néanmoins, le recyclage et la réutilisation des métaux contribuent à repousser l'échéance de l'épuisement physique à condition de réduire les taux de croissance des métaux à 1%. Il apparait donc que, contrairement aux ressources énergétiques fossiles dont l'usage est destructif, l'épuisement des métaux se pense au niveau de la filière et non uniquement au niveau de l'extraction. Ces considérations permettent de définir l' « épuisement physique des ressources métalliques », comme un phénomène continu, caractérisé par une diminution des teneurs des ressources primaires, une complexification des ressources secondaires, et des pertes de matière tout au long du processus de production. C'est ce phénomène de diminution progressive du stock très peu contesté bien que son évaluation quantitative pose problème, que nous choisissons d'appeler dans la thèse « épuisement de la ressource » ou « déplétion ». Les trois phénomènes

illustrés ici sont assez peu documentés en tant que tels et notamment les études économiques sur l'épuisement des ressources prennent assez peu en compte les impacts économiques générés par cet épuisement physique comme nous allons le voir dans le paragraphe 3.

3. Les angles morts des approches économiques néoclassiques concernant les enjeux associés à l'épuisement physique, approches de l'économie écologique et institutionnelle

Nous avons vu dans les paragraphes précédents en quoi consistait l'approche néoclassique de l'épuisement des ressources et comment la question de l'épuisement physique pour les métaux se posait à l'échelle de la filière. Nous verrons dans ce paragraphe les enjeux liés à l'épuisement qui semblent écartées de l'approche néoclassique par la définition qui en est donnée. Tout d'abord, nous verrons comment l'approche de l'économie écologique oppose le caractère irréversible de l'épuisement des ressources et la non-substituabilité du capital et des ressources naturelles aux théories néo-hotelliniennes. Après avoir synthétisé les impacts sociaux et environnementaux liés à l'exploitation des métaux, nous discuterons des travaux théoriques et expérimentaux qui permettent de faire l'hypothèse d'un lien entre épuisement et augmentation des impacts, afin de redéfinir la question des interactions entre la sphère biophysique et la sphère socio-économique.

3.1. L'irréversibilité du temps et la non-substituabilité des capitaux : l'approche de l'économie écologique et la perspective de la soutenabilité forte

Nous avons vu au paragraphe 1.5 que la question de l'équité intergénérationnelle a pris de l'ampleur au sein du mouvement néo-hotellinien dans les années 1970 et s'est développée dans les années 1980 avec l'émergence du concept de développement durable. Les enjeux du développement durable n'ont en réalité pas été posés par le rapport Bruntland (WCED, 1987), dont la parution scelle plutôt l'institutionnalisation de ce concept, mais par les économistes écologiques dont les travaux de la fin des années 1960 (Boulding, 1966; H.E. Daly, 1971) constituent la pierre angulaire de la remise en question de la croissance, reprise dans le premier rapport du Club de Rome (Vivien, 2018). Nous verrons dans ce paragraphe en quoi les modèles de croissance durable développés par l'économie néoclassique cherchant à maximiser le bien-être des générations successives, s'ils cherchaient à répondre à la question de la durabilité de la croissance, ne répondent pas aux enjeux de soutenabilité tels que posés par les économistes écologiques. Concernant l'épuisement, nous avions vu que cette question était traitée principalement à travers deux propositions : la substituabilité des ressources par le capital comme facteur de la production et un taux d'actualisation compatible avec un développement durable. Nous allons voir ici que ces questions constituent un des points[16] de rupture avec l'économie écologique qui rejette ces propositions comme solution au problème de l'épuisement physique des ressources.

[16] Ce rejet de la perspective néoclassique de la croissance durable porte également sur d'autres aspects comme par exemple la mise en balance d'une équité intergénérationnelle avec les enjeux de développement des pays et classes sociales les plus pauvres. Cette question est tranchée dans la perspective adoptée par Daly qui affirme ne « s'adresser qu'à la société d'abondance et, en particulier, à celle qui existe aux États-Unis » (Vivien, 2018), et donc en adoptant une approche d'équité autant intergénérationnelle qu'internationale.

3.1.1. L'économie écologique et l'interaction des sphères économique, sociale, et biophysique

Selon Passet et Richard, l'ENC et la gestion de l'entreprise qui en découle sont tronquées « caractérisées par un calcul prétendument rationnel, mais qui est en fait irrationnel »[17] (Richard & Plot-Vicard, 2014), tout au moins aux yeux des tenants de l'économie écologique. Ainsi, Passet dans son ouvrage de 1979, « L'économique et le vivant » (Passet, 1979) dessine une vision de l'activité économique ancrée dans des processus sociaux, eux-mêmes ancrés dans le monde biophysique (incluant les écosystèmes et les ressources naturelles au sens large) dont il considère que les interactions ne sont pas pris en compte par l'ENC. Il établit les prémisses d'une vision systémique[18] de l'économie : « Les activités de production, échange, consommation […] ne constituent en fait qu'une première […] incluse dans une deuxième sphère, celle des activités humaines […] ; si les activités économiques n'ont de sens que par rapport aux hommes, c'est dans la sphère des relations humaines et non en elles-mêmes qu'elles trouvent leur finalité : le bien-être social [qui…] ne se réduit pas à une simple accumulation de biens et services. » (Passet, 1979 in Richard & Plot-Vicard, 2014). Ces deux premières sphères sont englobées par une troisième : la sphère biophysique; en effet « l'économique et l'humain ne sauraient subsister dans le temps sans la nature qui les supporte » » (Passet, 1979 in Richard & Plot-Vicard, 2014). Les activités économiques sont donc pensées comme une première sphère imbriquée dans la sphère sociale, elle-même imbriquée dans la sphère biophysique (voir Figure 1).

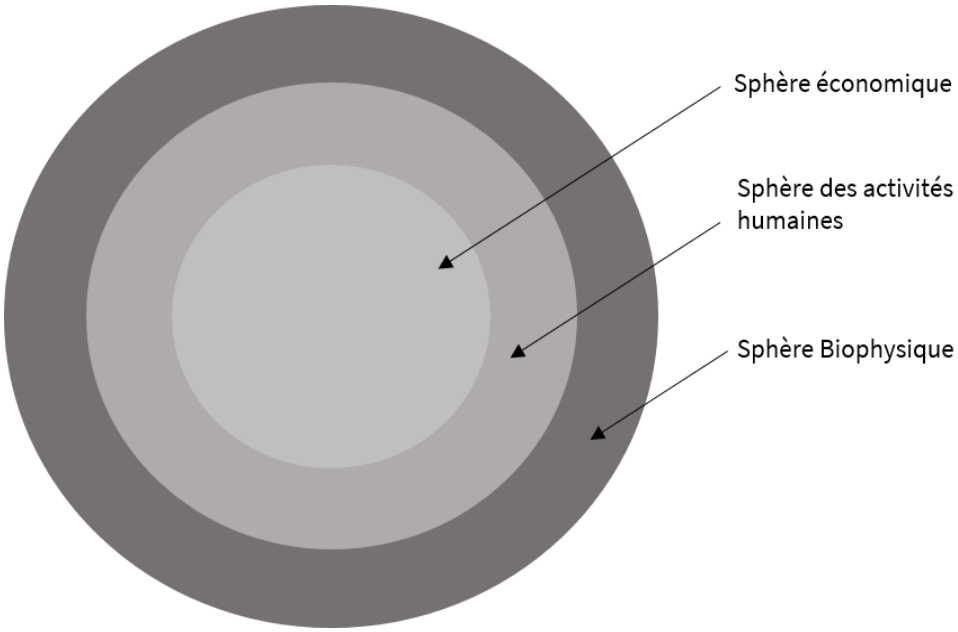


Figure 12 : Représentation des trois sphères imbriquées qui conditionnent les activités humaines. Source : Passet, 1979 ; Richard & Plot-Vicard, 2014

Il y a dans l'imbrication de ces sphères les prémisses de règles de conservation et d'une hiérarchie ou d'une priorité dans cette conservation : la sphère biophysique est nécessaire à la sphère sociale, elle-même nécessaire à toute activité économique. Cette affirmation constitue un large consensus parmi les auteurs de l'économie écologique (Ayres & Nair, 1984; R. Costanza & Daly, 1992; Robert Costanza et al., 1997; N. Georgescu-Roegen, 1971; Pearce & Turner, 1989). Il est important de noter

[17] Cette idée de calcul en apparence rationnelle fait écho à la rationalité formelle de Weber et au *débat* sur *le calcul* économique en économie *socialiste qui sera approfondie au chapitre 2.*

[18] Au sens de l'approche des systèmes ouverts (Brown, 2003) s'inspirant des travaux philosophiques de Bhaskar appliqués à l'économie par Tony Lawson, professeur d'économie à Cambridge en Angleterre. Cette approche et ses liens avec l'économie institutionnelle et l'économie écologique seront détaillés au chapitre 2.

que les activités économiques constituent une partie des activités sociales, mais ne sauraient s'étendre à toute la sphère sociale ou biophysique. Une partie des éléments des sphères sociale et biophysique n'est donc pas interchangeable avec des éléments de la sphère économique. L'imposition de règles de conservation, et l'assomption de la non-substituabilité (partielle ou totale en fonction des auteurs) entre les éléments constitutifs de ces différentes sphères constituent les principaux désaccords de l'approche de l'économie écologique avec l'ENC comme nous allons le voir dans les paragraphes suivants.

3.1.2. L'équivalence temporelle face à l'irréversibilité de la déplétion

Les paragraphes 2.4 et 2.5 ont montré qu'il existait des processus irréversibles dans l'exploitation, la transformation et l'utilisation des métaux : diminution des teneurs, pertes de matériaux et diminution de la qualité des ressources secondaires. Or, depuis la fin des années 1960, les économistes ayant fondé la discipline de l'économie écologique, ont avancé que ce type de transformations irréversibles était à l'origine de toute activité économique. Pour Georgescu-Roegen (N. Georgescu-Roegen, 1971) le processus économique absorbe de l'entropie faible (comme les matières premières) et la rejette sous forme de déchets de forte entropie. Cette perspective thermodynamique du processus économique est à l'opposé de la vision mécaniste de la théorie économique standard. Ainsi, contrairement à la vision du monde newtonienne où un système est réversible dans le temps, restant identique, la seconde loi de l'entropie indique un changement qualitatif irréversible et unidirectionnel : la quantité d'entropie dans un système fermé augmente continuellement. Pour diminuer l'entropie d'un système, nous devons obtenir de l'énergie de l'extérieur du système, ce qui signifie augmenter le déficit global d'entropie (N. Georgescu-Roegen, 1971). Cette non-réversibilité des phénomènes est d'autant plus évidente sur la question de la déplétion biophysique et sur les questions de dégradations environnementales : « s'il est possible d'étudier généralement les phénomènes économiques dans un temps caractérisé par l'équivalence temporelle, ce n'est plus le cas lorsque les effets de ces phénomènes exercent une menace sur l'environnement à très long terme. La conception du temps dont il est question ici est celle qui résulte du second principe de la thermodynamique, la loi d'entropie. […] D'un point de vue physique, ce sont des processus irréversibles. L'équivalence temporelle des moments du temps est donc incompatible avec le second principe de la thermodynamique. » (Ferrari & Mery, 2009). Il est ici question de la déplétion des ressources, mais cette affirmation est également valable concernant les dégradations environnementales liées à la production. Cette question et son lien avec le phénomène de déplétion sera détaillée au paragraphe 3.2.2.

3.1.3. La non-substituabilité des ressources par les capitaux

Comme nous l'avons vu au paragraphe 1.5, l'approche néo-hotellinienne, fait émerger l'idée que la substituabilité permettrait le maintien d'une croissance durable. Pour ce courant, l'allocation des ressources est assurée par un mécanisme de prix, le progrès technique (dirigé) permet d'éviter l'augmentation des coûts d'exploitation liée à la baisse de la ressource, et des substituts sont trouvés grâce à l'investissement, le capital et les ressources étant substituables. Ainsi, pour Dasgupta et Heal (P. Dasgupta & Heal, 1974) il est possible d'avoir un « un chemin de consommation par tête non décroissant si l'élasticité de substitution entre le capital et les ressources naturelles est supérieure à un. Dans le cas d'une élasticité de substitution entre le capital et les ressources naturelles égale à un, la part du capital dans la production doit en plus être supérieure à la part des ressources naturelles dans la production » (Fizaine, 2014). Cette idée de substituabilité a été au cœur de nombreux modèles d'économistes néo-hotelliniens (The proper calculation of income from depletable natural resources in Ahmad, El Serafy, & Lutz, 1989; P. Dasgupta & Heal, 1974; S. Dasgupta & Mitra, 1983; Dixit, Hammond, & Hoel, 1980; Hartwick, 1977, 1978; Solow, 1974). De même la règle d'Hartwick est centrée sur cette idée de substituabilité : elle «stipule que la consommation peut rester constante face à la disponibilité déclinante des ressources épuisables tant que les rentes tirées des ressources épuisables sont investies dans le capital renouvelable. Alors que ces modèles ont été vantés à l'époque et ont depuis lors été la preuve que le développement peut être soutenu

face à l'épuisement des ressources naturelles, une analyse plus approfondie révèle que ces modèles n'identifient que l'importance de la substituabilité (Norgaard, 1992).

Cette hypothèse de substituabilité entre ressources et capital constituent l'un des points les plus contesté par l'économie écologique de la conception standard de l'épuisement. Ainsi, Costanza et Daly attribuent-ils le désintérêt de la question des ressources naturelles de l'ENC à cette hypothèse : « une raison [...] de la négligence du capital naturel a été le principe de l'ENC selon lequel le capital produit par l'homme est presque parfaitement substituable aux ressources naturelles, et donc du capital naturel qui génère le flux de ressources naturelles » (R. Costanza & Daly, 1992). Costanza et Daly apportent trois objections principales à cette hypothèse, objections partagées par de nombreux auteurs de l'économie écologique.

Premièrement, si ces deux types de capitaux étaient parfaitement substituables l'homme ne se serait pas donné la peine de produire du capital manufacturé, historiquement cette production s'est faite en complément des ressources et non en substitution (R. Costanza & Daly, 1992; Herman E Daly, 1997; P. A. Victor, 1991).

Deuxièmement, le capital produit par l'homme est constitué de ressources naturelles, avec l'aide du capital humain (ou facteur travail), qui lui aussi consomme des ressources pour la production (R. Costanza & Daly, 1992; P. A. Victor, 1991). La même critique peut être adressée à l'encontre de la proposition d'Hartwick : « la règle d'Hartwick (investir la rente d'une ressource épuisable dans un capital de substitution) s'apparente à une logique vertueuse mais purement intellectuelle, car il n'existe pour l'instant aucun capital qui ne consomme pas de ressources naturelles et puisse remplacer l'ensemble de ces dernières » (Fizaine, 2014).Selon Daly, l'apparition d'une composante R dans les fonctions de productions des auteurs néo-hotelliniens n'est pas compatible avec la complémentarité du facteur ressources naturelles et du capital produit par l'homme : cet argument n'étant « pas limité aux fonctions de type Cobb-Douglas [utilisées par Solow, Hartwick, etc.] ; toutes les fonctions de production qui se conforment à la première loi de la thermodynamique ne peuvent pas éviter une complémentarité stricte entre les ressources d'un côté et le capital et le travail de l'autre » (Herman E Daly, 1997). Dans l'approche néoclassique, l'agrégation empêche de voir les différents facteurs de productions comme un ensemble complémentaire produisant un flux qui doit être maintenu. Pour Norgaard (Norgaard, 1992), c'est le flux physique qu'il faut évaluer et la durée où ce flux doit être maintenu, et non une valeur agrégée. D'un point de vue historique, les travaux du Groupe International d'Experts sur les Ressources, ceux de Krausmann et Schandl cités au paragraphe 2 (Ekins et al., 2017; Krausmann et al., 2016; Schandl & West, 2010) qui étudient au cours du temps la question de la part de la croissance de la production liée à la consommation des ressources naturelles tendent à montrer que la substitution des ressources naturelles par du capital n'a pas eu lieu pour les ressources non-renouvelables, et soulignent plutôt leur complémentarité.

Troisièmement, une « analyse physique de la "production" révèle qu'elle constitue en réalité un procédé de transformation - un flux entrant de ressources naturelles est transformé en un flux sortant de produits par deux agents de transformation, le stock de travailleurs (le capital humain) et le stock de capital manufacturé à leur disposition. Les ressources naturelles sont ce qui est transformé en produit (la cause matérielle de la production); le capital humain et manufacturé sont ce qui effectue la transformation (la cause efficiente de la production). La relation est donc de manière accablante une relation de complémentarité et non de substituabilité. La raison évidente de l'augmentation du stock de capital produit par l'homme est de pouvoir transformer un flux plus important de capital naturel, et non de rendre possible la réduction du flux. » (R. Costanza & Daly, 1992). Daly et Costanza s'accordent à dire que du fait de cette complémentarité, l'effet du capital sur la réduction de l'utilisation des ressources, autrement dit la substituabilité des ressources par le capital, est très limitée. Elle concerne l'augmentation de l'efficience de certains procédés et le développement du recyclage (R. Costanza & Daly, 1992; Herman E. Daly, 1990). Une vision similaire est proposée par Cleveland qui définit le capital produit par l'homme, le travail et la technologie comme des intrants intermédiaires "interdépendants, internes [à la sphère économique], et

intermédiaires » (Cleveland, 1991) dépendants de facteurs primaires tels que la matière et l'énergie considérés comme « indépendants, externes et primaires » (Cleveland, 1991). Ils rejoignent en cela les constats sur les limites à la mise en place de l'économie circulaire évoquées aux paragraphes 2.5 et 2.6.

Enfin, le fait de considérer les ressources naturelles comme un substitut du capital, a dans la conception matérialiste d'Hartwick comme prérequis le fait de considérer le capital comme étant de la même nature que les ressources : c'est-à-dire une agrégation de choses. Cette conception du capital a fait l'objet d'une controverse, la controverse des deux Cambridge qui a opposé des économistes de Cambridge (Joan Robinson et Piero Sraffa) aux économistes néoclassiques du MIT (Samuelson et Solow) sur le problème de la conception du capital (Rambaud, 2015), voir encadré ci-dessous.

La controverse des deux Cambridge

Hicks place ce débat dans la lignée de deux conceptions du capital : Fundistes et Matérialistes. La perspective matérialiste (les néoclassiques originels comme Jevons, et l'ensemble des économistes des ressources comme Hartwick) envisage le capital comme l'agrégation d'un stock de choses et son évaluation comme la valeur des éléments de ce stock, ou en termes néoclassique la somme des consentements à payer pour les éléments de ce stock (Hicks, 1974; Rambaud, 2015). Le taux d'intérêt du capital peut être déduit de la valeur du capital considérée comme donnée. En revanche, pour les Fundistes (Hotelling, Joan Robinson, Piero Sraffa, néokeynésiens, les classiques, Hayek, …), le capital est envisagé comme un fond (au sens financier du terme) qui génère des flux, et l'évaluation de ce stock est donc la valeur nette actualisée des flux générés par le capital. « Dans le cas Fundiste, on reconnaît le principe de l'actualisation : la valeur monétaire d'un fonds est en effet la valeur actualisée de l'évaluation monétaire des services qu'il génère » (Rambaud, 2015). Dans cette vision l'évaluation du capital est vue comme dépendante du taux d'intérêt attendu par les actionnaires et utilisé pour l'actualisation. Comme l'exprime Joan Robinson qui a initié la controverse des deux Cambridge : « Le coût du capital comprend le coût des biens d'équipement, et puisqu'ils doivent être construits avant qu'ils puissent être utilisés, une partie du coût du capital est l'intérêt sur la période entre le moment où le travail a été réalisé pour construire les biens d'équipement et le moment où ils produisent un flux de production sortant » (Robinson, 1953). La critique des Fundistes à l'endroit des Matérialistes, est donc que le taux d'intérêt est calculé par les matérialistes à partir de valeurs des éléments du capital dépendant elles-mêmes du taux d'intérêt attendu. Dans la perspective Matérialiste le taux d'intérêt est vu comme une variable intrinsèque du système de production. Alors que pour les Fundistes, « comme argumenté notamment par P. Sraffa, le taux d'intérêt ne peut plus être réellement vu comme déterminé à l'intérieur du système de production mais de façon plus globale. Ainsi « *the potential rate of profits on capital arises from differing power and social relationships in production […]* » (A. J. Cohen & Harcourt, 2003). Dans ces conditions, l'économie Capitaliste dépendrait de taux de rendements attendus a priori […] (Bichler & Nitzan, 2014). » (Rambaud, 2015, p. 296-297). Le taux est le reflet du taux de rentabilité escompté par les actionnaires (plus le taux d'intérêt est élevé plus la rentabilité à court terme est privilégiée) et de l'inflation (Bachelet, 2014). Ce sont les fonctions de production et d'utilité développées par les Matérialistes qui sont à la base des premiers modèles des néo-hotelliniens comme Solow et Hartwick, même si paradoxalement Hotelling avait une conception du capital plus proche des Fundistes. Ainsi, Hartwick (Hartwick, 1977) reprend-t-il « la règle d'Hotelling », selon laquelle pour obtenir un chemin optimal d'un point de vue de l'efficience intergénérationnelle, il faut que « le taux de croissance du prix unitaire d'une ressource naturelle non renouvelable (calculé après déduction des coûts d'extraction) [soit] égal au taux d'intérêt attendu sur les marchés » (Rambaud, 2015). Cependant, dans une perspective matérialiste, chez Hartwick, le taux d'intérêt est déduit de la valeur K du capital et est égal au produit marginal du capital reproductible, ce qui n'était pas le cas chez Hotelling. Ainsi, la condition d'Hotelling pour obtenir un chemin optimal se traduit-elle en une simple égalité : «*the rate of change in the marginal product of the mineral being equal to the marginal product of reproducible capital* » (équation (2) in Hartwick, 1977) introduite dans le modèle matérialiste d'Hartwick.

La conséquence de l'intégration des ressources naturelles dans la fonction de production est donc d'évaluer le stock de ressources au même titre que le capital. Or cela pose des problèmes sur l'évaluation du capital qui n'ont pas été résolus. En effet, bien que l'utilisation de la perspective Matérialiste du capital se soit généralisée, l'argument des Fundistes concernant l'imbrication de l'évaluation du taux d'intérêt et du capital produit par l'homme n'a pas été réfutée. Le coût du remplacement total du capital n'est pas égal à la somme du coût de remplacement de chaque élément[19]. Pour Norgaard (Norgaard, 1992) à la lumière de l'argument partagé par les économistes

[19] On retrouve le même débat entre Hayek et Pigou sur le maintien du capital (Hicks, 1974 in Rambaud, 2015)

écologiques concernant le fait que le capital soit composé de ressources naturelles et de la controverse de Cambridge qui pointe le fait que le modèle matérialiste évalue de manière indépendante des variables reliées, il devient évident que l'on ne peut donc pas évaluer monétairement le stock de ressources naturelles et les éléments constitutifs du capital séparément. Selon Norgaard, « la controverse met en évidence les complexités [dans l'évaluation des différentes composantes du capital produit par l'homme] introduites par les relations entre les techniques de production et l'agrégation du capital, des complexités qui sont similaires aux difficultés de la valorisation des ressources naturelles indépendamment de la technologie. [… En effet] comment les choses peuvent-elles être évaluées et comparées lorsqu'elles sont intrinsèquement interdépendantes, c'est-à-dire, ne sont pas des choses séparées? » (Norgaard, 1992).

Ce débat sur la substituabilité ou non entre capital et ressource consacre deux approches différentes de la question du développement durable. Ainsi, l'approche de la soutenabilité forte, part d'une hypothèse de complémentarité entre ressource et capital, alors que l'approche de soutenabilité faible part d'une perspective de substituabilité. En effet, « la problématique du DD a conduit à identifier une catégorie particulière de substituabilités : […] entre K_N [le capital naturel] et le Capital (Manufacturé) K_M (Neumayer, 2010; Perman et al., 2003) […]. Plus précisément, conformément à la pensée Matérialiste, la question de la substituabilité correspond à la substituabilité au sein de la fonction de production. En effet, la fonction de production générique agrégée peut s'écrire de cette façon (Perman et al., 2003), en prenant en compte le Capital (Naturel)-stock :$f(K_M, K_N, L)$. Dans ces conditions, la question de la substituabilité repose sur l'élasticité de substitution de K_N par K_M. Dans le cas où cette élasticité est supérieure à 1, on se situe dans une situation dénommée « soutenabilité faible » […]. Si, en revanche, il est supposé que cette élasticité est inférieure à 1, voire qu'il existe une réelle complémentarité entre ces deux sous-Capitaux, alors on se place dans le contexte de la « soutenabilité forte » (Beckerman, 1994; Michael S. Common & Stagl, 2005; Daly & Farley, 2004; Farmer & Bednar-Friedl, 2010; Neumayer, 2010; Perman et al., 2003). Le premier type de « soutenabilité » est défendu notamment par R. Solow (1986) et J. Hartwick (1977), tandis qu'un des représentants emblématiques de la « soutenabilité forte » est H. Daly (Daly & Farley, 2004) » (Rambaud, 2015).

Au-delà de l'idée de remplacer les ressources par du capital produit par l'homme, et donc « reproductible » (sensu Hartwick, 1977), qui est la plus largement contestée par l'économie écologique, il existe d'autres façons d'aborder la substituabilité. Ainsi, au sein de l'économie environnementale qui sera abordée plus en détail dans le chapitre 2, l'idée est émise de la substitution des ressources non-renouvelables par des ressources renouvelables (Pearce & Turner, 1989, p. 52), et par certains auteurs de l'économie écologique. Ainsi, Daly développant des principes fondamentaux pour une approche en soutenabilité forte du développement durable, propose-t-il que : « *Nonrenewable resources should be exploited, but at a rate equal to the creation of renewable substitutes* » (Herman E. Daly, 1990, p. 34). Ce principe a pour but de maintenir un « stock de capital naturel et s'adresse à la problématique de l'inévitable déplétion des ressources non renouvelables dès qu'elles sont un tant soit peu utilisées » (P. A. Victor, 1991). Pour Victor cela nécessite de maintenir l'exploitation des ressources non-renouvelables « en deçà des taux de régénération dans la mesure nécessaire pour compenser l'épuisement des ressources non renouvelables. En l'absence de ressources renouvelables et non renouvelables qui soient de parfaits substituts, il est évidemment difficile de déterminer si la création de ressources non renouvelables est adéquate pour se défaire de l'exploitation des ressources non-renouvelable. Daly n'offre pas d'indicateurs sur comment cela pourrait être décidé » (P. A. Victor, 1991). Malheureusement, l'exemple du développement des énergies « renouvelables » dépendant de l'exploitation des ressources non-renouvelables (paragraphe 0) semble confirmer l'intuition de P.Victor sur la difficulté à trouver de parfaits substituts à l'exploitation des ressources non-renouvelables, même si elle offre une solution partielle au problème des ressources et une solution intéressante à la lutte contre le changement

qui sera évoqué dans le point sur les externalités du chapitre .

climatique. De même, l'approche historique du paragraphe 2.1.2 montrant une tendance globale à l'augmentation de la part des ressources non-renouvelables dans la production donne une idée de l'ampleur du défi que représenterait le remplacement de l'ensemble des intrants de la production par des ressources renouvelables. Enfin, les considérations évoquées dans le paragraphe 2.6 concernant l'impossibilité d'atteindre une économie circulaire des métaux tant que la croissance économique est maintenue s'appliquent de même au passage des ressources non-renouvelables aux renouvelables. En effet, même si les progrès technologiques permettaient de remplacer tous les intrants non-renouvelables par des ressources renouvelables, avec des taux de croissance élevés, les taux de renouvellement de ces dernières ne seraient pas respectés et elles feraient l'objet d'une déplétion au même titre que les ressources non-renouvelables.

Il existe également des travaux initiés par Skinner[20] (Skinner, 1976) spécifiquement sur les raretés géochimiques relatives des ressources métalliques entre elles, faisant naître l'idée que pour retarder les pénuries dues à la déplétion des ressources il faut prôner l'utilisation des métaux les plus abondants[21]. « Cette théorie, à l'instar de celle d'Hubbert (1956), suppose que l'offre des ressources naturelles épuisables est guidée en premier lieu par des facteurs géologiques. Ce mouvement nourrit néanmoins des oppositions importantes avec celui d'Hubbert, notamment sur la forme de la distribution géologique des ressources même si les deux auteurs identifient la même force de salut (la substitution) comme solution ultime à l'épuisement d'une ressource. […] A la différence des partisans d'Hubbert et de l'école de Princeton, les disciples de Skinner et de l'école de Yale soutiennent, pour les éléments rares, une distribution bimodale de la répartition d'un élément dans la croûte terrestre en fonction de sa concentration » (Fizaine, 2014). Selon ce modèle (Skinner, 1976) au cours de l'exploitation des ressources géochimiquement rares non seulement les exploitants devront faire face à une baisse progressive des teneurs (voir paragraphe 2.4 qui va dans ce sens), mais également à un nombre de gisements de plus en plus faibles (contrairement aux théories de Jevons et Zimmermann qui seraient pour Skinner uniquement applicables aux ressources géochimiquement abondantes). Si l'humanité continue l'exploitation de ces ressources, elle verra « à nouveau […] croître la quantité potentielle de l'élément extractible, [… mais dans] des configurations où sa concentration est inférieure à la barrière minéralogique. Or extraire cet élément de la maille cristalline de la roche revient à briser entièrement celle-ci chimiquement ce qui réclame des quantités colossales d'énergie. Le coût énergétique d'exploitation des gisements d'un élément rare par ordre décroissant de qualité devrait donc suivre une fonction de type exponentielle discontinue comme postulé par Brobst (1979). Le saut effectué par la fonction de coût pourrait être un multiple de 10 (Skinner, 2001), de 100 ou 1000 (Brobst, 1979 ; Skinner, 1976) » (Fizaine, 2014). Ainsi, les métaux rares (au sens géochimique du terme et non au sens économique de « petits métaux ») feront l'objet de difficultés d'exploitation beaucoup plus rapidement que les métaux abondants : c'est « pourquoi, Skinner estime très probable, le basculement prochain de nos économies vers un nouvel âge du fer où les métaux communs se substitueront aux métaux rares dans les usages courants de ces derniers. Cette position soutenant la substitution à venir des métaux rares par les métaux communs du fait d'un épuisement plus rapide est partagée par d'autres auteurs (Goeller et Weinberg, 1978 ; Diederen, 2010) » (Fizaine, 2014). La question des changements nécessaires dans les innovations technologiques, les usages, les modèles énergétiques n'est pas posée par Skinner, mais commence à émerger dans le débat public (Bihouix, 2014).

[20] Le «mouvement initié par Skinner (1976) regroupe la pensée de plusieurs universitaires dont la vocation principale est de proposer une explication géologique du phénomène d'épuisement des ressources naturelles. »(Fizaine, 2014)

[21] « Les 12 éléments les plus abondants dans la croûte continentale [plus de 0,1% en poids ...] représentent 99,23% de la masse de la croûte, et le reste des 76 éléments représentent seulement 0,77% de la masse. [...] Les métaux géochimiquement les plus abondants qui sont largement utilisés dans l'industrie sont l'aluminium, le fer, le magnésium, le titane et le manganèse. Tous les autres métaux, dont beaucoup ont de nombreux usages, sont géochimiquement rares » (Skinner, 1976).

Enfin, l'idée que le progrès scientifique pourrait permettre de synthétiser artificiellement des matériaux rares ou de transformer un élément chimique en un autre et ainsi de faire fi de toute rareté naturelle est présente dans les écrits néoclassiques depuis les années 1960 : « *Advances in fundamental science have made it possible to take advantage of the uniformity of matter/energy, a uniformity that makes it feasible without preassignable limit, to escape the quantitative constraints imposed by the character of the earth's crust… Nature imposes particular scarcities, not an inescapable general scarcity*. » (H. J. Barnett & Morse, 1963). Et se retrouve particulièrement dans les idées des abondancistes, comme nous l'avons vu au paragraphe 1.7. Pour Daly, cette affirmation relève du « rêve de l'alchimiste de convertir le plomb en or » (Herman E Daly, 1997) et d'une vision où la nature n'interviendrait que dans la fourniture des éléments de départ de l'économie. Pour lui, cette vision a le mérite de respecter la première loi de la thermodynamique (la conservation), mais pas la deuxième. En effet, « même s'il peut être techniquement possible de convertir le plomb en or, éliminant ainsi, la rareté particulière de l'or, cela n'enlève pas la rareté de manière générale, puisque le potentiel pour une telle conversion est lui-même rare. En effet ce potentiel doit être continuellement épuisé par l'économie et refournit par la nature sous la forme de ressources naturelles de basse-entropie » (Herman E Daly, 1997). Une autre manière de le formuler est qu'une telle conversion demande de l'énergie et de la matière en grande quantité, ne résolvant pas le problème général de la déplétion.

3.1.4. Le taux d'actualisation, un concept non opérationnel pour la conservation des ressources

Comme nous l'avons vu au paragraphe 1.5, l'émergence du concept de développement durable va de pair avec la recherche d'un taux d'actualisation compatible avec une éthique intergénérationnelle. Pour Jacques Richard, la réflexion sur un taux d'actualisation compatible avec le développement durable prend son essor dans les années 1980, avec l'augmentation des taux d'intérêt attendus : « En finance moderne pure, le taux d'actualisation, ou « coût du capital », est déterminé par référence à un taux « estimé par le marché » qui tient compte d'un niveau moyen de rentabilité attendu pour les entreprises, compte tenu de la croissance économique espérée et du rapport de force entre capitalistes et salariés. Alors qu'au début du 19ème siècle, il était courant de ne retenir qu'un taux de 5%, à partir de la montée en puissance du capitalisme financier, vers 1980, ces taux se sont élevés jusqu'à 10% et même 15% traduisant une pression accrue sur les salaires. […] Cette montée du coût du capital n'a pas eu seulement des conséquences sociales mais a posé un grave problème théorique aux économistes et gestionnaires environnementaux. En effet, avec des taux de l'ordre de 5% le futur à long terme est laminé et ne compte pratiquement pas dans le raisonnement. Ainsi, au taux annuel de 1% un million d'euros dans 300 ans vaut 50 000 aujourd'hui tandis qu'au taux annuel de 5% ce même million dans 300 ans vaux 0,5 euro aujourd'hui ! La conséquence est immédiate : si on décide d'appliquer des taux « financiers » dictés par le marché au choix des investissements environnementaux pour comparer les actuels d'une protection […] aux bénéfices à long terme de ces mesures […] aucun investissement ne sera retenu ! […] les économistes environnementaux […] ont réagi, mais en ordre dispersé. Ils ont proposé pour la plupart soit de réduire les taux d'actualisation, soit d'augmenter la valeur des dommages futurs environnementaux, soit de « jouer » simultanément sur ces deux facteurs » (Richard & Plot-Vicard, 2014, p. 25-26). L'approche d'un taux d'actualisation compatible avec le développement durable ou soutenable est rejetée dès la fin des années 1970 par Georgescu-Roegen dans son commentaire des articles de Daly et Stiglitz (Nicholas Georgescu-Roegen, 1979). Pour Georgescu Roegen les concepts de l'ENC d'équité et d'efficience intergénérationnelles ne prennent pas en compte les irréversibilités liées à la déplétion, et la modulation du taux d'actualisation ne suffit pas à prendre en compte ces irréversibilités (Nicholas Georgescu-Roegen, 1979). Georgescu-Roegen, tout comme Daly, est un des fondateurs de l'économie écologique. Pour lui la recherche d'un taux d'actualisation soutenable vient s'heurter au caractère fini des stocks de ressources. Il souligne que si l'on considère qu'il n'y a pas de préférence pour le présent (taux d'actualisation nul) dans les équations d'Hotelling (c'est-à-dire que toutes les utilités futures se valent), la solution analytique d'Hotelling est de répartir la

consommation des ressources de manière uniforme dans le temps. Comme le temps est infini et que la ressource est finie, le résultat est que le taux de consommation annuel de la ressource est nul, rendant le modèle d'Hotelling parfaitement inutile. « Pour Georgescu-Roegen, il vaudrait donc mieux minimiser les regrets futurs que maximiser l'utilité car l'actualisation revient à une dictature du présent sur le futur » (Fizaine, 2014, p. 99). Pour l'ENC, au « sein du temps économique, s'il existe des préférences intertemporelles, l'actualisation se justifie parce que les moments du temps ne sont pas considérés comme équivalents (perspective utilitariste). » (Ferrari & Mery, 2009), c'est ce qu'on appelle « la préférence pour le présent » censée rendre compte des préférences individuelles. Or, l'irréversibilité de l'épuisement des ressources, alliée à l'augmentation de problématiques environnementales majeures, notamment le contexte du changement climatique et de ses impacts, avec une transition énergétique dépendante de la disponibilité des ressources métalliques comme nous l'avons vu au paragraphe 0, laisse entrevoir la possibilité que les générations futures aient plus besoin que nous de certaines ressources, c'est-à-dire que les moment du temps ne seraient pas équivalents, mais induiraient plutôt des taux d'actualisations négatifs. Ceci se justifie notamment par des perspectives de risque d'effondrement : la dégradation des ressources naturelles et de leurs aménités pourrait « avoir des conséquences très fâcheuses sur la pérennité du « circuit économique ». […] Diamond (2006) a mis en avant la mauvaise gestion des ressources naturelles et de l'environnement comme l'un des cinq facteurs clés concourant à l'effondrement et la disparition d'une civilisation. » (Fizaine & others, 2015). Jacques Richard souligne également que « face à la possibilité de catastrophes, certains économistes [environnementaux] comme Weitzman [2010] en viennent à douter de l'applicabilité de la méthode d'actualisation elle-même » (Richard & Plot-Vicard, 2014)

Au-delà du débat théorique sur l'existence d'un taux d'actualisation optimal pour la conservation des ressources, le caractère opérationnel de la modification du taux d'actualisation pour préserver les ressources est questionné. Jacques Richard note tout d'abord qu' « il y a véritablement une incertitude sur le niveau concret du taux d'actualisation à utiliser : un économiste comme Sterne [2006], très influencé par les questions d'éthique, considère qu'un taux de 1,4% est correct alors que d'autres, comme les experts de la Banque Mondiale, retiennent un taux de 4% » (Richard & Plot-Vicard, 2014). De plus, Norgaard souligne que des effets ambigus peuvent être produits par le choix d'un taux d'actualisation faible, du fait de l'impact sur les prix des matières premières : « il apparaît en première analyse que de faibles taux d'actualisation favorisent une utilisation plus lente du stock de ressources. Sans surprise, de nombreuses personnes préoccupées par l'environnement voient un lien fort entre le taux d'actualisation, la conservation des ressources et le développement soutenable […] La croissance de beaucoup d'arbres prend du temps. Des forêts tropicales peuvent regagner leur diversité originale après la coupe, mais un siècle peut être nécessaire. Comme de nombreuses espèces d'arbres se reproduisent à une vitesse plus faible que le taux d'intérêt, il n'est pas financièrement rentable de les cultiver. C'est pourquoi les forestiers et les environnementalistes préoccupés par la soutenabilité de la sylviculture ont plaidés pour utiliser des taux d'actualisation plus faibles pour évaluer les projets forestiers. Les arguments contre l'utilisation de taux d'actualisation plus faibles dans le but de favoriser les générations futures apparaissent tout aussi solides. L'utilisation de ressources et la transformation de l'environnement sont entreprises en lien étroit avec le capital produit. Le travail utilisé dans l'exploitation des ressources et dans les transformations environnementales est également traité comme un coût du capital, puisque l'exploitation et les transformations sont vues comme un capital. Par conséquent, les taux d'actualisation faibles rendent relativement moins chères l'exploitation des ressources et les transformations environnementales, et de ce fait sont susceptibles d'être accélérées. Les faibles taux d'intérêt favorisent les investissements nécessaires pour transformer des forêts tropicales riches en biodiversité en monocultures. Une politique de taux d'intérêt bas profite aux générations futures de la même manière qu'une politique favorisant l'alimentation bon marché profite aux pauvres lorsque la majorité des pauvres sont des agriculteurs » (Norgaard, 1992). Il en conclut que la protection des ressources pour les générations futures n'est pas une question de taux d'intérêt : «En s'abstenant de se poser des questions sur l'avenir en termes de répartition intergénérationnelle

des droits sur les actifs naturels et autres, l'argument en faveur de l'utilisation de taux d'actualisation plus faibles pour protéger les générations futures devient discutable. Si les sociétés veulent protéger les générations futures, elles devraient assurer leurs droits, ou s'en préoccuper plus. Quand elles le font, les opportunités d'investissement et les économies pour les générations actuelles, et donc le taux d'intérêt, changent en conséquence. En théorie, le taux d'intérêt peut augmenter ou diminuer dans la transition vers le développement durable, mais ce n'est pas l'essentiel parce que le taux d'intérêt se traduit simplement par un prix d'équilibre. Ce qui est important, c'est que les types d'investissements et de transferts aux générations futures changent » (Norgaard, 1992).

La conclusion de Norgaard sur la nécessité de protéger les ressources via l'établissement de lois et de normes fait écho à certains écrits des économistes institutionnels dès les années 1950. Ainsi, Ciriacy-Wantrup (S. V. Ciriacy-Wantrup, 1952), ingénieur agronome spécialiste de l'économie agricole et devenu un des précurseurs de l'économie écologique et de l'économie institutionnelle, prône l'abandon du calcul acturiel comme moyen de gérer l'allocation intertemporelle des ressources pour les « cas de décisions qui peuvent entraîner de très grandes pertes, voire des pertes irrémédiables du capital naturel » (Richard & Plot-Vicard, 2014). Ciriacy-Wantrup (S. V. Ciriacy-Wantrup, 1952) prône la création de normes pour conserver les ressources : pour « éviter des catastrophes futures du fait de la dégradation des sols, la destruction des espèces et des forêts, il faut définir des normes de sécurité minimales en matière de conservation. Ces normes seront des normes physiques pour éviter aux intéressés de s'engager dans des « zones critiques » dans lesquelles le risque d'irréversibilité ne peut être exclu » (Richard & Plot-Vicard, 2014, p. 27).

Nous avons donc vu que la croissance durable définie comme la maximisation du bien-être des générations successives chez les néo-hotelliniens s'oppose à l'idée de la conservation des ressources naturelles pour les économistes écologiques. Ainsi, ils rejettent les modèles néoclassiques conçus dans un cadre où les moments du temps sont considérés comme équivalents comme n'étant pas capable de traduire les irréversibilités liées au phénomène de déplétion des ressources. La non-substituabilité des ressources par des capitaux produits par l'homme est affirmée et devient un critère de durabilité définissant un projet de « soutenabilité forte » par opposition à la soutenabilité des modèles de croissance des néo-hotelliniens considérée comme « faible ». C'est cette approche que nous adoptons dans la thèse qui nous semble la seule à même de pouvoir prendre en compte les phénomènes irréversibles de déplétion des ressources métalliques décrits au paragraphe 2. Enfin, la modulation du taux d'actualisation est considérée comme inadéquate pour lutter contre la déplétion. Certains auteurs comme Ciriacy-Wantrup et Norgaard entament un travail sur les leviers institutionnels pour la préservation de ces ressources faisant ainsi le lien entre l'économie écologique et institutionnelle.

3.2. Liens entre la sphère économique, et les sphères sociale et biophysique : impacts en augmentation du fait de la diminution irréversible de qualité des ressources

Que ce soit dans l'économie écologique ou dans l'économie néoclassique les problématiques d'épuisement sont pensées dans le cadre d'une réflexion sur le développement soutenable, même si nous avons vu que les conceptions de la soutenabilité n'étaient pas les mêmes. Cette réflexion sur le développement soutenable a porté depuis les années 1980 sur des questions d'épuisement des ressources naturelles, mais plus largement sur les atteintes à l'environnement et sur la viabilité sociale de notre système de production. Selon l'approche de l'économie écologique et de la soutenabilité forte, les éléments des sphères sociales et environnementales doivent être préservés pour eux-mêmes et ne sont pas substituables, de la même manière que nous avons vu que les ressources naturelles et le capital n'était pas substituables. De même, la question de l'irréversibilité des dégradations occupe une place importante dans les réflexions de l'économie écologique comme nous allons le voir. Au-delà de la question de la déplétion telle que définie au paragraphe 2, il s'agit donc de s'interroger dans une perspective de soutenabilité forte sur les impacts environnementaux et sociaux générés par les processus de production et de consommation des

ressources métalliques. Il s'agira ensuite de s'interroger sur les liens entre ce phénomène de déplétion physique et ces impacts sociaux et environnementaux, avant de proposer une redéfinition de déplétion prenant en compte ces liens.

3.2.1. Les enjeux sociaux et environnementaux de la mine à la fin de vie

Ce paragraphe ne s'attarde pas sur la définition de la notion d'impacts et sur le choix du cadrage théorique et méthodologique pour prendre en compte les impacts. Le choix d'un cadre conceptuel de la notion d'impacts sociaux et environnementaux et le choix d'une méthodologie de prise en compte des impacts de la production des ressources métalliques seront discutés dans le chapitre 2. Il s'agit ici d'une brève synthèse des principaux enjeux sociaux et environnementaux évoqués dans la littérature concernant la production des ressources métalliques. Ces enjeux sont : le changement climatique, l'acidification, les principaux enjeux sanitaires, et les principaux enjeux sociaux (conditions de travail, secteur informel, changement d'usage des terres ou empreinte minière, et gestion parfois violente des conflits sociaux). Seront ensuite évoqués de manière synthétique les mêmes enjeux pour le recyclage avec une comparaison avec la production primaire. Ces enjeux n'ont pas de prétention à être exhaustifs : par exemple l'eutrophisation, n'a pas fait l'objet de nombreuses études sur son lien spécifique avec l'industrie minière et métallurgique[22] et a donc été écartée de ce bref résumé. Cette synthèse des enjeux ne s'attarde sur les différences entre métaux que lorsque ces différences sont particulièrement significatives, notamment pour les impacts sanitaires. Le chapitre 3 de la thèse présentera une étude de cas pour l'antimoine et le néodyme qui entrera dans les détails des impacts spécifiques de ces substances. Nous nous concentrons ici sur les principaux enjeux sociaux, environnementaux et sanitaires liés à l'exploitation des métaux à l'échelle mondiale. Lorsque les études utilisées et les enjeux analysés le permettent, nous distinguerons les étapes principales de production des métaux (voir Tableau 7 pour la définition des termes) : minière (de la ressource au concentré), métallurgique (du concentré au métal affiné), puis concernant la fin de vie des produits (gestion formelle ou informelle des produits contenant des métaux). Ces étapes ne sont pas exhaustives et ne prennent pas en compte l'utilisation des produits contenant des métaux et le transport.

i. Les enjeux climatiques de la production minière et métallurgique des ressources métalliques

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthodologie largement utilisée, permettant la mesure d'impacts environnementaux clefs le long du cycle de vie des produits. Les activités minières et de traitement font partie intégrante de la plupart des cycles de production, et l'application de l'ACV aux minéraux et aux métaux a ainsi gagné une importance conséquente dans le monde de la recherche (Yellishetty et al., 2009). Dans la dernière décennie, l'utilisation accrue de l'ACV dans le secteur minéral et des métaux a fait progresser les connaissances scientifiques à travers le développement de bases de données d'inventaires utilisés pour l'ACV. Cependant, même si les inventaires sont nombreux (Nuss & Eckelman, 2014), l'extraction d'informations spécifiques à un métal reste un problème, les données étant agrégées (pré-allouées ou à l'échelle du procédé systémique), ou au contraire représentatives d'une forme spécifique chimique du métal, ou tout simplement dépassées. Certains métaux (Be, Sc, Ge, Sr, Zr, Nb, Ru, Ba, Hf, Re, Os, Ir, Bi, and Th) ne sont tout simplement pas répertoriés, mais sont traités dans l'article Nuss et Eckelman (Nuss & Eckelman, 2014). Ces métaux non répertoriés sont tous des petits métaux. En effet les connaissances en termes d'impacts environnementaux sont beaucoup plus approfondies pour les grands métaux industriels, dont les valeurs moyennes d'impact utilisées pour les ACV se basent sur de nombreuses données de terrains, que pour les petits métaux, qui, même quand ils sont répertoriés ne font parfois l'objet que

[22]Bien qu'il existe probablement des liens : l'industrie minière rejette des substances qui peuvent être à l'origine d'eutrophisation : « des niveaux élevés de composés d'azote et de cyanure (ammoniac, nitrate, nitrite) peuvent également être trouvés dans les eaux des sites miniers, en provenance de la lixiviation en tas et des produits d'abattage par explosifs » (Environmental Law Alliance Worldwide, 2010).

d'estimations. C'est par exemple le cas pour la famille des terres rares, pour lesquels l'étude de Nuss et Eckelman se reporte à la base EcoInvent (Supporting information Nuss & Eckelman, 2014). En effet, les données environnementales des terres rares sont tirées de l'inventaire 2.0 de 2007 (Althaus et al., 2007), pour lesquelles la consommation énergétique et d'eau est estimée à partir de valeurs moyennes de procédés jugés similaires, comme les mines de phosphates.

Le but de l'étude de Nuss et Eckelman est d'apporter des propositions méthodologiques pour prendre en compte dans l'ACV la complexité des systèmes de production des métaux, compléter les inventaires de ces métaux et proposer un panel des impacts environnementaux. Ces impacts environnementaux sont étudiés de la mine au métal affiné, et prennent en compte la part de ressources secondaires utilisées lors des procédés métallurgiques : «*The comparative LCA model was constructed using the following steps: First, the 2008 production mix for each element is determined. For example, Ag is produced from Cu ores (17%), Pb ores (28%), Au-Ag ores (34%) and secondary sources (21%) […] Results are then based on a production weighted average over all production routes with a functional unit* » (Nuss & Eckelman, 2014). Les 3 étapes (minière, métallurgique, et gestion des produits en fin de vie) sont ici imbriquées dans l'évaluation de l'impact climatique, qui inclut la mine et la métallurgie avec une part de recyclage. Ceci est cohérent avec le fonctionnement de l'industrie du recyclage évoqué au point 2.6 qui présente souvent des liens avec l'industrie métallurgique transformant les produits miniers. En revanche, l'impact des métaux sortant du système de production et de consommation (finissant en décharge, dans la nature, ou dans des circuits de récupération informels) n'est pas pris en compte dans cette étude.

Nous nous proposons ici d'exposer leurs résultats (Nuss & Eckelman, 2014) concernant le changement climatique. Nous avions souligné au paragraphe 0 que l'immense majorité de l'énergie nécessaire à l'exploitation minière et au traitement des minerais était pourvue par des ressources énergétiques fossiles. Ainsi, les contributions (directe et indirecte) du secteur minier et métallique en 2008 aux émissions mondiales de gaz à effet de serre, ou *Global warming potential*[23] (GWP), étaient-elles estimées à 3,4 Gt CO_2-eq/an et l'utilisation d'énergie primaire à 49 EJ/an, soit 9,5% de la *Cumulative Energy Demand*[24] (CED). Ces indicateurs énergétiques, parmi les différents indicateurs environnementaux étudiés dans l'article, sont ceux dont l'estimation est la plus fiable (Nuss & Eckelman, 2014).

[23] Le *Global warming potential* (GWP) ou potentiel de réchauffement global (PRG) est un indicateur visant à faciliter la comparaison de différents gaz à effet de serre qui n'ont pas les mêmes effets sur le climat à quantité produite égale. Il est utilisé pour prédire les impacts relatifs de différents gaz sur le changement climatique en se basant sur leurs propriétés radiatives et leur durée de vie. Le pouvoir réchauffant du gaz est donc ramené à celui d'un kilogramme de CO_2 (l'unité est le CO_2-eq). Il s'agit ici du calcul du PRG moyen d'un mélange de gaz à effet de serre produits pendant le cycle de vie du métal.

[24] La *cumulative energy demand* (CED) est définie dans l'article de Nuss et Eckelman (Nuss & Eckelman, 2014) en référence au SimaPro Database Manual de 2008. D'après la version actualisée (PRé, 2018) cette définition est basée sur un document de 2007 (Frischknecht et al., 2007) : « L'analyse des besoins énergétiques cumulatifs […] vise à étudier la consommation d'énergie tout au long du cycle de vie d'un bien ou d'un service. Cela comprend les utilisations directes ainsi que la consommation indirecte ou grise d'énergie due à l'utilisation, par ex. de matériaux de construction ou de matières premières. Cette méthode a été développée au début des années soixante-dix après la première crise du prix du pétrole et a une longue tradition (Boustead et Hancock, 1979; Pimentel, 1973). […] Différents concepts pour déterminer le besoin en énergie primaire existent. Pour les calculs de CED, on peut choisir la valeur énergétique inférieure ou supérieure des vecteurs d'énergie primaire […]. En outre, on peut distinguer les besoins énergétiques des ressources renouvelables et non renouvelables» (Frischknecht et al., 2007).

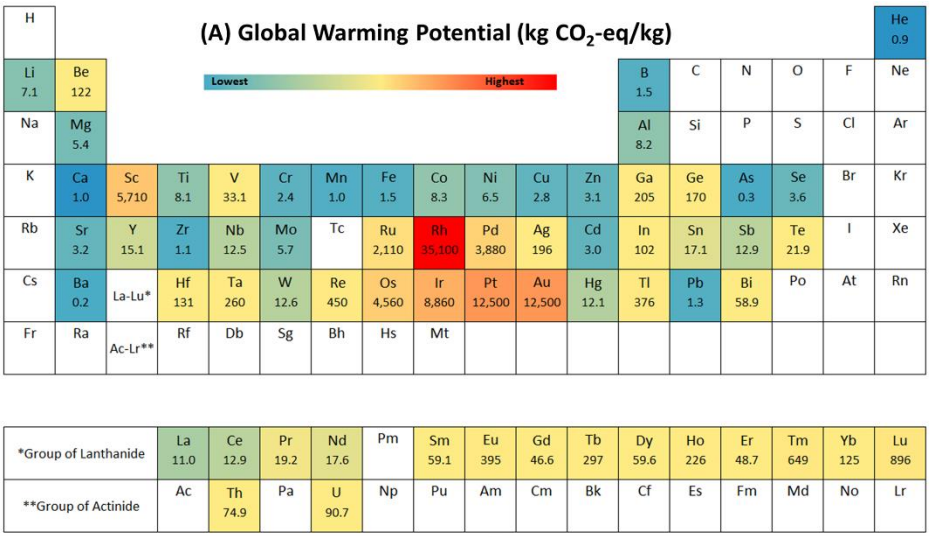


Figure 13 : Tableau périodique des GWP des éléments, calculés sur le cycle de la ressource minière au métal affiné par kilogramme de chaque élément (kg CO_2-eq/kg). La coloration représente les GWP les plus bas (bleu) aux plus élevés (rouge). Les GWP indiqués sont pondérés par la composition de l'offre de 2008 (allocation économique) pour chaque élément. Source : Nuss & Eckelman, 2014

Cet aperçu des GWP de l'ensemble des éléments (Figure 13) permet de voir que la production de gaz à effet de serre est plus importante par unité de métal produite pour les petits métaux et particulièrement pour les métaux précieux (voir Tableau 6). C'est cohérent avec les caractéristiques générales de production des petits métaux et métaux précieux : ce sont généralement des métaux qui sont des coproduits[25] des grands métaux industriels et sont généralement présents en faible teneur dans les gisements. Cela peut être illustré avec deux exemples marquants : concernant l'or pour les métaux précieux, sa teneur moyenne mondiale d'exploitation était estimée en 2012 à 3,5 ppm (soit 3,5 g/t) (Terry Norgate & Haque, 2012), alors que pour le plus exploité des grands métaux industriels, le fer, la teneur minimale d'un gisement pour être considérée comme économiquement exploitable était estimée à 25% (soit 250 kg/t) (Yellishetty, Ranjith, & Tharumarajah, 2010). Comme nous le verrons dans le point 3.2.2, la faible teneur des gisements induit un apport énergétique proportionnellement plus élevé pour récupérer une quantité égale de matériaux.

Cependant, même si l'intensité des impacts climatiques est moindre pour les grands métaux industriels tel que le fer, il est à noter qu'en valeur absolue les grands métaux industriels pèsent plus sur le climat au niveau mondial du fait de volumes de production considérablement plus élevés que ceux des petits métaux. En effet, si l'on reprend nos deux exemples : la production minière mondiale de fer en 2008 (Jewell & Kimball, 2008) s'élevait à 2,2 Gt (en fer métal contenu dans le minerai) et comptabilisait pour 73,7% de la CED dans le secteur minier et métallique (Nuss & Eckelman, 2014), alors que pour la même année la production minière mondiale de l'or s'élevait à 2,33 kt (Jewell & Kimball, 2008) et comptabilisait pour 1,5% de la CED dans le secteur minier et métallique (Nuss & Eckelman, 2014).

Enfin, il faut souligner que pour obtenir ces données Nuss et Eckelmann procèdent à une allocation économique[26], or les métaux précieux ont un prix très élevé ce qui alourdit la part d'impacts

[25] Coproduits sont « des éléments mineurs ou impuretés présents dans les minerais qui ont une valeur économique et technologique » (Verhoef, Dijkema, & Reuter, 2004)

[26] « Attribuer à chaque métal issu d'une coproduction de plusieurs métaux une proportion appropriée d'impacts environnementaux peut être réalisée de plusieurs manières standardisées, par exemple en appliquant une allocation de masse ou une allocation économique, comme spécifié dans les normes ISO pour les ACV […]. Dans cet article, les prix moyens mobiles de 2006 à 2010 tirés des USGS Mineral Commodity

attribués à ces métaux. En effet, le choix de la méthode d'allocation influe sur les résultats pour les petits métaux, qui se trouve en petites quantités dans les gisements et ont une forte valeur ajoutée (en particulier les terres rares et les platinoïdes voir Figure 14), et voient donc leurs impacts environnementaux alourdis par l'allocation économique. A l'inverse Ag, Te, Se, Cd, As ont un bilan environnemental allégé par l'allocation économique, car la majorité de leur production se fait en coproduit ou sous-produit d'une substance plus coûteuse. Enfin, le graphique (b) de la Figure 14 nous montre que l'allocation économique est peu sensible aux variations des prix des métaux dans le temps.

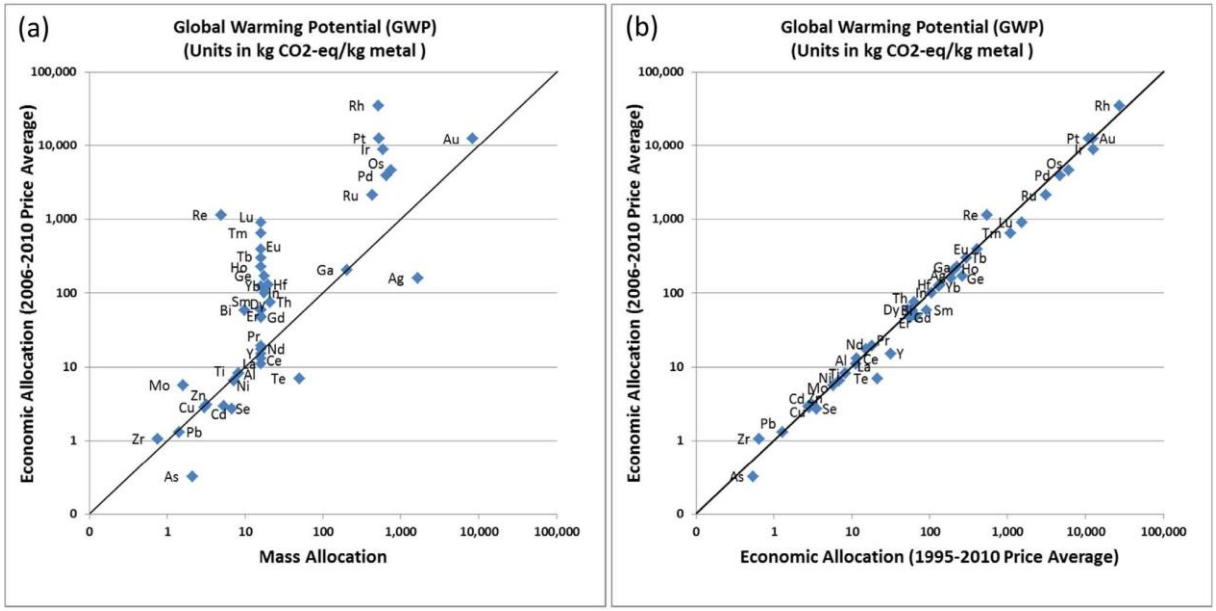


Figure 14 : Effet du choix de l'allocation sur le GWP. Source : Nuss & Eckelman, 2014

(a) Résultats de l'allocation économique en fonction de l'allocation massique

(b) Allocation économique réalisée avec des prix de différentes périodes (prix moyen 1995-2010 en abscisse et 2006-2010 en ordonnée)

ii. Les enjeux liés à l'acidification de la production minière et métallurgique des ressources métalliques

L'acidification est un impact connu des systèmes miniers. Il n'existe pas de revue aussi systématique que ce qui a été présenté pour le CED et le GWP de ces phénomènes pour les métaux. En effet, Nuss et Eckelman affirment dans leur article que l'étude de l'acidification terrestre, l'eutrophisation et la toxicité humaine n'est pas pleinement réalisée, car « il y a un manque de disponibilité des données d'ACV concernant beaucoup des métaux étudiés et des modèles qui décrivent, par exemple, comment les stériles miniers se comportent dans l'environnement après dépôt » (Nuss & Eckelman, 2014). Quelques résultats sont présentés dans leur étude concernant ces 3 impacts, mais ne font que

Summaries sont utilisés pour répartir toutes les charges environnementales dans le système de production de métaux » (Nuss & Eckelman, 2014). Ainsi, selon la norme ISO 14044, quand deux substances sont coproduites l'allocation devrait être évitée autant que possible, que ce soit par la division du processus multifonction en sous-processus et la collecte de données distinctes pour chaque sous-processus, ou grâce à l'expansion des systèmes étudiés. Quand l'allocation ne peut être évitée, la répartition devrait refléter les relations physiques entre les pressions sur l'environnement et les fonctions, c'est à dire, la façon dont les impacts sont modifiés par les changements quantitatifs dans les fonctions fournies par le système. Quand cette relation seule ne peut pas être utilisée comme base pour l'allocation physique, la répartition devrait refléter d'autres relations entre les pressions sur l'environnement et les fonctions. Enfin, seulement si ces trois solutions ne sont pas applicables, l'allocation économique est préconisée.

révéler que « pour certains éléments [… les impacts] ne sont peut-être pas gouvernés par l'intensité énergétique et le mix énergétique du procédé de production des métaux, mais peuvent également être dus à d'autres facteurs incluant la gestion des stériles miniers sulfurés ou des pollutions acidifiantes pour l'air, le sol et l'eau, ainsi que la toxicité humaine » (Nuss & Eckelman, 2014). L'acidification dans le secteur minier et métallurgique est principalement liée à deux phénomènes : le drainage minier acide au niveau des mines et les pluies acides au niveau métallurgique. A défaut d'une revue mondiale systématique, « *At present there is not sufficient data on the public record to examine this quantity of waste rock with respect to the potential for acid mine drainage or other environmental problems, leaving major uncertainty with respect to the long-term sustainability of waste rock production and management* » (G. M. Mudd, 2007c) et d'une quantification des impacts créés par ces deux phénomènes, ils seront décrits ici et leurs principaux impacts seront listés.

Le drainage minier acide (DMA ou *AMD* en anglais) est dû à l'oxydation du fer et du soufre, notamment de la pyrite le minéral sulfuré le plus commun dans les gisements (BRGM, 2001; Poulard, Daupley, et al., 2017). Or les gisements contenant des sulfures concernent un certain nombre de grands métaux industriels et donc exploités à plus de 200 000 tonnes par an (voir Tableau 6) : les gisements de plomb-zinc (le plomb étant sous forme de galène un minéral sulfuré), cuivre (le minéral sulfuré étant la chalcopyrite), d'étain, de molybdène, de nickel (le minéral étant la pentlandite) (Arndt, Kesler, & Ganino, 2015; Worrell & Reuter, 2014, p. 256), etc. Mais également des métaux précieux comme l'or (Akcil & Koldas, 2006) et l'argent, dont les volumes de production sont plus faibles, mais dont l'ampleur de la production des déchets miniers en font des candidats importants pour la production de drainage minier acide. C'est donc un problème très courant, identifié comme un enjeu majeur de la gestion environnementale des sites miniers (Akcil & Koldas, 2006; Environmental Law Alliance Worldwide, 2010; Poulard, Daupley, et al., 2017). Lorsque les sulfures contenus dans la roche sont extraits et exposés à l'eau et à l'air pendant l'exploitation minière, ils forment de l'acide sulfurique (BRGM, 2001) selon la réaction suivante pour la pyrite : $FeS_2 + 7/2\ O_2 + H_2O \Rightarrow 2SO_4^{2-} + Fe^{2+} + 2H^+$. Cette réaction est amplifiée en milieu acide et souvent accélérée par la présence de bactéries telles que les *thiobacillus*, ce qui en fait une réaction auto-entretenue (BRGM, 2001). La réaction d'oxydation a lieu à cause de l'air et/ou du ruissèlement des eaux de surface. L'acide sulfurique se forme à partir de nombreuses sources contenant ces sulfures (voir Tableau 9).

Tableau 9 : Sources de drainage minier acide. Source : traduit d'Akcil & Koldas, 2006

Sources primaires	Sources secondaires
Verses à stériles	Bassin de rétention des boues de traitement
Parc à résidus (bassin de rétention des résidus)	Coupes de roche
Travaux miniers souterrains et mine à ciel ouvert	Chargement de concentré
Eaux souterraines pompées (exhaure) ou naturelles	Stockage de minerai
Les suintements diffus provenant des stériles de découverture déplacés dans les zones réhabilitées	Fuites de concentré le long des routes
Réutilisation de la roche en construction dans des routes des barrages, etc.	Bassin de rétention d'urgence

Dans ce tableau (traduit de Akcil & Koldas, 2006) les deux premières sources, les stériles et les

résidus, c'est-à-dire les déchets miniers sont souvent les sources les plus importantes d'acidification sur le long terme. Le terme de « stériles » a déjà été expliqué dans le Tableau 7, et désigne les déchets de type A, B, ou C (déchets liés à l'activité minière et aux premières étapes de tri) sur la Figure 15, il est distingué d'un deuxième type de déchet minier[27] : les « résidus », désignant les déchets de type F et G (déchets produits lors de la phase de production du concentré). Les termes de mine à ciel ouvert (MCO) et mine souterraine (ou travaux miniers souterrains TMS) sont également explicités par la Figure 15.

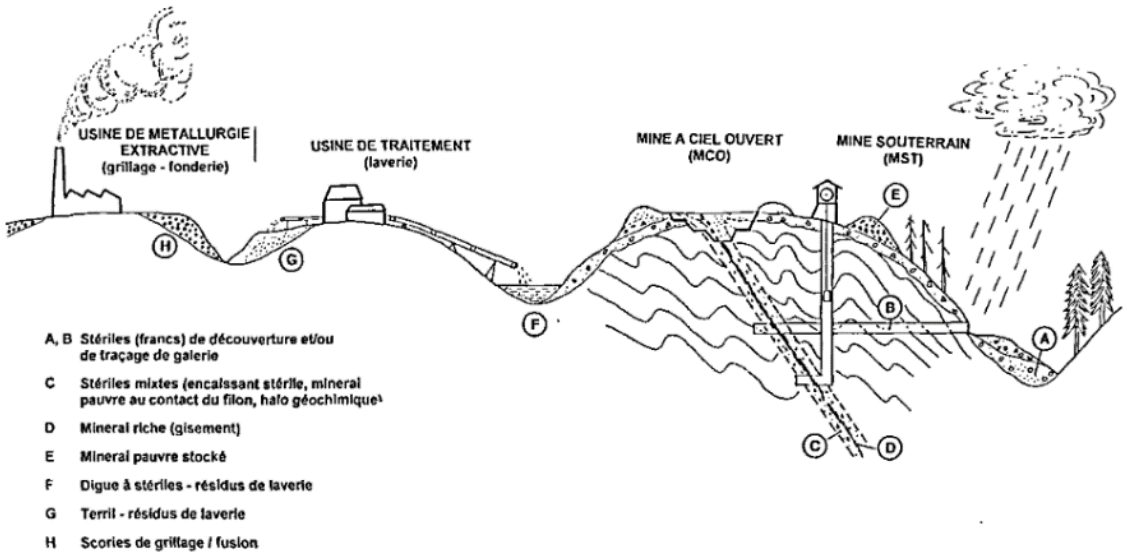


Figure 15 : Étapes de production des déchets d'exploitation minière (A-G) et du traitement métallurgique (H). Source :BRGM, 1999

Concernant les impacts environnementaux de ce phénomène, l'acidité ainsi produite affecte l'eau souterraine, et directement ou indirectement l'eau de surface, avec des effets sur la vie végétale et animale. Les cours d'eau affectés ont ainsi un pH entre 2 et 4,5 (Jennings, Blicker, & Neuman, 2008), similaire à l'acide de batterie (Environmental Law Alliance Worldwide, 2010). Le seuil au-dessus duquel il n'y a pas d'effet sur la vie aquatique se situe entre 6,5, qui correspondrait à l'absence d'effet et 5,5, pour lequel « la plupart des poissons ne seraient pas affectés » (Fromm, 1980 in Jennings et al., 2008). Une étude sur la distribution des poissons dans les cours d'eau de Pennsylvanie affectés par le drainage minier acide montre qu'entre ces deux valeurs 38 espèces de poissons survivent, pour 68 espèces de poissons dénombrées au-dessus (en pH normal) et seulement 10 espèces de poissons survivant à un pH inférieur à 5,5 (Cooper and Wagner, 1973 in Jennings et al., 2008). En dessous de 4,5, l'étude montre que dans 90% des cours d'eau affectés, les poissons ont complètement disparu. La baisse, voire la disparition totale des ressources halieutiques est documentée par de nombreuses autres études (Menendez, 1978; Barry et al. 2000; Farag et al., 2003; Olsen et al. 2004 in Jennings et al., 2008). En plus de cet effet direct du pH il existe de nombreux effets indirects tels que la précipitation des hydroxydes et oxyhydroxydes de fer sur des milliers de kilomètres de cours d'eau en aval. Les effets délétères de cette précipitation sur les populations de poissons sont surtout mécaniques : le dépôt recouvre les sédiments et les lits de ruisseaux détruisant les habitats, les lieux de pontes et les aliments (Jennings et al., 2008).

Concernant les effets sanitaires, le DMA présente également un impact, qui provient principalement du fait que l'acide peut dissoudre le cuivre, l'aluminium, le cadmium, l'arsenic, le plomb ou le

[27] En anglais la distinction sur ces deux types de déchets n'est pas la même : le terme « *tailings* » désigne la plupart du temps les résidus et les stériles de sélectivité ou mixtes. Le terme « *waste rock* » désignant les stériles de découverture ou stériles francs.

mercure, des éléments qui peuvent être présents naturellement dans la roche. Ces éléments peuvent donc se retrouver dans l'eau de boisson ou dans les aliments consommés, comme le poisson. L'effet consiste donc essentiellement en un renforcement de la pollution aux métaux lourds, enjeu qui sera exposé au point suivant. Concernant l'acidité elle-même, l'organisation mondiale de la santé ne donne pas de norme de potabilité concernant le pH de l'eau, bien qu'un optimum indicatif soit donné entre 6,5 et 9,5 (OMS, 2007). Les eaux issues du DMA sont donc en dehors de cet optimum.

L'étendue du phénomène d'acidification dans l'espace dépend énormément du type de géologie des terrains entourant l'exploitation : dans « les régions constituées de terrains acides, l'acidité des eaux est conservée et les métaux sont transportés sous forme soluble à grande distance. Dans les régions constituées de terrains calcaires (basiques), en revanche, les eaux acides sont rapidement neutralisées par les roches carbonatées, et la plupart des métaux deviennent insolubles et précipitent » (Poulard, Daupley, et al., 2017). Il faut cependant noter que la neutralisation du pH n'empêche pas la dissémination des pollutions métalliques. Pour prendre quelques exemples des superficies potentiellement concernées par le DMA, le « service forestier des Etats-Unis (USFS) estime qu'entre 20 000 et 50 000 mines génèrent actuellement de l'acidité sur des terres gérées par l'agence avec un impact négatif sur 8 000 à 16 000 km de cours d'eau (USDA, Forest Service 1993) » (Jennings et al., 2008). Un exemple également parlant en termes de superficie est également exposé par Mudd (G. M. Mudd, 2007c) concernant un cas de drainage minier acide en Australie : la mine de Mt Lyell dont le drainage minier acide « se poursuit en aval jusqu'à l'écosystème marin de Macquarie Harbour » (G. M. Mudd, 2007c) à une cinquantaine de kilomètres du site minier. Les cas présentés ici sont relatifs à la dissémination « normale » du phénomène de DMA, sans compter les éventuels accidents liés à la gestion des déchets.

L'étendue du phénomène dans le temps est très importante. Le drainage minier acide est d'autant plus dangereux qu'il peut continuer à causer des dommages bien après la fermeture de l'exploitation minière, et qu'il est virtuellement impossible de l'arrêter une fois que la réaction a débuté, même avec les technologies existantes, notamment parce que les volumes de déchets à l'œuvre sont colossaux (Environmental Law Alliance Worldwide, 2010). A titre d'exemple, on peut noter que « le drainage minier acide continue d'émaner de mines en Europe établies durant l'empire romain (CSS, 2002). Georgius Agricola dans son ouvrage *De Re Metallica* (1556), le premier traité séminal sur la mine montrait déjà […] la dévastation des cours d'eau » (Jennings et al., 2008). La durée de ce phénomène et le fait qu'il soit très imbriqué avec la gestion des déchets miniers dont les volumes sont importants est un point crucial du DMA. En effet, cela imbrique ce phénomène avec la question des accidents liés à l'endiguement des déchets. En effet, il n'est pas rare que des années après les fermetures des mines les dispositifs visant à endiguer les déchets subissent des défaillances, comme nous le verrons au point sur les enjeux liés aux déchets miniers.

Les **pluies acides** est un terme large qui inclut toute forme de précipitation avec des composants acides, tels que l'acide sulfurique ou l'acide nitrique. Ce phénomène se produit lorsque du dioxyde de soufre (SO_2), des oxydes d'azote (NO_X), des hydrocarbures (HC) et de l'ozone sont émis dans l'atmosphère, lors de la combustion d'énergies fossiles ou de minerais. Ces composés peuvent avoir une action seuls ou ensemble pour former des acides sulfurique et nitrique qui retombent au sol (voir Figure 16) sous forme de pluie, de neige ou de brouillard. Martin Holdgate (ancien chef scientifique du département de l'environnement du Royaume-Uni) préfère utiliser le terme de dépôt acide qui inclut également le dépôt non-aqueux de polluants (gaz, particules, smog) (McCormick, 2013).

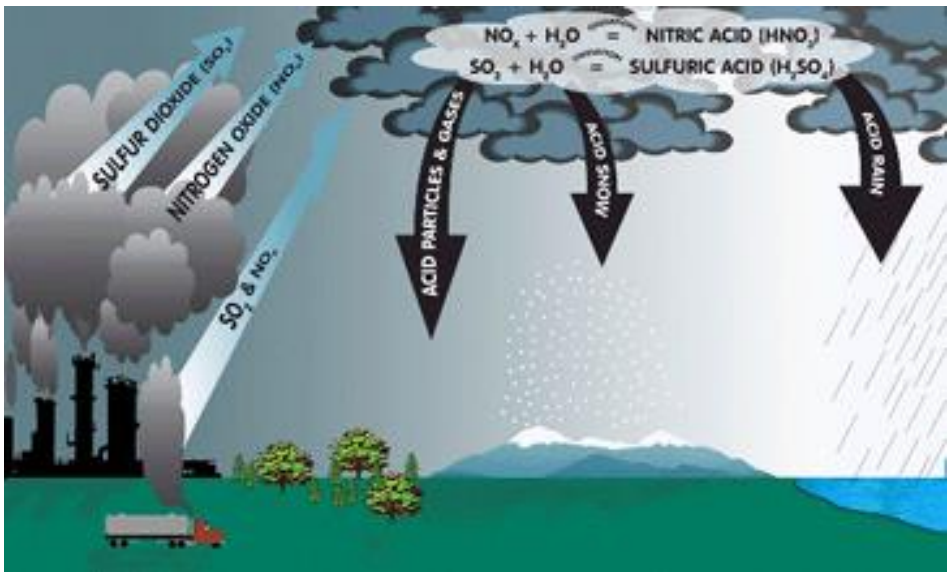


Figure 16 : Schéma explicatif de la formation des pluies acides. Source : Margaret Cunningham

Une petite partie du SO_2 et des NO_X qui causent les pluies acides provient de sources naturelles, mais la majeure partie provient de la combustion de ressources fossiles (Bouwman, Vuuren, Derwent, & Posch, 2002; Klimont, Smith, & Cofala, 2013; McCormick, 2013). Le soufre est le premier facteur de dépôts acides au niveau mondiale (Y. Gao, Ma, Yang, Chen, & Yang, 2018) et la plus grande source anthropogénique de soufre est l'émission de dioxyde de soufre (Bouwman et al., 2002). Dans le cas qui nous intéresse, le procédé pyrométallurgique (calcination ou grillage) utilisé dans les fonderies produit du dioxyde de soufre (SO_2) lorsqu'il y a présence de minéraux sulfurés dans le concentré. Par exemple pour le traitement d'un sulfure de zinc : $2\ ZnS + 3\ O_2 = 2\ ZnO + 2SO_2$ (Worrell & Reuter, 2014). Si la contribution exacte de la métallurgie dans la production mondiale de dioxyde de soufre et donc de dépôts acides n'est pas connue, on peut noter que le secteur industriel (dont la métallurgie et les mines) est la deuxième cause mondiale d'émissions de dioxyde de soufre après la production d'énergie et que cette part est en augmentation (Klimont et al., 2013). En effet, il existe des installations pour supprimer le soufre des rejets atmosphériques, qui ont fait l'objet d'obligations réglementaires pour le secteur de l'énergie, mais pas dans l'industrie, notamment en Chine (Klimont et al., 2013). L'Europe et les Etats-Unis ayant depuis les années 1980 mis en place des initiatives pour diminuer les émissions de soufre et d'azote, la Chine a pris le relai (Y. Gao et al., 2018) et est aujourd'hui le premier contributeur aux émissions mondiales de dioxyde de soufre, avec environ un tiers des émissions mondiales pour 2010, l'Asie représentant 60% des dépôts aqueux de soufre. Les émissions de la Chine diminuent depuis 2006, car le secteur de l'énergie contribue à la stabilisation et à la réduction des émissions. Mais le secteur industriel (dont la métallurgie fait partie) manque de contrôles similaires, ou tout du moins est en retard sur la mise en place de ces contrôles, ce qui explique que la part des émissions industrielles soient passée d'environ 1/3 des émissions en 2005 à 40% en 2010 (Klimont et al., 2013). Par exemple, pour la production d'antimoine en Chine, en 2010, 8 fonderies[28] dans la zone de Xikuangshan n'avaient aucune installation pour supprimer le soufre des rejets atmosphériques. Le bureau environnemental de la province (Hunan) a exigé du gouvernement municipal de faire payer une amende à ces fonderies et de leur ordonner de se mettre aux normes en éliminant les technologies dépassées et le matériel non conforme à la politique industrielle dans la région, ce qui a entrainé la fermeture de la plupart de ces fonderies (Jewell & Kimball, 2012; Ministery of environmental protection, 2010). Ce qui montre que les normes ne sont

[28] Xinghua Nonferrous Metals Co. Ltd. in Lengshuijiang City, Zhirong Antimony Product Plant, Guangrong Antimony Product Plant, Honghong Antimony Product Plant, Feishui Antimony Product Plant, Tanjia Xinghuo Antimony Product Plant, Zhiguang Fuli Antimony Product Plant, Heqing Antimony Product Plant

pas atteintes dans l'industrie, mais qu'il y a une volonté gouvernementale de progresser sur ces émissions.

Les dépôts acides font parties des enjeux environnementaux primordiaux au niveau mondial (McCormick, 2013), même si les émissions sont en diminution depuis 2005 (Klimont et al., 2013). Ces dépôts acides ont pour conséquences environnementales une acidification du sol, de l'eau douce, des écosystèmes marins (Y. Gao et al., 2018). Cette acidification rend les écosystèmes, entre autres les écosystèmes forestiers, plus vulnérables, par exemple aux gels, sécheresses, ravageurs (Y. Gao et al., 2018). Cela conduit globalement à une dégradation des arbres, des plantes, des cultures, et des animaux (McCormick, 2013). L'acidification des sols conduit à la lixiviation des nutriments comme le calcium, le magnésium, le potassium et donc à la baisse de croissance des cultures (Singh & Agrawal, 2008), et également sur le long terme à la perte des propriétés tampon du sol (Bouwman et al., 2002), c'est-à-dire ses capacités « filtrantes » vis-à-vis de l'acidité, des métaux toxiques, etc. Les lacs connaissent une acidification plus directe, car il n'existe pas d'effet tampon. Toutes les composantes de l'écosystème aquatique sont touchées par l'acidification des lacs : le phytoplancton, les amphibiens, les invertébrés ou l'icthyofaune. Par exemple, durant les années 1970 le sud de la Norvège a vu 20% de ses lacs perdre leurs populations de poissons (Singh & Agrawal, 2008). Les effets de l'acidité provoquée par les dépôts acides sur les écosystèmes aquatiques sont globalement les mêmes que ceux de l'acidité provoquée par le DMA à pH équivalent. L'acidification participe avec d'autres facteurs à la perte de vitalité des forêts (Bouwman et al., 2002). Les effets des dépôts acides sur les arbres incluent des « dommages directs aux tissus végétaux (en particulier les racines et le feuillage), la réduction du couvert forestier, le dépérissement de la cime et la mort totale des arbres » (Singh & Agrawal, 2008). Ainsi, en Allemagne presque la moitié du couvert forestier était impacté par l'acidification à la fin de l'année 1984 (Singh & Agrawal, 2008). L'exemple de Norilsk Nickel est assez parlant sur les conséquences environnementales des pluies acides. Norilsk Nickel opère dans deux régions de la Russie, avec son site principal dans la ville de Norilsk sur la péninsule de Kola en Sibérie. Selon la compagnie Norilsk Nickel « de 2003 à 2008, les émissions totales de dioxyde de souffre sont restées proches des 2Mt SO_2/an, sans montrer de tendances à la baisse » (Gavin M. Mudd, 2010), avec des impacts environnementaux majeurs sur une trentaine de kilomètres. Il a été estimé que le seuil critique[29] pour l'acidification a été dépassé pour 7 à 17% des écosystèmes naturels du monde en 2002 (Bouwman et al., 2002). Dans certaines régions particulièrement sensibles à l'acidification comme les régions subarctiques, notamment au nord de la Russie, ce phénomène entraîne une perte de biodiversité d'autant plus forte (Singh & Agrawal, 2008).

Les impacts sanitaires des dépôts acides associés à la pyrométallurgie sont souvent liés, comme dans le DMA, à un accompagnement de l'acidité par des métaux lourds pouvant avoir un impact sanitaire comme nous le montrerons dans le point suivant : de « fortes concentrations d'aluminium, et de métaux lourds tels que le Cd, Hg, […] et parfois Zn ont été trouvés dans les lacs acidifiés et les sources de ces métaux sont la lixiviations des ions des sols et des roches du bassin versant » (Singh & Agrawal, 2008). Les impacts sanitaires de la pollution émise par Norilsk Nickel sont ainsi importants et leur propagation est vraisemblablement favorisée par les phénomènes de dépôts acides. Ainsi, « la qualité de l'air due aux activités de Norilsk Nickel contribue à des risques de santé tels que les maladies chroniques des poumons, des voies respiratoires et du système digestif. La population locale, et en particulier les enfants, connaissent des risques élevés de maladies associées à l'environnement toxique […] ; Norilsk ayant le taux le plus élevé de leucémies et de malformations congénitales après Tchernobyl » (Young, Dias, Fonseca, & Spilka O'Keefe, 2008).

[29] La notion de seuil critique (*critical load*) correspond ici à : « une estimation quantitative d'une exposition à un ou plusieurs polluants au-dessous de laquelle des effets nocifs significatifs sur des éléments sensibles spécifiés de l'environnement ne se produisent pas selon les connaissances actuelles » (Nilsson et Grennfelt, 1988 in Bouwman, Vuuren, Derwent, & Posch, 2002)

L'étendue géographique des dépôts acides peut atteindre une échelle nationale voire transnationale, car les vents peuvent transporter le SO_2 et le NO_X sur de longues distances. Pour prendre un exemple des surfaces atteintes à l'échelle locale, on peut à nouveau citer le cas de Norilsk Nickel. Selon Greenpeace Russia, la pollution de Norilsk a créé une zone morte de 30 kilomètres autour de la ville, et la surface touchée par les pluies acides serait de la taille de l'Allemagne (« Toxic truth of secretive Siberian city », 2007). Cette affirmation est confirmée par des publications académiques. Ainsi, une première étude montre que « le territoire dans les 4km autour de Norilsk présente […] une absences d'arbres, une perturbation de la minéralisation de la matière organique » (Yakovlev, Plekhanova, Kudryashov, & Aimaletdinov, 2008). Une étude par interprétation d'image satellite notait quant à elle la mort de la végétation sur 94km^2(Tutubalina & Rees, 2001). Il y a donc bien une zone impactée d'un rayon d'une trentaine de kilomètre autour de la ville (voir Figure 17).

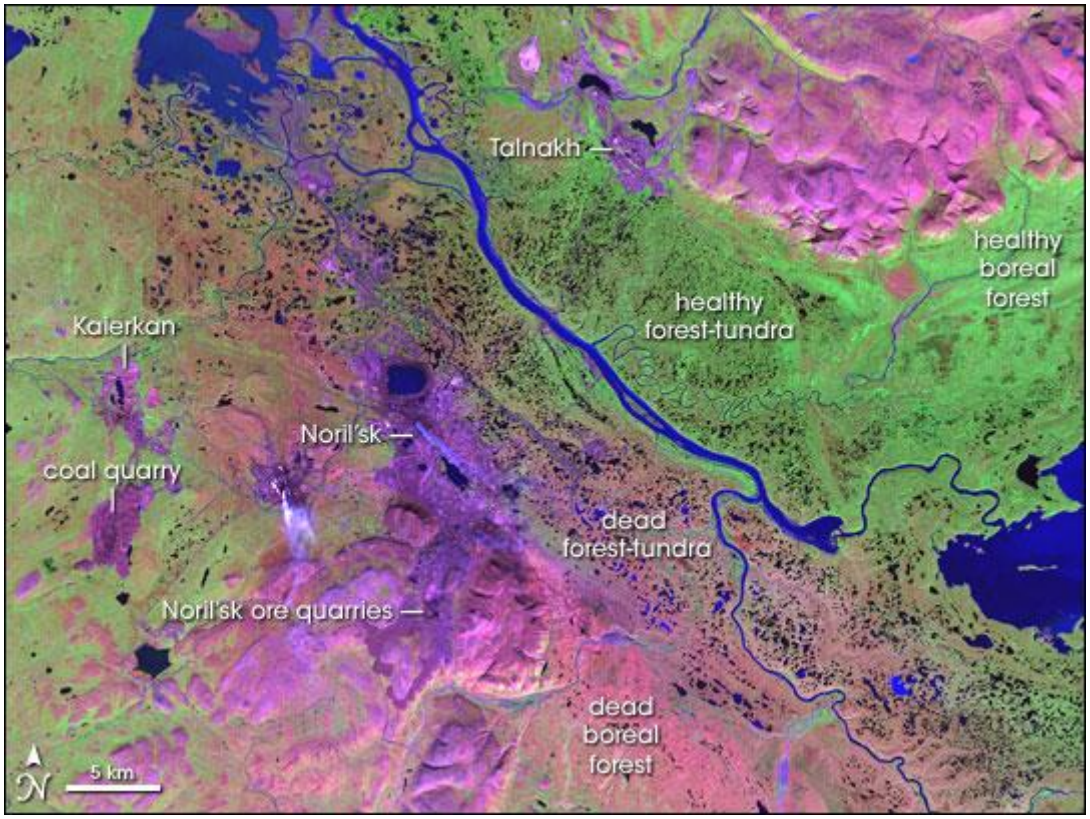


Figure 17 : Traitement d'une image satellite de Norilsk pour faire apparaître la pollution. Source : Allen, 2001

Des panaches de fumée bleu-blanc (juste à gauche du centre de l'image) dérivent vers le sud-est depuis les cheminées de Norilsk. Les rivières profondes et pâles sous le vent de la ville, ainsi que le violet profond des collines immédiatement à l'extérieur de Norilsk, sont des écosystèmes modérément à gravement endommagés. Au nord-est de la rivière, les écosystèmes semblent plus sains.

La phase de déposition des composés acides dure tant que les opérations de calcination sont toujours en fonctionnement. Cependant, les conséquences environnementales de cette pollution acide peuvent s'étendre sur de nombreuses années.

iii. Les enjeux sanitaires liés à la production minière et métallurgique des ressources métalliques

Nous nous concentrons ici sur les enjeux sanitaires liés à la diffusion de métaux lourds et des radionucléides dans l'environnement autour des exploitations minières et métallurgiques, à

l'exclusion des maladies professionnelles des travailleurs que nous traiterons dans le point sur les enjeux sociaux. Cette revue n'est pas exhaustive, puisqu'il existe d'autres substances toxiques liées à la production des métaux telles que le cyanure (exemple de Baia Mare en Roumanie in UNEP/OCHA, 2000a; exemple des mines de Johannesburg Utembe, Faustman, Matatiele, & Gulumian, 2015) utilisé pour le traitement de l'or, l'antimoine (Bisson, 2007), etc. Comme pour l'acidification, il n'y a pas de revue complète en analyse de cycle de vie de la toxicité des différents métaux : « bien que USEtox soit recommandé comme le dernier modèle pour modéliser la toxicité humaine en ACV, les métaux y sont inclus seulement avec des facteurs de caractérisation intermittents avec de fortes incertitudes (de plusieurs ordres de magnitudes) » (Nuss & Eckelman, 2014). C'est pourquoi nous nous appliquerons à illustrer les impacts sur la santé humaine des métaux lourds et des radionucléides, identifiés comme des enjeux majeurs de la production, de la transformation des métaux.
Le terme de « métaux lourds » (ou *heavy metals*) est utilisé couramment dans la littérature[30] (Dragović et al., 2014; Mills-Knapp et al., 2012; Rodríguez, Ruiz, Alonso-Azcárate, & Rincón, 2009; Sharma, 2014; H. Zhou et al., 2016) et « fait référence à tout métal ou métalloïde qui a une densité relativement élevée allant de 3,5 à 7g/cm3 et qui est toxique […] à de faibles concentrations, et inclut le mercure (Hg), le cadmium (Cd), l'arsenic (As), le chrome (Cr), le thallium (Tl), le zinc (Zn), le nickel (Ni), le cuivre (Cu) et le plomb (Pb). […] Ces métaux sont largement présents dans la croûte terrestre et ne sont pas biodégradables dans la nature. Ils pénètrent dans le corps humain via l'air, l'eau et l'alimentation. Un petit nombre de ces métaux lourds a un rôle essentiel dans le métabolisme humain et animal lorsqu'ils sont présents en traces, mais peuvent être toxiques ou causer des effets sanitaires à plus forte concentration » (Sharma, 2014). Les radionucléides sont des nucléides radioactifs, c'est-à-dire qu'ils se désintègrent, et émettent des rayonnements ionisants et se transforment en un autre élément, jusqu'au point final du processus de désintégration où l'on obtient un élément stable. C'est ce qu'on appelle une chaîne de désintégration. « Les rayonnements ionisants sont une forme d'énergie libérée par les atomes qui se propage par le biais d'ondes électromagnétiques (rayons gamma γ, ou X) ou de particules (neutrons, particules bêta β ou alpha α). La désintégration spontanée des atomes est appelée radioactivité » (WHO, 2016). Les radionucléides existent naturellement, mais peuvent aussi être produits artificiellement par une réaction nucléaire. Dans le cas des filières minières et métallurgiques, on s'intéresse aux radionucléides naturels. Il existe « 340 types d'atomes […] dans la nature, [dont] 70 ont des noyaux instables radioactifs (radionucléides). […] Il s'agit soit de radionucléides de période radioactive très longue présents sur Terre depuis sa formation (potassium 40, uranium 238, uranium 235, thorium 232), soit de radionucléides […] cosmogéniques » (IRSN, 1998). C'est le premier type de radionucléides qui concerne les activités minières et métallurgiques.

Les métaux lourds et les radionucléides se retrouvent très souvent dans les indésirables, c'est-à-dire les déchets, des étapes de production des métaux. En effet, ces différentes étapes de production du minerai au métal, en passant par la production du concentré, ont pour objectif d'obtenir le métal pur. Ces étapes sont donc par définition des étapes de concentration qui ont pour objectif d'enlever les autres éléments présents dans le minerai qui se retrouvent dans les déchets.

Au niveau minier, la diffusion de métaux lourds est due à la présence naturelle de ces éléments dans les gisements, comme le montre la Figure 18. « L'anneau intérieur montre les métaux de base de la

[30] Cependant cette dénomination est contestée : la «classification en métaux lourds est d'ailleurs souvent discutée car certains métaux toxiques ne sont pas particulièrement " lourds " (le zinc), tandis que certains éléments toxiques ne sont pas tous des métaux (l'arsenic par exemple). Pour ces différentes raisons, la plupart des scientifiques préfèrent à l'appellation métaux lourds, l'appellation " éléments en traces métalliques " […] ou par extension " éléments traces "» (Miquel, 2001). Le terme d'éléments en trace métalliques, nomenclature notamment utilisée par les instituts français (comme l'Ineris), prend également en compte le sélénium, mais pas le thallium (Burnol, Duro, & Grive, 2006; rapport 42 de l'Académie des Sciences, 1998 in Gouzy & Ducos, 2008).

société actuelle; les trois anneaux extérieurs présentent les impuretés et les éléments mineurs présent dans les minerais contenant ces métaux de base auxquels ils sont associés » (Verhoef et al., 2004). Dans le cercle extérieur vert présentant les éléments indésirables, on retrouve l'ensemble des métaux lourds précédemment cités à part le cadmium. Malheureusement, même pour les métaux constitutifs du deuxième et troisième cercle pouvant présenter un intérêt économique, il est très courant que ces métaux ne soient pas récupérés, en fonction du prix de la substance au moment de l'exploitation et du coût de l'exploitation (teneur, procédé, etc.). De plus, aucun procédé de récupération n'étant efficient à 100%, l'ensemble des éléments présents dans la roche est présent en trace dans les déchets de l'exploitation. Enfin, il faut noter que la Figure 18 présente les intérêts économiques actuels concernant les métaux. Ainsi, le nombre de métaux exploités au cours du XIXème siècle et du début du XXème siècle était beaucoup plus faible et se limitait essentiellement aux grands métaux industriels. Les anciennes exploitations dont les déchets continuent d'être des sources de pollutions, contiennent donc souvent l'ensemble des co-éléments, comme dans la mine de "San Quintín" au sud de Madrid en Espagne dont l'exploitation du gisement Zn-Pb a laissé des stériles miniers contenant du cadmium (Rodríguez et al., 2009).

De même, les radionucléides sont-ils présents naturellement dans les minéraux : l'*International Atomic Energy Agency* (IAEA) affirme que tous « les minéraux et matières premières contiennent des radionucléides d'origine naturelle » (IAEA, 2013a). Masok et ses collaborateurs soulignent que des « millions de tonnes de sables minéraux contenant du zircon, de l'ilménite et du rutile, avec xénotime et monazite sont extraites de nombreux pays du monde. Ces minéraux sont considérés comme ayant de la radioactivité naturelle renforcée [(RNR en français ou *naturally occurring radioactive materials* (NORM) en anglais] en raison de la présence de thorium et d'uranium dans les grains minéraux » (Masok, Masiteng, Mavunda, & Maleka, 2016). Ainsi, les rejets solides des mines (stériles et résidus voir Figure 15) sont majoritairement constitués d'autres minéraux présents naturellement dans la roche, n'ayant pas d'intérêt économique immédiat et qui peuvent contenir des métaux lourds ou des radionucléides.

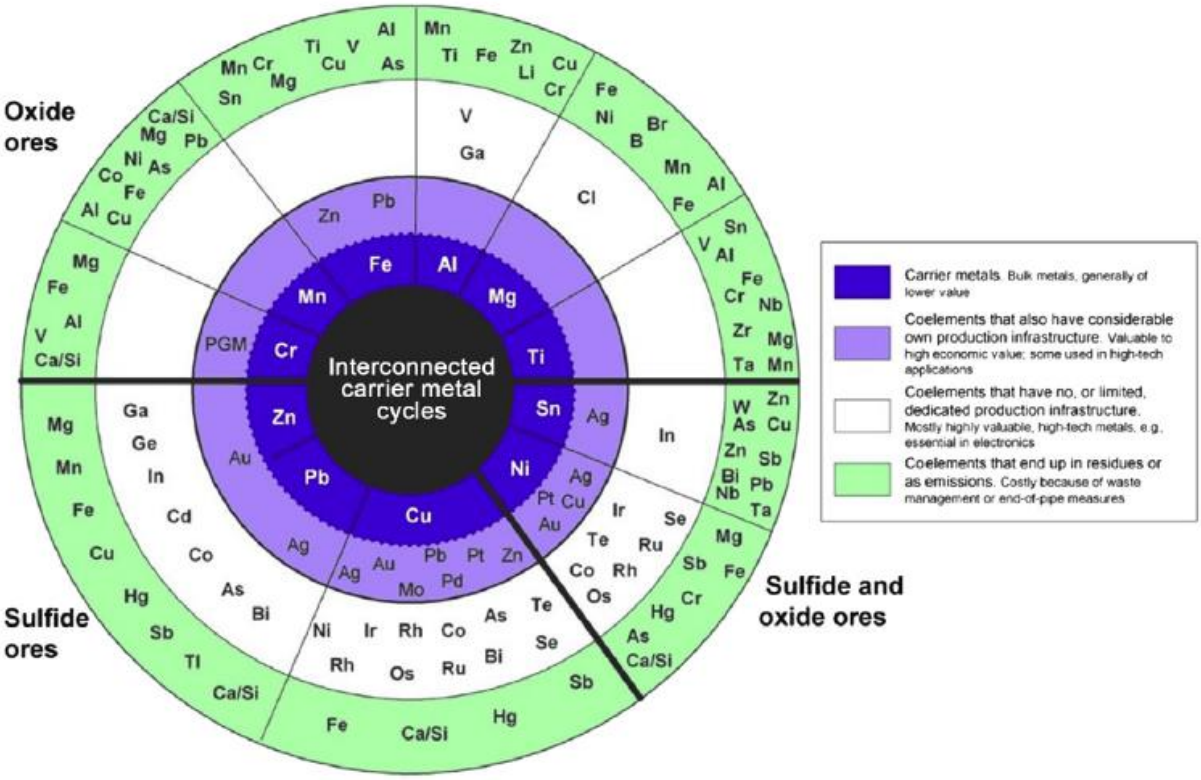


Figure 18 : La roue des métaux montrant les liens entre des métaux faisant l'objet d'une exploitation principale (en bleu), les métaux étant parfois coproduits (en violet), les métaux étant toujours coproduits (en blanc) et les métaux finissant dans les déchets ou les émissions (en vert).

Source : Verhoef et al., 2004

Les métaux lourds peuvent également se retrouver dans les déchets des étapes métallurgiques comme les scories (voir Figure 15). Dans une revue de la littérature recensant plus de 150 publications Piatak et ses collaborateurs ont ainsi noté la présence de chrome, de cuivre, de plomb et de zinc dans des concentrations dépassant les seuils de l'agence de l'environnement des États-Unis (USEPA). Ils notent que chaque « scorie peut habituellement contenir un ensemble spécifique d'éléments qui peuvent constituer un problème environnemental. En général, les scories non-ferreuses ont un potentiel plus élevé d'impacter négativement l'environnement comparées aux scories ferreuses » (Piatak, Parsons, & Seal, 2015).

Malgré leur présence dite « naturelle » les impacts environnementaux et sanitaires liés à ces substances sont considérés comme anthropiques, car le fait d'extraire ces éléments de la roche augmente considérablement leur diffusion dans l'environnement et l'exposition des individus. Pour la radioactivité, on parle de « *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials* » (TENORM) (Karam & Vetter, 2009). En effet, au niveau minier et pendant le traitement minéralurgique, les roches sont brisées par impact, écrasement ou broyage (Momoh, E. Mhlongo, Abiodun, Muzerengi, & Mudanalwo, 2013), ce qui diminue la granulométrie du minerai ce qui augmente la capacité à réagir avec le milieu et augmente la libération de gaz toxique (comme le radon). Plus la granulométrie est fine, plus la capacité de réaction est grande : pour les poussières « la surface totale des particules […] est si importante qu'elles sont plus actives physiquement, chimiquement et biologiquement que le matériau d'origine » (Momoh et al., 2013). De plus le stockage en milieu oxydant (contact avec l'air et l'eau de surface) participe à l'augmentation de la réactivité des métaux lourds. Enfin, la propagation est augmentée par l'exposition à des vecteurs de dissémination (le ruissellement, le vent…). De même au niveau métallurgique la concentration des déchets est plus forte que dans le milieu naturel, et on retrouve les facteurs d'oxydation et de dissémination. Pour les mines où les radionucléides sont présents, les équipements issus du démantèlement des installations sont souvent également contaminés.

Les impacts sanitaires associés à la diffusion des métaux lourds et des radionucléides sont multiples, dépendent des voies et des niveaux d'expositions, ainsi que des substances auxquelles les populations sont exposées. Cependant certaines substances sont particulièrement dangereuses. Ainsi, le plomb, le cadmium et le mercure ont été identifiés dans la décision « 2455/2001/CE du conseil Européen modifiant la Directive Européenne sur l'Eau 2000/60/CE, […] comme des "substances dangereuses prioritaires", ces substances sont soumises à un objectif de rejet zéro dans les eaux souterraines » (Burnol, Duro, & Grive, 2006). Il est également à noter que dans les mines l'arsenic est un polluant très courant, notamment parce qu'il peut être présent dans les sulfures (sous forme d'arsénopyrite). C'est également une substance métallique dont la dangerosité est considérée comme prioritaire par « la Directive Européenne du 19/09/2003 sur la protection des eaux souterraines […ayant] fixé une liste minimale de substances pour lesquelles les états membres sont tenus de fixer des valeurs seuils. Cette liste contient l'As» (Burnol et al., 2006). De même les radionucléides présents naturellement dans diverses exploitations minières et industries de transformation minérale, hors uranium, ont commencé à faire l'objet de réglementation au milieu des années 1980, même si historiquement « l'attention de la réglementation s'était surtout concentrée sur l'extraction et le traitement du minerai d'uranium » (IAEA, 2013a). En effet, la *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) aux Etats-Unis et *l'International Atomic Energy Agency* (IAEA) ont mis en place une régulation (U.S.Nuclear Regulatory Commission, s. d.) qui a classé les déchets de ces industries comme matière radioactive. Cette règlementation visait à soumettre ces produits à des déclarations, des dispositions spécifiques de stockage, de transport, des mesures d'assainissement. « Depuis les années 1990, […] de plus en plus d'États ont adopté des mesures visant à réglementer les expositions dues à un éventail plus large de sources naturelles, en particulier les minéraux et les matières premières autres que ceux associés à l'extraction de l'uranium. La mise en place des

normes de sûreté de l'IAEA No. GSR Part 3, *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards* (initiées en en 1996 en tant qu'IAEA Safety Series No. 115) et de la directive du conseil européen 96/29/Euratom du 13 mai 1996 fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, contiennent toutes deux des dispositions prévoyant des mesures de protection contre une exposition sensiblement accrue des travailleurs et du public à des sources de radioactivité naturelles » (IAEA, 2013a).

Cette hiérarchisation est confirmée par le *Blacksmith Institute* (Mills-Knapp et al., 2012), une ONG qui a lancé un programme d'identification des sites toxiques et recensé 2095 sites industriels dans 47 pays pauvres et à revenus moyens. Ces recherches ont fait l'objet d'une publication scientifique couvrant la période d'investigation de 2009 à 2011[31] (Ericson, Caravanos, Chatham-Stephens, Landrigan, & Fuller, 2013). La population touchée par ces sites est estimée à 71,5 millions de personnes, les substances touchant le plus de sites sont présentées dans le Tableau 10. Excepté les pesticides qui ne rentrent pas dans le champ de la thèse, on retrouve les substances précédemment citées : plomb, mercure, cadmium, arsenic, radionucléides mais également le chrome.

Tableau 10 : Distribution des sites identifiés par le programme d'identification des sites toxiques du Blacksmith Institute pour les 7 premiers polluants clefs. Source : Ericson et al., 2013

Polluant	Nombre de sites
Plomb	458
Mercure	309
Chrome	260
Arsenic	175
Pesticides	125
Cadmium	118
Radionucléides	64

Cependant, ces considérations concernent l'ensemble des activités mondiales. Pour le secteur qui nous intéresse, c'est-à-dire la production minière et métallurgique des métaux, on peut noter que parmi les activités liées aux sites étudiés par le Blacksmith Institute, les 3 plus impactantes en termes sanitaires sont, par ordre d'importance (Mills-Knapp et al., 2012) : le recyclage des batteries plomb-acide (voir ci-après le point sur le recyclage), le traitement métallurgique du plomb dans les fonderies, et les mines et le traitement des minerais métalliques. Or, pour les fonderies de plomb, qui concernent presque 70 sites pollués dans la base de données du Blacksmith Institute, le polluant le plus impactant est le plomb, et les polluants secondaires sont le mercure et le cadmium (Mills-Knapp et al., 2012). Et pour les mines et le traitement minéralurgique des métaux, qui concernent plus de 350 sites pollués, on retrouve les mêmes polluants les plus dangereux que pour l'ensemble des secteurs : le plomb, le chrome, l'arsenic, le cadmium et le mercure, auxquels s'ajoute l'amiante,

[31] La publication grand public inclut des données plus récentes (Mills-Knapp et al., 2012)

qui sera évoquée dans les maladies professionnelles. Concernant les radionucléides, « les plus importants à des fins de radioprotection sont […ceux] des chaînes de *désintégration de* ^{238}U et ^{232}Th » (IAEA, 2013a), détaillées dans le Tableau 11. C'est pourquoi la synthèse proposée dans le Tableau 12 sur les conséquences sanitaires se concentre sur ces cinq métaux lourds et des radionucléides précédemment cités.

Tableau 11 : Chaîne de désintégration de l'^{238}U et du ^{232}Th. Source : National Research Council (US) Committee, 1999

Chaîne de ^{238}U			Chaîne de ^{232}Th		
Radionucléide	**Demie-vie**	**Radiations majeures**	**Radionucléide**	**Demie-vie**	**Radiations majeures**
^{238}U	4,47 × 109 a	α, < 1% γ	**^{232}Th**	1,41 × 1010 a	α, <1% γ
^{234}Th	24,1 j	β,	**^{228}Ra**	5,75 a	β, <1% γ
^{234m}Pa	1,17 m	β, < 1% γ	**^{228}Ac**	6,15 h	β, γ
^{234}U	2,46 × 105 a	α, < 1% γ	**^{228}Th**	1,91 a	α, γ
^{230}Th	7,54 × 104 a	α, < 1% γ	**^{224}Ra**	3,66 j	α, γ
^{226}Ra	1600 a	α, γ	**^{220}Rn**	55,6 s	α, <1% γ
^{222}Rn	3,82 j	α, < 1% γ	**^{216}Po**	0,145 s	α, <1% γ
^{218}Po	3,10 m	α, < 1% γ	**^{212}Pb**	10,64 h	β, γ
^{214}Pb	26,8 m	β, γ	**^{212}Bi**	1,01 h	α, γ
^{214}Bi	19,9 m	β, γ	**^{212}Po/^{208}Tl**	0,300 ms /3,05 m	α / β, γ
^{214}Po	164,3 µs	α, < 1% γ	**^{208}Pb**	Stable	Aucune
^{210}Pb	22,3 a	β, γ			
^{210}Bi	5,01 j	β			
^{210}Po	138,4 j	α, < 1% γ			
^{206}Pb	Stable	Aucune			

Le Tableau 12 présente les principaux impacts sanitaires de ces substances polluantes accompagnés des principales sources de pollution. Cependant les sources présentées sont loin d'être exhaustives : au niveau minier notamment il peut exister également des rejets liquides polluant tels que les eaux d'exhaures des mines[32] ou telles que les solutions utilisées pour le traitement des minerais. Notamment quand des techniques de lixiviation (ou extraction par dissolution) *in situ* ou en tas sont utilisées pour la concentration des minerais. Cette technique est employée dans l'industrie minière pour extraire certains métaux présents dans un gisement. Elle consiste à injecter lentement une solution (généralement une solution acide telle que l'acide sulfurique) à travers un minerai par le biais d'un premier forage, puis les produits dissous par cette solution sont pompés à la surface grâce à un deuxième forage. Ce procédé peut générer des problèmes de contamination des eaux souterraines liés à la circulation de fluide acide dans les nappes phréatiques, si le parcours du fluide injecté n'est pas imperméable. La lixiviation en tas se fait selon le même principe, mais le minerai est d'abord extrait puis mis en tas, ce qui permet notamment de mieux contrôler les eaux de traitement via la mise en place de drains. L'eau

[32] L'exhaure correspond au pompage de l'eau dans les exploitations souterraines afin d'éviter l'ennoiement naturel de la mine dû à la présence d'eau souterraine. Un tel pompage peut également avoir lieu après la cessation de l'activité afin d'éviter les affaissements miniers facilités par l'ennoiement.

souterraine acidifiée peut à son tour générer une libération de métaux toxiques dans la nappe et engendrer des conséquences sanitaires.

Tableau 12 : Synthèse des effets sanitaires de cinq métaux lourds et des radionucléides

Métal	Effets sanitaires	Sources de pollution dans l'industrie minière et métallurgique
Cadmium	Les reins et les os sont les organes cibles critiques en ce qui concerne l'exposition environnementale. Les principaux effets critiques comprennent une augmentation de l'excrétion de protéines de faible poids moléculaire dans l'urine (résultant de lésions cellulaires tubulaires proximales) et un risque accru d'ostéoporose. Un risque accru de cancer du poumon a également été signalé après une exposition par inhalation dans les milieux de travail (World Health Organization, 2007b).	(Bisson & Houeix, 2014) La métallurgie de l'acier constituent les principales sources de rejet atmosphérique **Rejet solide** : impuretés des minerais de Pb-Zn(rejet durant calcination), sous-produit de raffinage du Pb, du Zn et du U (exemple des fonderies de plomb Mills-Knapp et al., 2012) **Rejet gazeux** : émissions liées au raffinage des métaux non ferreux **Rejet dans l'eau** : peut provenir du traitement des rejets industriels et des mines
Plomb	Le plomb est un neurotoxique. L'atteinte du développement neurologique chez les enfants, aussi appelé saturnisme, est l'effet le plus critique. L'exposition in utero, pendant l'allaitement et dans la petite enfance peut être responsable des effets. Le plomb s'accumule dans le squelette et sa mobilisation depuis les os pendant la grossesse et l'allaitement entraîne une exposition aux fœtus et aux nourrissons allaités (World Health Organization, 2007b). Enfin, des études épidémiologiques ont été menées en milieu professionnel en France. Elles ont démontré que l'exposition au plomb se faisait essentiellement par inhalation et ont mis en évidence un excès de mortalité par insuffisance rénale, une augmentation de la pression artérielle, ainsi qu'un risque accru de cancers des poumons, de l'estomac ou des reins chez les sujets qui avaient subi des expositions chroniques intenses au plomb. (Brignon, 2015). Pour le secteur de la mine et le traitement des minerais le plomb est avec le chrome le polluant le plus impactant (Mills-Knapp).	(Mills-Knapp et al., 2012) Parmi les sources principales de rejet du plomb : les fonderies de plomb, les mines et le traitement métallurgique, le recyclage des batteries plomb-acide **Rejet solide** : émissions de poussières et scories des fonderies, **Rejet gazeux** : fumées des fonderies de plomb, jusqu'à 30 kg de plomb émis dans l'air par tonne de métal produit **Rejet dans l'eau** : eaux usées des fonderies

Métal	Effets sanitaires	Sources de pollution dans l'industrie minière et métallurgique
Mercure	Les effets sur la santé du mercure dépendent du type de mercure auquel une personne est exposée. Le méthylmercure est la forme la plus toxique de mercure car il est rapidement absorbé dans le corps et expulsé beaucoup plus lentement (Mills-Knapp et al., 2012).Le méthylmercure est un produit chimique neurotoxique puissant. Les enfants à naître (c'est-à-dire les fœtus) constituent le groupe de population le plus sensible, l'exposition étant principalement due au poisson dans le régime alimentaire de la mère (World Health Organization, 2007b). La contamination par la chaîne alimentaire n'est pas négligeable, car le mercure fait l'objet d'une bioaccumulation le long de la chaîne trophique. En général, les effets sur la santé incluent la toxicité rénale, les dommages au système immunitaire, l'altération des systèmes génétiques et enzymatiques et les dommages neurologiques, en particulier chez les bébés exposés in utero. (Mills-Knapp et al., 2012)	(Mills-Knapp et al., 2012) Parmi les premières sources de rejet du mercure : les mines d'or artisanal et les mines et le traitement des métaux industriels **Rejet solide** : poussières des fonderies (exemple des fonderies de plomb Mills-Knapp et al., 2012), déchets miniers dans des procédés utilisant du mercure (or) **Rejet gazeux** : évaporation dans des procédés utilisant du mercure (or) **Rejet dans l'eau** : dissémination par retombée des poussières et depuis les déchets miniers des procédés utilisant du mercure (or)
Arsenic	En cas d'exposition, l'arsenic inorganique est absorbable par les voies orale et respiratoire. Une fois absorbé, il passe dans le sang et se répand dans les organes (principalement le foie et les reins) ; il a aussi la capacité de traverser la barrière placentaire. Les principaux effets aigus de l'ingestion sont des nausées, vomissements, hémorragies gastro-intestinales, douleurs abdominales et diarrhées. Des effets sur le système nerveux et la peau peuvent aussi apparaitre. Pour l'exposition chronique, les principaux effets sont cancérigènes : cancers de la peau, de la vessie, des poumons, des reins et du foie. L'arsenic a été l'un des premiers composés chimiques reconnus comme cancérigène par le CIRC (groupe 1), l'US EPA (classe A) et l'Union Européenne (4 substances en Catégorie 1) (La Rocca, Houeix, & Andres, 2010).	**Rejet solide** : Minerais contenant de l'arsénopyrite : stériles et résidus, poussières de l'activité minière (Tack, Mouton, Meunier, Mestre-Pujol, & Denys, 2009), poussières des fonderies (exemple des fonderies de plomb Mills-Knapp et al., 2012) **Rejet gazeux** : Minerais contenant de l'arsénopyrite : fumées de traitement pyrométallurgique, (Tack et al., 2009) **Rejet dans l'eau** : Via les déchets miniers et le drainage minier acide

Métal	Effets sanitaires	Sources de pollution dans l'industrie minière et métallurgique
Chrome	Les deux types de chrome diffèrent considérablement dans leur niveau de toxicité. Le chrome-3 en quantités appropriées est un nutriment essentiel, mais peut être nocif en grande quantité. Le chrome-6 (ou hexavalent) est un agent cancérigène connu et, lorsqu'il est inhalé, il a été prouvé qu'il provoque un cancer du poumon chez l'homme. Les effets sur la santé humaine de l'ingestion de chrome 6 dans l'eau potable sont moins bien compris. Certaines études récentes ont associé l'ingestion à un risque accru de cancer de l'estomac et du poumon, mais les autorités n'ont pas officiellement reconnu les effets de l'ingestion sur la santé. Cependant, reconnaissant la toxicité connue de cet élément, US EPA a établi un seuil limite pour le chrome dans l'eau potable. Pour le secteur de la mine et le traitement des minerais le chrome est avec le plomb le polluant le plus impactant (Mills-Knapp et al., 2012)	(Mills-Knapp et al., 2012) Parmi les premières sources de rejet du chrome hexavalent : la fabrication et le traitement de l'acier, des alliages, du placage **Rejet solide** : poussières envolées depuis les déchets des usines de traitement de minerais métalliques **Rejet gazeux** : émissions de usines de traitement de l'acier, des alliages et du placage **Rejet dans l'eau** : eaux contaminées par les déchets des usines de traitement de minerais métalliques
Radionucléides	Les déchets à radioactivité naturelle renforcée (RNR) relèvent pour la plupart des déchets de très faible activité et pour certains de la faible activité (ASN, 2009). Les effets sanitaires des RNR sont donc de l'ordre des faibles doses de rayonnements ionisants. « Les rayonnements ionisants sont un type d'énergie libéré par les atomes sous forme d'ondes ou de particules. […] Les faibles doses de rayonnements ionisants peuvent accroître le risque d'effet à long terme comme le cancer » (WHO, 2016). Il faut noter qu' « il existe peu d'information sur les effets de faibles doses après une exposition étalée sur une longue période de temps »(Programme des Nations Unies pour l'Environnement, 2016). Cependant, pour ces faibles doses le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants souligne également qu'une population exposée peut montrer une incidence accrue de certains types de cancer, des années voire des décennies plus tard. À cet égard, les rayonnements ionisants sont une substance cancérogène similaire à la fumée de cigarette et l'incidence du cancer dans une population augmente avec la dose de rayonnement reçue. Dans les études scientifiques sur les animaux, des effets héréditaires ont été observés, mais cela n'a jamais été observé chez les populations humaines, bien que nous puissions supposer que cela se produit probablement chez les humains dans une faible mesure » (UNSCEAR, 2017). L'exposition aux rayonnements ionisants peut-être interne ou externe : l' « exposition interne aux rayonnements ionisants se produit lorsqu'un radionucléide est inhalé, ingéré ou pénètre	(ASN, 2009) **Rejet solide** : déchets issus du traitement des minerais d'étain, d'aluminium (verses à stériles boues rouges), de cuivre, de titane, de niobium, de bismuth, de thorium, des terres rares, de la métallurgie du zirconium (fumées et résidus, céramiques réfractaire), transformation du phosphate (déchet phosphogypse) (ASN, 2009) **Rejet gazeux :** radon émis à partir des déchets radioactif (exemple des déchets de la monazite) **Rejet dans l'eau** *:* les boues de la station de traitement de la métallurgie du zirconium, de l'aluminium (boues rouges, rejet marin à Gardanne), déchet radioactifs issus du traitement des terres rares (monazite, à la Rochelle notamment, rejet marin).

Métal	Effets sanitaires	Sources de pollution dans l'industrie minière et métallurgique
	d'une quelconque autre façon dans la circulation sanguine […]. L'exposition interne s'arrête lorsque ce radionucléide est éliminé de l'organisme […]. Une exposition externe peut intervenir en cas de dépôt de matières radioactives en suspension dans l'air (poussières, liquide, aérosols) sur la peau ou les vêtements » (WHO, 2016). Pour les filières minières et métallurgiques, ces effets sont dus principalement aux deux chaînes de désintégration suivantes : Chaîne de désintégration du Thorium 232 : La «toxicité radiologique du thorium naturel est supérieure à celle de l'uranium naturel » (Bérard et al., 2001). « L'apparition de cancers liés au thorium est généralement expliquée par son rayonnement alpha » (Bérard et al., 2001). L'exposition interne du thorium avec « radiation alpha pendant des années, [est] responsable essentiellement de cancers du foie, ainsi que de cancers du poumon, plus rares. Le thorium augmente également le risque de leucémie par sa présence dans la moelle rouge des os » (Bérard et al., 2001). Chaîne de désintégration de l'Uranium 238 : l'Uranium 238 émet principalement des rayonnements alpha (Garnier-Laplace, Colle, & Morello, 2010). Dans la chaîne de désintégration de l'Uranium 238, on trouve le Radon 222 sous forme gazeuse. « En cas d'inhalation [du radon], certains produits de désintégration à vie courte du radon, principalement le polonium-218 et 214, sont retenus dans les poumons et irradient les cellules des voies respiratoires par émission de particules alpha. Le radon est donc une des causes principales de cancer du poumon chez les fumeurs et les non-fumeurs ; les fumeurs sont néanmoins beaucoup plus vulnérables en raison de la forte interaction entre le tabac et l'exposition au radon » (Programme des Nations Unies pour l'Environnement, 2016). « Le radon est la source principale d'exposition aux rayonnements dans les mines souterraines de tous types » (Programme des Nations Unies pour l'Environnement, 2016).	

La diffusion des métaux lourds peut être favorisée par le DMA et les pluies acides comme nous l'avons vu au point précédent. En effet, l'acidification favorise la mise en solution des métaux lourds lorsqu'ils sont présents. L'eau acide contient par conséquent des concentrations élevées de métaux, la toxicité de ces métaux associée à la toxicité du pH faible amplifie la nocivité pour les organismes vivants, laissant les effluents touchés dépourvus de toutes créatures vivantes (Jennings et al., 2008). Pour reprendre l'exemple de Norilsk, les 4 km les plus touchés autour de l'exploitation présentent de fortes concentrations en métaux lourds (Yakovlev et al., 2008). Il est cependant à noter que la diffusion d'éléments présentant une toxicité humaine peut avoir lieu même en l'absence de drainage minier acide : « le lessivage des constituants toxiques, tels que l'arsenic, le sélénium et les métaux, peut se produire même si les conditions acides ne sont pas présentes » (Environmental Law Alliance Worldwide, 2010).

Enfin, comme évoqué au point précédent, la dissémination des polluants et la propagation du DMA au niveau minier connaissent des pics liés aux accidents relatifs à la gestion des déchets. Ainsi, l'accident minier affectant l'environnement le plus courant est la rupture de digue à résidus. Ces accidents sont nombreux dans le monde, Rico et ses collaborateurs (Rico, Benito, Salgueiro, Díez-Herrero, & Pereira, 2008) ont ainsi étudiés plus de 147 cas de ruptures de digue. Ces accidents ont souvent lieu des années après l'arrêt de la production minière, lorsque l'entretien fait défaut. Sur les 147 cas de ruptures de digues étudiés, seuls 15% ont eu lieu sur des digues abandonnées, mais il faut noter que la base de données de Rico et collaborateurs est surreprésentative de pays où la législation environnementale impose un contrôle des digues : USA (39%), Europe (18%), Chili (12%) and Philippines (5%) ; les auteurs soulignent bien que dans d'autres pays les digues sont systématiquement abandonnées. Enfin, l'ONG *WISE Uranium project* (WISE Uranium Project, 2018) a recensé, de manière non exhaustive, 32 accidents majeurs de ruptures de digue depuis 2000 dans le monde. En Europe, nous pouvons par exemple citer le cas d'Aznalcóllar, qui a subi une rupture de digue le 25 avril 1998 menant à un déversement de 4,5 hm^3 d'eau acide et de boues sulfurées dont il reste des traces malgré le nettoyage (Benito et al., 2001), et le cas de Baia Borsa en Roumanie en 2000 qui a conduit à un déversement de 20 000 tonnes de déchets miniers dans la rivière Viseu contenant des proportions significatives de cuivre, de zinc, de cadmium et de plomb, le déversement de ce dernier métal étant estimé à 70 tonnes (UNEP/OCHA, 2000b).

iv. Les enjeux sociaux de la production minière et métallurgique des ressources métalliques

Nous nous concentrons ici sur les principaux enjeux sociaux liés aux exploitations minières et métallurgiques. Cette revue ne peut pas être exhaustive, chaque exploitation se situant dans un contexte social spécifique, mais ce paragraphe vise à dégager des lignes de forces des impacts sociaux de ces exploitations au niveau mondial. Notamment, cette revue ne traitera pas de la question des « minerais de conflit »[33]. Nous nous intéresserons aux conditions de travail de ce secteur, avant de montrer comment l'existence de mines illégales et les liens avec le secteur informel vient renforcer ces impacts, puis nous nous intéresserons aux problématiques sociales liées à l'usage des terres dans le cadre de l'exploitation minière (problématique d'accès à l'eau,

[33] En effet, la question des minerais de conflit constitue un enjeu particulier et non généralisable des systèmes miniers et métallurgiques et s'intéresse au lien entre ce secteur et les conflits armés. La problématique a été formulée en premier lieu par un panel d'experts des Nations-Unies sur l'exploitation illégale des ressources en 2001 (Radley & Vogel, 2015) comme celle du financement de conflits armés par les entreprises européennes et américaines à travers l'achat de métaux (étain, de tantale, de tungstène et d'or) et s'opposant au bien-être des populations locales. Si ces liens entre exploitation minière et organisations armées existent, ils s'avèrent complexes (tissu économique locale et donc revenu des populations reposant sur les activités minières, situation évoluant très rapidement, etc.), et surtout le lien causale direct entre existence des conflits et exploitation minière est questionné par de nombreux auteurs (Geenen and Radley, 2014, Stearns, 2014, Cuvelier et al., 2014a, Johnson, 2013, Cuvelier et al., 2013, Korf, 2006, Nathan, 2005 in Radley & Vogel, 2015).

conflits d'usage, déplacement de population) et enfin à la gestion parfois violente des conflits sociaux liés à ce secteur.

Le premier enjeu social évoqué dans ce paragraphe est celui des conditions de travail dans le secteur minier et métallurgique : maladies professionnelles, l'accidentologie, puis les conditions économiques des travailleurs (rémunération contrat de travail, couverture sociale). Il sera évoqué dans un premier temps les conditions de travail du secteur formel, c'est-à-dire : des mines dont l'activité fait l'objet d'un permis d'exploitation et des usines de traitement ou d'affinage qui sont considérées comme légales dans le pays où elles opèrent.

Concernant les maladies professionnelles dans le secteur minier et métallurgique, deux enjeux majeurs sont les maladies respiratoires et les cancers développés par les travailleurs. Pour l'ensemble des secteurs au niveau mondial, « les maladies respiratoires ([représentent] 17% [de la mortalité liée au travail en 2017]) et leur augmentation les classe parmi les trois premières maladies professionnelles en terme de mortalité après les maladies circulatoires (31%) et les cancers (26%) » (Hämäläinen, Takala, & Boon Kiat, 2017). Tandis que pour le secteur minier, l'*International Institute for Environment and Development* (IIED)[34] notait dans une revue de plus de 330 articles scientifiques en 2001 que « l'activité minière reste une des plus dangereuses activité du monde, que ce soit sur le court terme en nombre de blessés et de morts, mais également sur le long terme avec des impacts comme le cancer ou les conditions respiratoires » (Stephens & Ahern, 2001). Le développement de ces impacts à long terme se fait suite à l'exposition à des « poussières minières [qui] sont des produits des activités minières qui se forment lorsque les roches sont brisées par impact, pilage ou broyage. Les compositions de ces poussières sont déterminées par leur région d'origine et reflètent étroitement la composition [… de la géologie et du sol]. Ces poussières sont constituées de minéraux comme les feldspaths, le quartz, les carbonates, les sulfates et les phosphates. Les poussières sont libérées dans différentes composantes de l'environnement (air, eau et terre) et peuvent nuire à la santé des travailleurs des mines et des autres personnes vivant à proximité des sociétés minières. […] Les effets physiologiques des poussières minérales sont divisés en cinq catégories, à savoir: poussières toxiques, poussières cancérigènes (cancérigènes), poussières fibrogènes (causant la silicose), poussières explosives et poussières nuisibles » (Momoh et al., 2013). Les deux premières catégories de poussières sont concernées par les impacts sanitaires des métaux lourds et de la radioactivité. Ainsi, les travailleurs des secteurs miniers et métallurgiques sont-ils généralement les premiers impactés par l'ensemble des effets sanitaires de l'inhalation de substances contenant des métaux lourds et des radionucléides cités au paragraphe précédent (Tableau 12).

Parmi les maladies respiratoires dues à l'exposition chronique, la pneumoconiose a un impact non négligeable. La pneumoconiose regroupe un ensemble de maladies pulmonaires qui sont définies par des altérations causées par l'inhalation et la fixation dans le poumon de particules solides (Kumar, Abbas, Aster, & Robbins, 2013). Certaines de ces maladies provoquent une fibrose. La fibrose pulmonaire est une maladie respiratoire qui cause des cicatrices dans les tissus pulmonaires, entraînant de graves problèmes respiratoires, les patients souffrent alors d'un essoufflement perpétuel. Elle peut entraîner une insuffisance cardiaque et un risque accru d'embolie pulmonaire. Les travailleurs du secteur minier sont particulièrement exposés à ces maladies à cause de la présence de poussières ; exposition qui semble plus forte pour les mines à ciel ouvert que les mines souterraines. Ainsi dans la revue de la littérature de IIED est-il souligné que les études sanitaires des mines souterraines se concentrent moins sur l'exposition aux poussières que sur « la chaleur et la pression [… les liant] à divers effets sur la santé, notamment le stress thermique professionnel, la tension artérielle et l'hypertension » (Stephens & Ahern, 2001). Ce propos est tout de même à nuancer, car la revue de la littérature repose essentiellement sur des études menées dans « les pays

[34] C'est un institut anglais de recherche politique indépendant (un *think thank*) et de plaidoyer sur les questions de soutenabilité et de changement social.

du Nord » (Stephens & Ahern, 2001), pour lesquelles les conditions de ventilation des mines souterraines se sont nettement améliorées (exemple de l'Australie in Donoghue, 2001; exemple de la baisse de la silicose dans les pays dits industrialisés in World Health Organization, 2007a), ce qui n'est pas le cas dans de nombreux pays du Sud : pour exemple une étude sur 30 ans en Afrique du Sud (Utembe et al., 2015) montre la proportion constante et élevée de mineurs atteint de silicose, une forme particulière de pneumoconiose.

Parmi les pneumoconioses et cancers provoqués par l'activité minière des métaux (hors charbon donc) et métallurgique, on peut citer :

- La silicose, causée par l'exposition à la silice, qui se caractérise par un essoufflement, de la fièvre et une cyanose (peau bleuâtre) et fait partie des fibroses (World Health Organization, 2007a). Malgré de nombreux efforts de prévention, la silicose persiste encore dans le monde entier. Cette maladie incurable affecte des dizaines de millions de travailleurs engagés dans des activités poussiéreuses dangereuses. Avec son potentiel d'invalidité physique progressive, la silicose reste l'une des maladies professionnelles les plus importantes au monde. Il existe également de fortes preuves d'une incidence accrue de la tuberculose lorsque la silicose atteint un stade avancé. En plus de générer une silicose, la silice cristalline est considérée comme une substance cancérogène pour l'homme depuis 1997 par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) (World Health Organization, 2007a) ;

- L'asbestose ou l'amiantose, causée par l'exposition à l'amiante. Dans le cadre de l'activité minière et le traitement des minerai, l'amiante[35] est particulièrement toxique et a un impact DALY[36] élevé sur le total des sites étudiés par le Blacksmith Institute, bien qu'il n'y ait qu'un petit nombre de sites d'extraction d'amiante dans la base de données (Mills-Knapp et al., 2012). L'inhalation d'amiante génère, en plus des pathologies non malignes (asbestose, fibrose), des pathologies malignes : cancer du poumon, de la plèvre, mésothéliome pleural malin (Goldyn, Condos, & Rom, 2008) ;

- La bérylliose, causée par l'exposition au béryllium provoque une fibrose. L'exposition au béryllium est également cancérogène (Goldyn et al., 2008) ;

- La sidérose, causée par l'exposition au fer, la stannose, causée par l'exposition à l'oxyde d'étain, et la barytose causée par le baryum, sont des pneumoconioses sans fibrose ;

- La stibiose (ou « pneumoconiose stibiée »), fibrose pulmonaire due à l'exposition à des poussières d'antimoine (Cooper & Harrison, 2009) ou de trioxyde de diantimoine (INRS, 2000) provoquant une baisse du volume expiratoire et de la capacité respiratoire vitale. Le trioxyde d'antimoine est classé comme produit cancérigène de classe 2B[37] par le Centre International de Recherche sur le Cancer et des études récentes vont très probablement entraîner son reclassement en substance cancérigène (National Toxicology Program, 2016).

En terme épidémiologique, il est à noter qu'en 2013, la pneumoconiose a fait 260 000 morts dans le monde, contre 251 000 en 1990. Parmi ces décès, 46 000 étaient dus à la silicose, 25 000 au charbon et 24 000 à l'asbestose (« Global, regional, and national age-sex specific all-cause and cause-specific mortality for 240 causes of death, 1990-2013 », 2015). En 2007, 30 à 50% des travailleurs de l'industrie

[35] L'amiante désigne un groupe de fibres minérales naturelles (silicate de magnésium hydraté), séparé en deux familles : les serpentines et les amphiboles.
[36] DALY : *disability-adjusted-life-years* : espérance de vie corrigée de l'incapacité (EVCI) est un mode d'évaluation du coût des maladies mesurant l'espérance de vie en bonne santé, c'est-à-dire en soustrayant à l'espérance de vie le nombre d'années « perdues » à cause de la maladie, du handicap ou d'une mort précoce.
[37] Peut-être cancérigène.

primaire, notamment dans les pays en développement, présentent des risques élevés d'atteinte de la pneumoconiose (World Health Organization, 2007a).

Il existe d'autres maladies professionnelles associées aux particules en suspension dans l'air ambiant, pour lesquelles le travail minier est particulièrement touché. Ainsi, le niveau d'exposition aux fumées et poussières associé avec un risque de développer une *bronchopneumopathie chronique obstructive* (ou *Chronic obstructive pulmonary disease*, *COPD* en anglais) est considéré comme « moyen » à « élevé » pour le secteur minier (Korn et al., 1987 in Driscoll, Steenland, Imel Nelson, & Leigh, 2004). De même la mine est le secteur présentant le plus haut niveau de risque de développement de l'asthme chez les travailleurs masculins (Driscoll et al., 2004, p. 13). Dans le Rapport sur la santé dans le monde de l'OMS en 2002, étaient estimés 386 000 décès liés aux maladies pulmonaires de travail : 38 000 dus à l'asthme et 318 000 dus au COPD. Le chiffre total réel pourrait être beaucoup plus élevé puisque le sous-diagnostic et la sous-déclaration sont assez fréquents (World Health Organization, 2007a).

Enfin, le cas du radon mérite d'être souligné comme impactant particulièrement les mineurs puisqu'il s'agit d'une substance toxique gazeuse dans un milieu confiné. Le programme des nations unies pour l'environnement souligne ainsi que sur « certains lieux de travail, l'inhalation de radon représente la part dominante de l'exposition aux rayonnements ionisants des travailleurs. Le radon est la source principale d'exposition aux rayonnements dans les mines souterraines de tous types. La dose efficace[38] annuelle moyenne est d'environ 2,4 mSv pour un mineur de charbon et environ 3 mSv pour les autres mineurs ». Cette dose est donc supérieure à celle de l'« industrie nucléaire, [où] la dose efficace annuelle moyenne pour un travailleur est d'environ 1 mSv, due principalement à l'exposition au radon lors de l'extraction d'uranium » (Programme des Nations Unies pour l'Environnement, 2016).

Au-delà de ces maladies professionnelles, un enjeu constant de l'exploitation minière concerne les accidents du travail, qui présentent la particularité d'être associée à une mortalité élevée. D'après la revue de la littérature de l'IIED qui, comme cela a été souligné, souffre d'un biais du fait du plus grand nombre d'études dans les pays européens et d'Amérique du nord, le nombre d'accidents montre une tendance internationale à la baisse. Malgré cette amélioration dans les pays du nord, la revue de la littérature souligne qu'aux « États-Unis, l'exploitation minière a continué d'avoir le taux de mortalité le plus élevé de toutes les industries selon les études de tendance des années 1990, malgré l'amélioration globale des taux au fil du temps» (Bell, Stout et al. 1990 in Stephens & Ahern, 2001). D'autres revues de la littérature confirment le manque de données concernant les accidents et la mortalité dans les pays pauvres et en développement, qui pourtant semblent élevés : « une étude de 2006 a suggéré que le pourcentage des accidents mondiaux signalés à l'OIT par l'Inde et d'autres nations asiatiques et insulaires était presque nul (Hämäläinen et al., 2006). Cependant, l'étude se poursuit en démontrant que plus de 48 000 travailleurs sont décédés chaque année en Inde, soit 11,4 pour 100 000 travailleurs […]. Dans d'autres pays asiatiques et insulaires, l'étude a estimé que 83 000 travailleurs subissaient annuellement des accidents mortels liés au travail - un taux de 21,5 pour 100 000 travailleurs »(Alsamawi, Murray, Lenzen, & Reyes, 2017). Or, ces pays concentrent la majorité de la production minière. En effet l'extraction matérielle (définie comme la production de matières premières minérales, de ressources énergétiques fossiles et de biomasse) a été majoritairement localisée dans les pays asiatiques pour la période entre 1980 et 2009, date à laquelle l'Asie représentait 57% de l'extraction mondiale (Giljum et al., 2014). Cette région a également connu la plus forte croissance mondiale de l'extraction domestique sur cette période

[38] La dose efficace est la quantité d'énergie déposée par rayonnement ionisant pondéré par le type de rayonnement et par la radiosensibilité des tissus et des organes. Elle s'exprime en sieverts (Sv). La dose efficace est un indicateur de la probabilité de cancer et d'effets génétiques suite à des faibles doses et ne saurait mesurer la sévérité des effets aux hautes doses (Programme des Nations Unies pour l'Environnement, 2016).

(170%), suivie de l'Océanie (115%) et de l'Amérique Latine (103%). L'Afrique a connu une croissance de l'extraction domestique autour de la moyenne mondiale (94%), tandis que l'Amérique du nord et l'Europe ont connu les taux de croissance les plus faibles sur l'extraction de matières premières (7% et 3% respectivement)» (Giljum et al., 2014). C'est pourquoi, les paragraphes suivants tentent d'illustrer l'accidentologie des secteurs miniers et métallurgiques en Asie, malgré le manque de données.

Il est cependant possible d'avoir une estimation des accidents en 2015, grâce à la cartographie des accidents du travail dans l'industrie (« China Work Accident Map », s. d.) réalisée par China Labour Bulletin une organisation à but non lucratif basée à Hong Kong, engagée pour la promotion de conditions de travail décentes (respect de la Déclaration de l'OIT relative aux principes et droits fondamentaux au travail) en Chine et en particulier pour le respect du droit syndical. Le nombre d'accidents est largement sous-estimé, mais offre un aperçu des risques de sécurité régulièrement rencontrés par les travailleurs dans le pays et est représentatif des accidents les plus médiatisés. Ainsi, est-il possible de constater la proportion élevée d'accidents attribuable au secteur minier : 14% des accidents du travail en comptant les mines de charbon et 6% sans le charbon pour l'année 2015 (Tableau 13, (« China Work Accident Map », s. d.)). Les statistiques officielles chinoises (sous-estimées elles aussi) font état d'une moyenne de 6000 morts par an dans les mines de charbon, et d'environ 2000 morts vers 2010-2011, notamment grâce à une meilleure surveillance de l'accumulation des gaz dans les souterrains (provoquant les explosions, ou coup de grisou) (Wright, 2013). Ce qui est nettement plus élevée que dans des économies similaires comme l'Inde (Wright, 2013). De plus, les accidents recensés par China Labour Bulletin, confirment la proportion élevée d'accidents mortels attribués au secteur minier (avec 41% des accidents mortels attribués au secteur minier avec charbon et 12% pour les mines métalliques). Or le nombre d'employés travaillant dans les mines est bien inférieur à celui d'autres secteurs : il était égal à 3% des employés des zones urbaines (hors employés du secteur privé) en 2014 (National Bureau of Statistics of China, 2015).

Tableau 13 : Chiffres clefs 2015 des accidents du travail en Chine recensés par le site China Labour Bulletin. Source : China Work Accident Map, s.d.

Pourcentage des accidents du travail attribués aux mines (avec charbon)	14%
Pourcentage des accidents du travail attribués aux mines (hors charbon)	6%
Nombre d'accidents recensés dans les mines (hors charbon)	33
Pourcentage des accidents les plus meurtriers (comptant 10 morts ou plus) attribués aux mines (avec charbon)	41% *(7/17 accidents)*
Pourcentage des accidents les plus meurtriers (comptant 10 morts ou plus) attribués aux mines (hors charbon)	12% *(2/17 accidents)*
Nombres de morts dans les mines (hors charbon)	193
Nombre de mort moyen par accident dans les mines (hors charbon)	6

Au niveau mondial, et en prenant en compte le manque de données provenant des pays asiatiques sur ces questions, le secteur minier serait la quatrième cause de décès liés au travail avec 3 400 morts selon les chiffres officiels, derrière l'agriculture et la pêche (26 000 morts), l'industrie (7 600 morts, et le secteur des transports (5 200 morts) (Alsamawi et al., 2017).

Enfin, nous pouvons noter qu'il est difficile de dégager la part de la métallurgie dans les accidents au travail (la plupart des classifications l'intégrant dans une catégorie plus large qu'est le secteur industriel). Il est donc proposé de prendre un exemple de l'accidentologie liée aux activités industrielles depuis la mine jusqu'à l'intégration du métal dans un produit : « Dans le cas de l'industrie, une enquête sur le réseau mondial de la chaîne d'approvisionnement révèle, par

exemple, que le minerai de fer du Brésil (14 cas mortels pour 100 000 travailleurs miniers) est exporté en Chine (6 cas mortels pour 100 000 travailleurs dans l'industrie) qui est ensuite transporté dans les ports chinois (3 cas mortels pour 100 000 travailleurs du secteur des transports) pour exportation en Allemagne (1 cas mortel pour 100 000 travailleurs dans le secteur de l'industrie) et au Japon (2 cas mortels pour 100 000 travailleurs dans le secteur de l'industrie) pour la fabrication de voitures. » (Alsamawi et al., 2017).

Au-delà de l'accidentologie et des aspects sanitaires, les conditions de travail en termes de salaire et de sécurité de l'emploi des ouvriers des secteurs miniers et industriels pour la transformation des métaux sont plus mitigées. Il faut en effet souligner qu'en moyenne les revenus des mineurs sont supérieurs aux ouvriers d'autres secteurs, notamment du fait de la dangerosité avérée du métier et permettent souvent aux mineurs d'obtenir un « *living wage* »[39] ou salaire minimum vital, ce qui n'est pas le cas de beaucoup d'emplois dans les pays pauvres et en développement comme nous le verrons ci-après. Cela fait donc du métier de mineur un métier comparativement attractif. Cependant les indicateurs macroéconomiques peinent à établir une relation systématique entre activité minière et développement. En effet, concernant les retombées économiques de la mine, les données de la banque mondiale montrent que l'activité minière à l'échelle nationale n'est pas un facteur de réduction de la pauvreté, mais plutôt d'augmentation des inégalités de revenus (Pegg, 2006). L'opportunité économique de développer un tel secteur est souvent présentée par la Banque Mondiale comme résider dans la création d'emplois, notamment des emplois induits (25 emplois induits pour un emploi créé dans le secteur minier), qui permettraient de dégager des revenus et donc de réduire la pauvreté (Pegg, 2006). Pegg souligne cependant que le nombre effectif d'emplois créés par la mine industrielle (ou les projets à grandes échelles) est faible, et surtout que les salaires dégagés pour les travailleurs sont faibles en comparaison des sommes investies et des revenus dégagés par la mine. Il donne deux exemples de projets financés par la banque mondiale pour illustrer son propos : La mine d'or de Sadiola au Mali qui a créé un emploi de mineur par tranche de 700 000 dollars investis et la mine de Randgold qui a créé un emploi par tranche de 1,23 millions de dollars (Pegg, 2006). Il convient également de distinguer le long terme du court terme. Ainsi, une étude empirique dans les Appalaches montre que l'activité minière est au niveau territorial un facteur d'accroissement des revenus à court terme et un facteur d'appauvrissement sur le long terme (Deaton & Niman, 2012), ce que les auteurs expliquent par le manque d'investissement dans le capital humain associé avec l'activité minière. On peut penser que ce manque d'investissement ne prépare pas suffisamment la région à la fin de l'activité, l'une des particularités de l'activité minière au niveau locale étant qu'elle est nécessairement limitée dans le temps.

[39] Le *living wage* est un concept faisant référence à un salaire permettant de subvenir aux besoins essentiels, il existe donc de nombreuses définitions différentes en fonction de la conception des besoins essentiels sur laquelle la thèse s'attardera dans le chapitre 2. Il est pris ici la définition de la Global living wage coalition, une coalition entre des organisations promouvant des normes de développement durable (Fairtrade International, FSC, GoodWeave International, Rainforest Alliance / UTZ, Réseau d'Agriculture Durable, Social Accountability International) et des experts du salaire minimum vital (Anker M. et Anker R.) visant à améliorer les salaires des travailleurs du monde entier. Cette définition se base sur les travaux d'Anker (Anker, 2006; Anker & Anker, 2017) : c'est une « rémunération perçue pour une semaine de travail standard par un travailleur ou une travailleuse dans un lieu particulier, suffisante pour permettre au travailleur ou à la travailleuse et à sa famille d'avoir un niveau de vie décent. Les éléments d'un niveau de vie décent comprennent la nourriture, l'eau, le logement, l'éducation, les soins de santé, le transport, l'habillement et d'autres besoins essentiels, y compris la provision pour les imprévus. ». Cette définition synthétise succinctement « plus de 60 descriptions de salaires décents et les définitions des déclarations de droits de l'homme; constitutions nationales; Codes de conduite des ONG, des multinationales et des entreprises; Documents du BIT; et déclarations de personnalités historiques majeures telles que les papes et l'Église catholique ».

Comme nous avons vu que l'Asie représentait 57% de l'extraction mondiale (Giljum et al., 2014) et que la Chine présentait des conditions particulièrement précaires pour ces travailleurs, l'exemple de ce pays en développement est pris ici pour illustrer la question de l'emploi dans le secteur minier. En Chine, le salaire des travailleurs du secteur minier en zone urbaine en 2011 est estimé par le gouvernement chinois à 44 196 yuan/an (National Bureau of Statistics of China, 2011), ce qui correspond à 3 683 yuan/mois. Ces chiffres incluent le charbon et sont probablement plus représentatifs de ce secteur qui dénombre une grande part des emplois du secteur minier chinois. Le living wage le plus bas calculé pour la Chine par la Global living wage coalition selon la méthode Anker (Anker, 2006; Anker & Anker, 2017) pour la zone urbaine de Chengdu en aout 2015 (Chuanbo & Xingyue, 2015) s'élève à 2 634 yuan/mois. Les salariés de la mine sont donc en moyenne au-dessus de ce *living wage*, calculé pour une petite agglomération (environ 9 millions d'habitants). En revanche pour une grande (24 millions d'habitants et 70,5 millions pour l'agglomération) et riche (2ème ville chinoise en PIB par habitant) comme Shanghai le *living wage* est plus élevé : 4 136 yuan/mois. En prenant ce référentiel les travailleurs des mines seraient en moyenne en dessous du *living wage*. Cependant, même si les statistiques officielles chinoises (National Bureau of Statistics of China, 2011) n'indiquent pas la situation géographique des 5,5 millions de travailleurs dans les mines (Lu & Lora-Wainwright, 2014), il est raisonnable d'estimer qu'ils travaillent en zone rurale (Lu & Lora-Wainwright, 2014) ou dans des centres urbains dédiés à l'activité minière (exemple du charbon in Wright, 2012). Et de ce fait que le coût de la vie est plus proche d'une petite ville comme Chengdu. Ces données sont confirmées par l'ouvrage de Tim Wright sur l'exploitation du charbon en Chine (Wright, 2012) qui évoque à travers des entretiens un salaire de 3000 à 4000 yuan par mois pour les mineurs du charbon dans le Shaanxi, ce qui est deux fois supérieur à un ouvrier dans la construction et 3 à 4 fois supérieur à un travail sans qualification dans les services. De même un entretien mené par l'auteur évoque un salaire 7 fois supérieur dans la mine par rapport à l'agriculture (Wright, 2012), rémunération attractive pour les résidents de zone rurale confirmée par un cas d'étude sur des mines de plomb dans la Chine rurale centrale (Lu & Lora-Wainwright, 2014).

Cette rémunération moyenne au-dessus du salaire minimal décent est cependant contrebalancée par l'existence de travailleurs précaires qui ne bénéficient pas des mêmes conditions. Ces travailleurs précaires sont souvent des travailleurs migrants d'origine rurale (*nongmingong)* (Jijiao Zhang, Wenden, & Giovanella, 2013) dont « l'influx massif dans les zones urbaines a été un des principaux enjeux des réformes chinoises » (Wright, 2012). Ainsi, en « 2013, le nombre estimé de migrants ruraux vers les villes […] était de 268,9 millions (China Market Research 2014). La plupart de ces personnes restent liées à leurs localités d'origine par un système d'enregistrement des ménages connu comme le *hukou* […Or il existe une] dépendance mutuelle entre le système du *hukou*[40] et l'assurance maladie, […]. Jusque dans les années 2000, la plupart des citoyens ruraux n'avaient aucune assurance maladie .[…] En 2016, il existait toujours une] marginalisation sociale des travailleurs migrants d'origine rurale qui s'installent dans villes, et qui font les frais des lacunes de la protection sociale » (Müller, 2016). Ces travailleurs ruraux d'origine rurale n'ont donc en général pas accès dans les faits à la couverture sociale prévue par la loi chinoise et donc pas accès au soin dans leur lieu de résidence. Dans le secteur minier, la part importante des travailleurs migrants d'origine rurale a été étudiée pour l'exploitation du charbon où les « travailleurs migrants […] vivaient dans une économie informelle, sans sécurité ou sans nombreuses perspectives économiques dans la ville où ils travaillaient » (Taylor, 2012). Cette part des travailleurs migrants parmi les autres ouvriers représentait « selon des enquêtes en 2001 et 2006 -environ 49% du total des ouvriers travaillant dans le charbon et, malgré une limite étatique de 60%, jusqu'à 90% des mineurs extrayant le charbon » (Wright, 2012). Pour Wright la proportion élevée de travailleurs

[40] « Le système d'enregistrement des ménages chinois (*hukou*) pourrait être le facteur le plus important dans la détermination des différences de privilège en Chine. Les inscrits urbains ont droit aux meilleurs emplois, à l'éducation, au logement et aux soins de santé, ce qui n'est pas le cas des personnes inscrites en milieu rural. Ainsi, la transformation du statut de *hukou* de rural à urbain est un aspect central de l'ascension sociale. […Cependant] le statut de *hukou* est essentiellement attribué à la naissance » (Wu & Treiman, 2004).

migrants d'origine rurale peut s'expliquer par les conditions pénibles de travail : « risques élevés, l'intensité de travail élevée» (Wright, 2012) et une rémunération considérée comme faible par les résidents urbains. Ces travailleurs ont donc des conditions précaires : « même dans les années 2000, la main-d'œuvre immigrée n'était pas stable et présentait encore une partie de la saisonnalité qui caractérise la nouvelle main-d'œuvre. [… Enfin cette] masse de main-d'œuvre rurale […] travaillait généralement pour des bas salaires dans de mauvaises conditions. Ils travaillaient plus longtemps que ne le prévoyait la loi: à Huaibei (Anhui), souvent douze à quatorze heures par jour plutôt que huit heures (Guo Jing et al. 2007: 67). Dans l'ensemble, ils étaient moins bien payés que les travailleurs réguliers, avec parfois une distinction supplémentaire entre les travailleurs ruraux locaux et les travailleurs ruraux d'autres provinces. Même lorsque les salaires étaient similaires, d'autres conditions étaient discriminatoires à l'encontre des travailleurs ruraux […]. Le fait qu'ils venaient de zones rurales pauvres servait également de prétexte aux sociétés minières pour payer moins que la pleine compensation en cas de décès. Alors que 200 000 yuans étaient la norme depuis le milieu des années 2000, les familles des travailleurs migrants ne recevaient souvent que 20 000 à 50 000 yuans»(Wright, 2012). Or ces travailleurs précaires ne sont pas toujours comptabilisés dans les statistiques nationales, notamment parce que « dans de nombreuses mines non étatiques, ainsi que dans certaines mines d'État, les travailleurs ruraux sont recrutés par le biais du système de travail contractuel, le propriétaire de la mine n'ayant aucune relation directe avec les travailleurs, qui ont été recrutés et gérés par une entreprise recrutant les contractuels » (Wright, 2012). L'ampleur de ce phénomène vient donc questionner la réalité d'un salaire décent dans le secteur minier chinois. De même que l'existence de travailleurs illégaux, comme nous allons le voir dans le point suivant sur le secteur informel.

Un autre exemple peut être pris avec les conditions de travail du secteur minier en Afrique du Sud, qui ont fait l'objet d'une attention renouvelée après les événements liés au massacre de Marikana[41] survenu en 2012 en Afrique du Sud (Twala, 2012). L'Afrique du Sud fait état comme le mentionnait l'article de Pegg (Pegg, 2006) de l'écart entre les sommes investies et générées par le secteur minier et l'impact moindre en termes de revenus pour les travailleurs. Ainsi en « 2009 le secteur minier contribuait directement à 8,8% et à 10% indirectement du PIB, [… mais] l'exploitation minière a également contribué à la répartition inégale des richesses et à la perpétuation des conflits liés au travail » (Twala, 2012). Concernant la question du massacre de Marikana, ces évènements sont liés à la question du salaire décent, puisque c'est pour réclamer un *living wage* de 12 000 rands que les salariés ont fait grève (Twala, 2012), représentant plus du double du salaire que les mineurs de la région touchaient en 2012 (5 400 rands)(« Analysis », 2012). La revendication d'un living wage de 12000 rands semble en accord avec les estimations de WageIndicator Foundation (© WageIndicator, 2018) basées sur les données de la banque mondiale, de l'OIT et de la FAO, qui font état *d'un living wage* entre 7480 et 11 300 rands pour un travailleur contribuant aux dépenses d'une famille sud-africaine moyenne (ou « typique »[42]). Ce *living wage* est une moyenne et dépend bien entendu du coût de la vie autour du site minier, coût qu'il conviendrait d'estimer localement, en particulier parce que : «l'afflux rapide de personnes peut entraîner une inflation des prix. Comme l'explique la Banque mondiale, les "revenus plus élevés des travailleurs des mines peuvent conduire à une augmentation des prix locaux des biens essentiels (nourriture, carburant, terre, logement) et des services qui peut

[41] Le massacre de Marikana, qui a eu lieu le 16 août 2012, a constitué l'usage le plus meurtrier de la force par les forces de sécurité sud-africaines contre des civils depuis 1960. Le massacre de Marikana s'est produit lors d'une grève sauvage dans une mine de platine appartenant à Lonmin dans la région de Marikana à Rustenburg durant laquelle la police a tiré sans sommation sur un groupe de grévistes. Les chiffres officiels font état de 78 mineurs blessés et de 34 mineurs tués par la police.

[42] Le living wage d'une famille « typique » est une estimation de base qui respecte les conditions spécifiques du pays. La famille type comprend deux adultes et le nombre d'enfants est déterminé par le taux de fécondité par pays (le nombre moyen d'enfants qu'une femme devrait avoir au cours de sa vie). Un adulte travaille à temps plein et les heures de travail du deuxième adulte sont approximées par le taux d'emploi national. Le revenu total gagné par deux adultes rémunérés est suffisant pour atteindre un niveau de vie suffisant.

mettre en reste d'autres travailleurs dans la région, voire diminuer leurs revenus réels" »(Pegg, 2006). Cependant, la fourchette donnée par WageIndicator Foundation, amène à la conclusion que le salaire de 5 400 rands ne permet pas d'atteindre un niveau de vie décent pour une famille sud-africaine « typique ». Twala résume ainsi la situation sociale des travailleurs des mines de platines en Afrique du Sud : « depuis 1994, le boom massif du platine dans la région de Rustenburg "a généré une richesse fabuleuse pour les entreprises et les dirigeants, mais une misère sociale, des tensions et la pauvreté pour les travailleurs et les communautés" (Coleman 2012). […] Avec des travailleurs sciemment divisés sur des critères ethniques, raciaux et régionaux, des "frustrations énormes" ont résulté chez les travailleurs, du point de vue desquels l'industrie et les employeurs continuent de s'enrichir, pendant qu'ils "transpirent sous terre, affrontent la mort au quotidien et sombrent plus profondément dans la pauvreté" (Coleman 2012) » (Twala, 2012).

Comme cela a été évoqué sur le cas des mineurs chinois, les statistiques nationales ne permettent pas à l'échelle mondiale de rendre compte de l'entièreté du problème de la précarité économique des travailleurs du secteur minier et métallurgique, car il existe un certain nombre de situations où le travail ne s'effectue pas dans un cadre légal : « les petites exploitations minières ont tendance à être informelles et situées dans des régions éloignées. De nombreuses études longitudinales ou à grande échelle sur la santé des travailleurs utilisent des statistiques d'usage qui, bien sûr, ne sont pas disponibles et / ou ne sont pas fiables dans de nombreux contextes d'exploitation minière à petite échelle.» (Stephens & Ahern, 2001). Nous nous attardons ici sur la question des mines illégales.

Il s'agit dans un premier temps de rappeler que cette question du secteur informel n'est pas spécifique à la production minière et métallurgique. En effet, selon l'organisation internationale du travail, le secteur informel représente plus « de 60% de la population active occupée dans le monde vit de l'économie informelle. L'informalité existe dans tous les pays, quel que soit le niveau de développement socio-économique, même si elle est plus répandue dans les pays en développement. Les 2 milliards de femmes et d'hommes qui vivent de l'économie informelle sont privés de conditions de travail décentes. Les données montrent que la plupart des gens entrent dans l'économie informelle non par choix, mais par manque d'opportunités dans l'économie formelle et en l'absence d'autres moyens de subsistance. » (OIT, 2018). Pour le secteur minier, la question de l'illégalité est souvent liée à la question des mines artisanales. La définition des mines artisanales ou mines à petites échelles (en anglais *Artisanal and Small-Scale Mining, ASM) est souvent floue, et sera utilisée ici la définition assez large de «* l'Organisation internationale du Travail (OIT) en nous concentrant sur les «petites exploitations (et dans une moindre mesure les carrières) à forte intensité de main-d'œuvre, la mécanisation étant faible et élémentaire». L'expression «mineurs artisanaux» est utilisée pour englober tous les mineurs, petits, moyens, informels, légaux et illégaux qui utilisent des procédés rudimentaires pour extraire des roches et des minéraux précieux des corps minéralisés. » (Gunson et Jian, 2001). Cependant il convient de rappeler que le non-respect des réglementations n'est pas l'apanage des ASM, comme nous l'avons vu avec la question chinoise des travailleurs migrants d'origine rurale dont la situation permet souvent aux entreprises minières d'exploiter des vides juridiques, et qu'il existe un certain nombre de situations où les mines industrielles ne respectent pas entièrement les lois du pays où elles opèrent, que ce soit sur les questions sociales abordées dans ce paragraphe, ou sur les questions environnementales et sanitaires évoquées précédemment (dépassement des législations en terme d'émissions polluantes, d'exposition des travailleurs, etc.). Cependant, la question des mines complètement illégales, c'est-à-dire opérant sans permis, reste un phénomène globalement cantonné aux ASM.

L'existence des ASM à travers le monde est répandue : « il est estimé que quelque 100 millions de personnes dépendent de ce secteur pour leurs revenus principalement dans les pays en développement » (Buxton, 2013). Les estimations des mineurs du secteur de l'ASM varient entre 13 et 30 millions (Buxton, 2013; Labonne, 2014). L'ASM représenterait entre 15 et 20% de l'approvisionnement de l'ensemble des minéraux et des métaux (Estelle Levin in Buxton, 2013), 20 et 30% de l'approvisionnement de l'or (Estelle Levin in Buxton, 2013; Labonne, 2014) et 85% de

toutes les pierres précieuses (Labonne, 2014). Or, la « majorité des mineurs artisanaux opère à un niveau de subsistance» (Labonne, 2014) et « souvent, les mineurs artisanaux et à petite échelle ne disposent pas de l'infrastructure sociale et économique la plus élémentaire nécessaire pour sortir de l'extrême pauvreté (Siegel et Veiga 2010), ce qui les rend incapables de donner accès à l'éducation à leurs enfants, de s'appuyer sur leurs actifs productifs, et d'avancer économiquement (Carter et al. 2007) » (Buxton, 2013). De plus ce n'est pas une activité stable, étant sujette à l'épuisement comme les mines industrielles, étant particulièrement sensible aux variations du prix des métaux (Buxton, 2013) et parfois aux tentatives gouvernementales d'endiguer l'activité, comme nous le verrons sur l'exemple chinois. Or, « lorsque les avantages ne l'emportent plus sur les risques », beaucoup de mineurs d'ASM n'ont pas de porte de sortie et se retrouvent « piégés dans la pauvreté. […] Pour échapper à ce piège de la pauvreté, les mineurs doivent pouvoir soit conserver une plus grande part de leurs revenus, soit augmenter leurs gains. [… Or] les sites ASM sont affectés par un coût de la vie plus élevé que celui des régions voisines » (Labonne, 2014). Concernant la question de la santé et de la sécurité, il semblerait que les ASM exposent les travailleurs à des risques supérieurs : « les grandes mines, même les plus profondes, ont tendance à disposer de meilleures données sur la santé et la sécurité et ont parfois de meilleures conditions professionnelles» (Stephens & Ahern, 2001). Selon l'IIED « la plupart » des ASM opèrent illégalement (Buxton, 2013), et s'il semble difficile (par définition) d'avoir des estimations précises de cette part d'activité illégale, elle semble concerner beaucoup de mineurs d'ASM qui «volontairement ou involontairement mènent leurs opérations illégalement » (Labonne, 2014). Pour l'exploitation des terres rares par exemple, les estimations de la part de production illégale varient entre 20% pour 2014 (Adamas Intelligence, 2016 in Balomenos et al., 2017) à plus de 40 % de la production chinoise totale (BRGM, 2015, p. 126), une étude modélise la part des revenus mondiaux dégagés de la vente des terres rares lourdes attribuable au secteur illégal à 59% (Nguyen & Imholte, 2016). Ces liens étroits avec le secteur informel viennent renforcer une précarité déjà omniprésente dans le secteur des ASM. Ainsi, l'entrée dans le secteur informel «marginalise une communauté sur les plans politique, économique et même social. L'informalité peut à la fois renforcer la résilience en fournissant une activité économique et accroître la vulnérabilité, car elle supprime les protections et les opportunités offertes par le gouvernement. La plupart des ASM sont informelles […] Souvent, l'informalité domine en raison d'obstacles considérables à la formalisation. [...] Ceci est à la fois symptomatique et exacerbe la marginalisation géographique, politique et sociale » (Buxton, 2013).

La question de l'emprise de l'activité minière et des conflits d'usage liés à l'occupation du territoire, notamment des terres arables est un enjeu important. L'emprise minière est moins extensive que certaines formes d'agricultures qui ont été majoritairement ciblées dans le débat public (agrocarburants, huile de palme, etc.) comme liées à des pratiques d'accaparement des terres[43]. En effet, un rapport s'intéressant à l'empreinte terrestre de divers activités économiques montre qu'en

[43] Accaparements des terres (en anglais *land grabbing*) est le processus d'acquisition de terres par des investisseurs, souvent dans un contexte transnational, dans des zones rurales des pays en développement ou pays pauvres, ayant des conséquences pour les populations locales, perdant l'accès aux terres dont elles dépendent. Le concept a été popularisé lors de la crise des prix alimentaires de 2007-2008 lorsque des états craignant pour leurs souverainetés alimentaires ont investi massivement dans des terres agricoles dans les pays en développement (von Braun & Meinzen-Dick, 2009). Cependant, il est utilisé pour parler plus largement de risques d'expulsion, dans des contextes où les populations locales n'ont souvent pas de titre de propriété formalisé. Ces pratiques peuvent être également mis en œuvre par des grandes entreprises cherchant à s'internationaliser et à investir dans une activité destinée aux exportations et non à des fins de sécurité alimentaire, comme les agrocarburants (Borras, McMichael, & Scoones, 2010), l'huile de palme (Gellert, 2015). Aujourd'hui, le terme d'accaparement des terres « est devenu un terme fourre-tout qui fait référence à l'explosion actuelle de transactions foncières commerciales transnationales principalement axées sur la production et l'exportation de denrées alimentaires, d'aliments pour animaux, de biocarburants, de bois et de minéraux » (Borras & Franco, 2012).

« comparaison des autres catégories d'utilisation des terres, les besoins en terres pour l'exploitation minière sont relativement faibles » (REdUSE, 2013), l'emprise terrestre des activités minières étant évaluée à 0,12% par exemple en Europe. Cependant, les données sur cette emprise sont rares et l'activité minière et le traitement métallurgique présentent plusieurs aspects provoquant des conflits d'usages : l'emprise de la mine et les déplacements de population qu'elle génère à différents stades du projet, l'emprise de ses émissions, l'utilisation de l'eau, et le caractère irréversible de la transformation de l'usage des terres. Il s'agit ici de décrire ces impacts et les tensions sociales soulevées par ces impacts.

Tout d'abord concernant l'emprise terrestre des activités minières, le rapport (REdUSE, 2013) montre que même si la consommation globale de denrées alimentaires est liée à une occupation des terres beaucoup plus importante que la mine en termes absolus. L'occupation des terres ramenée aux objets du quotidien montre le poids de la consommation des ressources non renouvelables (Figure 19) dans la pression de l'occupation des terres.

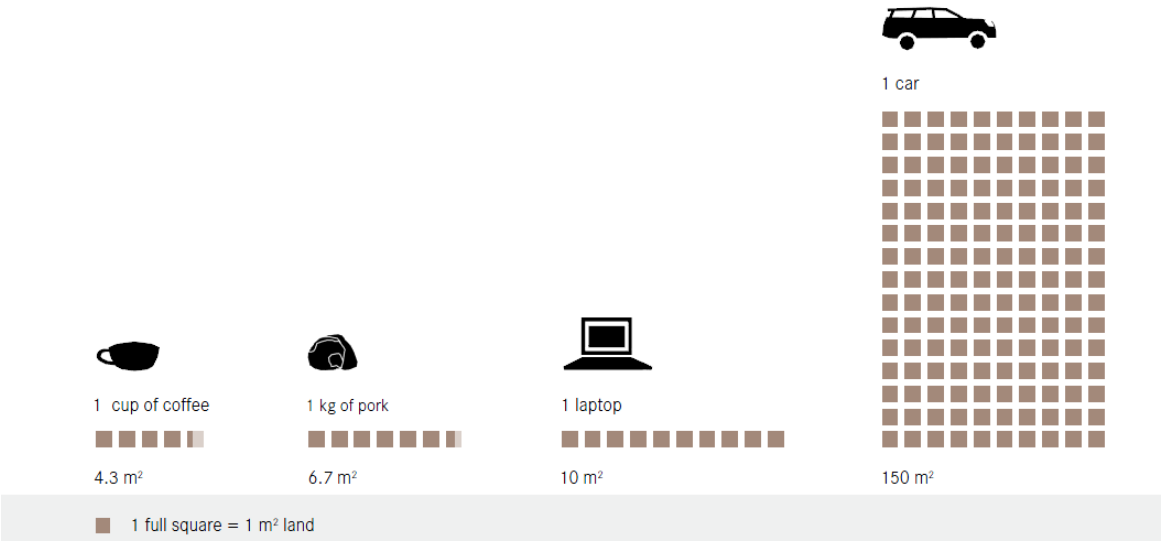


Figure 19 : Empreinte terrestre de quelques produits du quotidien. Source : REdUSE, 2013

Ces considérations s'intéressent à l'emprise des travaux miniers et des installations de traitements métallurgiques, comprenant le stockage des déchets (stériles et digue à résidus). Cette emprise pourrait être définie comme l'empreinte stricte (*onsite footprint*) du projet minier et métallurgique, c'est-à-dire sans les impacts environnementaux, l'emprise de l'utilisation de l'eau, les installations hors-site (Sonter, Moran, Barrett, & Soares-Filho, 2014). Les projets miniers se trouvent très souvent dans des zones « reculées », c'est-à-dire loin des centres urbains où se concentre le pouvoir décisionnel, et où le régime foncier est mal défini (Downing, 2002; Owen & Kemp, 2014). De ce fait les populations en présence ont souvent plus de mal à faire valoir leurs revendications notamment territoriales, ce qui peut conduire au déplacement forcé des populations. Les projets miniers ne se trouvent pas «naturellement », c'est-à-dire pour des raisons géologiques, dans ces zones, mais c'est justement parce que le coût politique et économique de déplacer des personnes dans des centres urbains, ou plus généralement dans des zones où l'organisation sociale bénéficie d'un pouvoir politique fort serait trop élevé (Downing, 2002; Sacher, 2014). Il n'y a malheureusement pas d'estimation mondiale du nombre de personnes déplacées par les mines, mais Downing affirmait en 2002 que ce chiffre était loin d'être négligeable , affirmation qui est confirmée par des publications plus récentes (Owen & Kemp, 2014). Ce fait est illustré par quelques exemples : entre 1950 et 1990 à minima 2,55 millions de personnes ont été déplacées par des projets miniers en Inde, « la mine de Freeport en Indonésie aurait déplacé environ 15 000 personnes (Hyndman 1988, 1994) et la mine Ghanan Tarkwa aurait chassé de force de 20 000 à 30 000 personnes (Coakley 1998,

Goldfields Ghana Ltd. 2001, FIAN 2001) » (Downing, 2002). Les MIDR (*mining-induced displacement and resettlement*) sont en général accompagnés de ce que les spécialistes des déplacements (les académiques étudiant les DIDR *development-induced displacement and resettlement*) appellent « *the resettlement effect* », c'est-à-dire la perte d'actifs physiques et non physiques, notamment les maisons, les communautés, les terres productives, les actifs et sources de revenus, les moyens de subsistance, les sites culturels, les structures sociales, les réseaux et les liens, l'identité culturelle et les mécanismes d'entraide (Downing, 2002). La perte de terres en elle-même n'expliquerait que 10 à 20% de l'appauvrissement observé chez les populations déplacées, ces personnes faisant face à divers risques : le chômage, le fait d'être sans domicile fixe, la marginalisation, l'insécurité alimentaire, la perte de terres et de ressources communes, l'augmentation des risques pour la santé, la désarticulation sociale, la perturbation des activités éducatives formelles et la perte des droits civils et humains (Downing, 2002). Au-delà de ces effets accompagnant généralement les déplacements de population (DIDR), Owen et Kemp (Owen & Kemp, 2014) à travers une étude de 41 déplacements de populations soulignent la particularité des déplacements liés à dus à l'activité minière. Une première particularité est attribuable au fait que les projets miniers se découpent en plusieurs phases (la phase d'étude et d'exploration, la construction des installations et de la mine, la phase d'opération et l'après-mine) et qu'au cours de la phase d'opération la mine continue à s'étendre de manière incrémentale en fonction des nouvelles découvertes, mais aussi des cours des métaux, etc. Le fait de ne pas prévoir dès le départ l'emprise totale du projet, conduit à plusieurs phases de négociations avec des ménages qui peuvent être déplacés plusieurs fois (les auteurs prennent un exemple où les foyers ont été déplacés 4 fois) et augmentent les risques sociaux (dépendance économique à la mine, impacts en termes de droits humains, et conflits avec les communautés affectés). Ces conflits apparaissent entre l'entreprise minière et les communautés pour des questions d'occupations du territoire, mais souvent au sein même des communautés (compensations différentes perçues en fonction du stade du projet, etc.). Les conflits peuvent également être des conflits d'usage : très souvent avec les activités agricoles, parfois entre mineurs artisanaux et mineurs industriels. Une deuxième particularité (Owen & Kemp, 2014) des projets miniers est la proximité des populations déplacées avec l'activité minière (contrairement avec un barrage par exemple), engendrant des risques de sécurité et sanitaire pour les populations à proximité. Parfois les entreprises minières pour éviter des coûts et pour se mettre en conformité avec les standards internationaux (qui prônent d'éviter les plans de réinstallation des populations) ne déplacent pas les populations locales, ce qui aggravent encore leur exposition en termes de risques de sécurité et sanitaires. Une troisième particularité est la dépendance des populations locales à l'activité minière (Owen & Kemp, 2014), les populations déplacées étant en générale encore plus dépendante économiquement des entreprises minières que le reste de la population locale. Enfin, l'emprise directe de la mine grandit au cours du temps, c'est-à-dire au fur et à mesure de l'extraction du gisement et des découvertes locales de nouvelles zones d'intérêt. Cette expansion de l'emprise est notamment soulignée par Sonter et ses collaborateurs (Sonter et al., 2014) dans une étude de changement d'occupation du sol de la région minière du quadrilatère ferrifère au Brésil, comparant cette région à d'autres régions non minières et à d'autres cas d'étude miniers et tirant des hypothèses générales sur les dynamiques spécifique d'occupation des sols en région minière.

Au-delà de l'emprise stricte de l'activité minière, il s'agit de prendre en compte l'empreinte en termes de pollution de la mine et de la métallurgie, qui comme l'ont montré les points précédents sur les aspects sanitaires et environnementaux peut être nettement supérieure à la zone d'activité (voir les exemples de Norilsk et des ruptures de digue). Cette empreinte indirecte provoque des problèmes sociaux : à travers les questions sanitaires et environnementales qu'elle soulève et à travers les conflits d'usage qu'elle génère, comme cela est notamment souligné dans l'étude sur le Brésil (Sonter et al., 2014). Il existe un corpus d'étude dédié aux conflits sociaux générés par les impacts environnementaux et sanitaires des activités extractives, ou conflits socio-environnementaux (Martinez-Alier et al., 2010; Vallejo, 2010; Vallejo et al., 2011). Le concept de conflits socio-environnementaux ou « conflits distributifs écologiques naît de l'intersection des

champs de l'économie écologique et l'écologie politique, qui lie l'émergence de conflits environnementaux dans les pays du Sud à la croissance du métabolisme des sociétés du Nord (y compris des parties de Chine) » (Martinez-Alier & Walter, 2016). Cette approche a donné lieu à la création d'outils méthodologiques participatifs pour cartographier les conflits socio-environnementaux (Martinez-Alier et al., 2010), dont les résultats sont synthétisés en un atlas en ligne présentant les différents conflits : EJAtlas (Temper, Bene, & Martinez-Alier, 2015). En septembre 2018, le EJAtlas (Temper et al., 2015) recensait 534 cas de conflits socio-environnementaux dans le monde liés à l'exploration minière, aux mines et au traitement des minerais, ainsi qu'à la métallurgie. Cette cartographie donne une idée de l'ampleur du phénomène, même si elle ne peut être exhaustive. En effet, cette approche se concentre sur les contestations qui constituent la partie la plus remarquable des impacts sociaux, mais dont l'apparition dépend des habitus des populations, de l'organisation sociale dans le pays abritant l'activité, notamment de la liberté d'expression (Muradian et al., 2012). De plus, les conflits sont mieux recensés dans les zones où la recherche sur ces sujets est très active, comme en Amérique Latine. Ainsi, concernant les mines à grandes échelles, l'Amérique du Sud et l'Amérique centrale seules dénombraient « 203 conflits actifs affectant 308 communautés [… :] au Pérou (35), au Chili (35), en Argentine (26), au Mexique (32), au Brésil (20), en Colombie (12), en Bolivie (9) et en Équateur (7) » (Martinez-Alier & Walter, 2016) en 2014.

La question de l'utilisation de l'eau augmente encore cette empreinte. En effet, les activités minières ont un impact sur la ressource en eau. Ces impacts sont divers, mais plusieurs enjeux méritent d'être soulevés quant aux potentiels conflits d'usage qu'ils génèrent : « (a) sédimentation / envasement des masses d'eau à proximité des sites miniers [dus à une plus grande sensibilité à l'érosion], (b) épuisement de la nappe phréatique lié à l'utilisation excessive d'eau pour le traitement du minerai à faible teneur couplé à l'augmentation du drainage, (c) détournement des cours d'eau vers la fosse et sa conversion en lac toxique […] (d) la contamination des eaux réceptrices due à un excès d'acidité et de minéraux métalliques provenant de la lixiviation des eaux de la mine pouvant résulter en une augmentation de l'acidité et (e) l'assèchement de l'eau [par pompage] au fond des mines [l'exhaure] et leur rejet en surface subséquent pourraient entraîner une contamination des eaux de surface » (Pokhrel & Dubey, 2013) ; le pompage des eaux de la mine (l'exhaure) pouvant également créer un épuisement des nappes phréatiques alentour. Ces différents enjeux ont des conséquences sur l'utilisation de l'eau : « l'eau polluée pouvant être impropre à l'irrigation. […] La sédimentation et l'envasement des eaux de surface […] peuvent résulter en une plus grande turbidité et conductivité et donc affecter […] différentes espèces aquatiques, incluant les poissons. De plus, le rabattement des nappes phréatiques et la lixiviation des métaux depuis les stériles et les digues à résidus peuvent affecter les puits, qui sont des sources d'eau potable pour des millions de personnes dans le monde » (Pokhrel & Dubey, 2013), ainsi que des sources d'approvisionnement pour l'agriculture. La contamination et l'assèchement de l'eau autour des sites miniers est donc un facteur clef d'impact sur les activités locales que ce soit l'agriculture ou la pêche, dont l'emprise territoriale est bien supérieure à l'emprise stricte des activités de production métalliques.

De plus, cette question de l'empreinte minière est aggravée par le fait que l'activité extractive a lieu dans des zones écologiquement et socialement de plus en plus sensibles. Ainsi existe-t-il une « expansion de la frontière minière à des écosystèmes sensibles et critiques, tels que les forêts tropicales et les forêts tropicales de montagne, ou les très hautes montagnes avec des pâturages et des glaciers. Ce sont aussi les habitats des peuples autochtones. Comme l'a souligné Bridge (2004), une proportion croissante des dépenses d'exploration minière et d'investissement dans les années 1990 a visé les zones tropicales du monde entier, atteignant des zones de conservation écologiquement sensibles et / ou de grande valeur. Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN) a soulevé des préoccupations liées à l'expansion de la frontière minière, gazière et pétrolière dans les sites du patrimoine mondial, appelant à la protection de ces sites » (Martinez-Alier & Walter, 2016). Pour reprendre l'exemple de l'Amérique Latine et des conflits socio-environnementaux, selon le EJAtlas : «en Amérique latine, les peuples autochtones sont présents

dans plus de 50% des conflits environnementaux enregistrés à ce jour dans ce registre» (Martinez-Alier & Walter, 2016).

Ces différents aspects constituant une emprise large de l'activité minière rentrent en conflit notamment avec un usage agricole des terres. En effet, des « études récentes menées par des universitaires et des activistes mettent en évidence le grand chevauchement des concessions minières avec les paysans et les populations autochtones d'Amérique latine [… avec] plus de la moitié des communautés paysannes péruviennes […] affectées par des projets miniers ou des concessions » (Martinez-Alier & Walter, 2016). La perte d'un usage agricole et la perte de biodiversité à travers le changement d'usage des terres, l'érosion et l'appauvrissement des sols dues à l'activité minière s'inscrit dans une dynamique plus large (Ceccarelli, Bajocco, Salvati, & Perini, 2014; Gibbs & Salmon, 2015; Song et al., 2018; United Nations Environment Programme, 2012). En effet, au-delà de la question de la compétition entre les différents usages des terres, les dégradations des sols peuvent être considérées comme non réversibles : le sol est souvent considéré comme une ressource non renouvelable, car les temps de renouvellement de cette ressource sont très élevés. Les problèmes liés aux changements d'usage des terres prennent de l'ampleur : les « demandes concurrentes en aliments, aliments pour l'élevage, combustibles, fibres et matières premières intensifient les pressions sur les terres. […] La demande de biocarburants et de matières premières a également fortement augmenté, […]. Cette croissance simultanée provoque la conversion des terres, la dégradation des terres et la pression sur les zones protégées » (United Nations Environment Programme, 2012). Lorsque les sols ne sont pas pollués ou ont été dépollués, ils ont généralement été dégradés et ne sont plus à même de supporter des productions agricoles.

Ces différents aspects de l'empreinte minière et métallurgiques sur les sols ne prennent pas en compte les effets indirects (aussi appelés : « *offsite footprints* », « *shadow effects* », « *spill-over effects* » (Sonter et al., 2014)), comme le stockage hors-site, les transports, les autres industries implantées pour subvenir aux besoins de la mine. Pour l'approvisionnement énergétique il est souvent nécessaire de développer un approvisionnement dédié pour la mine industrielle que ce soit avec une centrale thermique ou un barrage). A titre d'exemple, nous pouvons citer le projet Inga 3 de construction d'un barrage pour approvisionner les mines du Katanga en République Démocratique du Congo et qui devrait déplacer environ 10 000 personnes (Jones, 2017). Cependant ces phénomènes participent à l'artificialisation des sols autour des projets miniers, et sont souvent sous-estimés en termes d'impacts sociaux et environnementaux (Sonter et al., 2014). Il n'existe pas de revue systématique de l'ampleur de ce phénomène généré par le secteur minier et métallurgique, bien qu'il existe plusieurs tentatives pour rendre en compte la dégradation des terres en ACV, à travers des indicateurs de qualité de sol (Oberholzer, Freiermuth Knuchel, Weisskopf, & Gaillard, 2012), de perte de biodiversité et d'effet sur les services écosystémiques (Jolliet et al., 2004; Koellner et al., 2013) et du potentiel de production de ressources biotiques, ce qui constitue une tentative d'évaluer la perte de qualité du sol pour un usage agricole et dont les indicateurs sont calculés soit à travers le surplus énergétique nécessaire pour rétablir une qualité de sol avec des intrants (Milà i Canals et al., 2007) soit à travers des modélisations d'érosion des sols. En effet, la mise en œuvre pratique de ces indicateurs n'est pas assurée par un cadre cohérent en ACV. Cela a conduit à l'omission des impacts de l'utilisation des terres dans les ACV, forçant ainsi de nombreux acteurs à recourir à d'autres outils dans la lutte contre les impacts de l'utilisation des terres (Yellishetty et al., 2009). La transformation de l'usage des terres peut être considérée comme irréversible, au sens thermodynamique du terme, puisque toute tentative d'en réhabiliter l'usage présente des coûts énergétiques et en apports de matériaux, non négligeables. En effet, Sonter souligne le fait que « la preuve que les mines peuvent être « fermées » sans impacts permanents, ou que la réhabilitation puisse se faire de manière certaine selon un planning définie, est encore à faire » (Sonter et al., 2014)

Enfin, le dernier enjeu social que nous évoquerons est la répression des populations exprimant des plaintes dans le cadre de conflits liés à l'activité minière. Cette répression est le plus souvent opérée par les états comme « une méthode pour faciliter l'extraction de matières premières ». La répression

de l'état passe souvent par un processus de « criminalisation » des manifestants. Cette « «criminalisation de la protestation» fait référence aux différents processus allant des fonctionnaires et des politiciens qui promeuvent et appliquent des lois qui qualifient la protestation de comportement social inacceptable et qualifient de sabotage, de terrorisme ou d'obstruction à l'espace public les manifestations ; en passant par la classification des organisations manifestantes en tant qu'associations illicites ou des manifestants comme des criminels (Saavedra, 2013); et, jusqu'à, dramatiquement, à la réalité de pays […] où des militants écologistes sont tués alors qu'ils défendent les moyens de subsistance et la nature» (Martinez-Alier & Walter, 2016). Comme, cela a été souligné dans le paragraphe sur la sous-rémunération avec l'exemple du massacre de Marikana en Afrique du Sud, l'utilisation de la force policière contre les manifestants est aussi bien valable pour les protestations des salariés que celle des populations locales et des militants écologistes. La répression policière est assez répandue dans les secteurs miniers et métallurgiques comme le soulignent ces deux exemples : au « Chili, Codelco […] a été victime d'un conflit violent dans une mine de cuivre où 35 contractuels au total ont été blessés par la police lors d'une grève de trois semaines (Soto, 2011). […] La mine d'or de Freeport-McMoRan à Grasberg, en Indonésie, a engagé la police locale pour protéger sa mine. Cependant, plutôt que de protéger les travailleurs, la police locale a tiré sur les travailleurs des mines en grève qui s'opposaient aux conditions de leur emploi et à leur indemnisation » (Bond & Kirsch, 2015).

v. Les enjeux environnementaux et sanitaires du recyclage (gestion formelle des produits contenant des métaux)

Il s'agit ici de se concentrer particulièrement sur la production métallique secondaire sur les impacts (changement climatique, acidification, principaux enjeux sanitaires, et les principaux enjeux sociaux) qui ont été vus précédemment afin d'attester des différences avec la production primaire de ces métaux.

L'impact de la production sur le changement climatique est un des principaux avantages du recyclage par rapport à l'activité minière. Ainsi , « les économies d'énergie de la production de métaux secondaires (recyclés) par rapport à la production de métaux de première fusion sont […] : cuivre 85%, nickel 90%, plomb 65%, zinc 75%, aluminium 95% et acier 74% » (T. Norgate & Haque, 2010). Certains chiffres sont discutés, notamment Allwood souligne que l'affirmation que l'aluminium recyclé ne demande que 5% de l'énergie de la production ne prend pas en compte la mise en place de toute la chaîne de valeur liée au recyclage. En prenant en compte ces étapes, il conclut à une consommation énergétique pour la production d'aluminium recyclé égale à 30% de celle de l'aluminium primaire (Allwood, 2014). Ce qui reste une réduction considérable de la consommation. Cependant ces réductions énergétiques sont obtenues uniquement pour les applications et composants qui sont recyclables (usage non dispersif, pas d'alliage, pas de miniaturisation, pas de combinaisons avec des métaux qui sont thermodynamiquement incompatibles dans le recyclage, conception de produits aisément démontables, voir paragraphes 2.5 et 2.6). Ces applications concernent essentiellement les grands métaux industriels, ce qui participe à établir un taux de recyclage bien plus élevé pour ces éléments (voir Figure 10). A l'inverse, la plupart des petits métaux présentent peu d'applications correspondant à ces caractéristiques. Dès lors, pour « de nombreux métaux critiques utilisés en combinaison (comme alliage ou dans des applications électroniques), l'énergie requise dans le processus de recyclage pour les séparer être significativement plus élevée que l'énergie nécessaire pour la production primaire » (Allwood, 2014).

Des enjeux liés à l'acidification sont également présents dans le recyclage des métaux, et concernent principalement le secteur informel lié aux petits métaux (voir Tableau 6). La mise en place d'une chaîne de valeur du recyclage des produits en fin de vie contenant des petits métaux étant coûteuse, un certain nombre de ces produits en fin de vie passent dans le secteur informel ou les procédés utilisés sont moins coûteux. Parmi les produits en fin de vie contenant des petits métaux, l'exemple des déchets électroniques est un enjeu de taille : « taux de croissance exponentiel des industries

électriques et électroniques au 21ème siècle […a généré] une quantité considérable de composants électroniques en fin de vie, appelés déchets électroniques […]. On estime qu'environ 42 millions de tonnes (Mt) de déchets électroniques sont générés à l'échelle mondiale par an (Balde et al., 2015) » (Awasthi, Zeng, & Li, 2016). De plus, le secteur des déchets électroniques est parlant sur la question du secteur informel : environ« 80% des déchets électroniques des pays développés sont exportés illégalement vers les pays en développement, notamment la Chine, l'Inde, le Nigéria, le Ghana et le Pakistan, en raison des coûts de main-d'œuvre inférieurs et des réglementations gouvernementales (Sthiannopkao et Wong, 2013, PNUE, 2005). Selon le rapport de Rajya Sabha (2011), presque tous les déchets électroniques en Inde sont collectés et recyclés dans le secteur informel, ce qui a entraîné de graves problèmes environnementaux » (Awasthi et al., 2016). Or, dans le secteur informel la plupart des déchets électroniques sont brûlés à ciel ouvert et mis dans « des bains acides, avec la récupération de seulement quelques matériaux de valeur» (Awasthi et al., 2016). Ces procédés ont un impact sanitaire comme nous le verrons après. Le rejet des eaux usées en provenance de ces bains acides conduit une acidification des eaux qui contribue à la pollution aux métaux lourds : « l'eau à proximité [des sites de traitement informel des déchets électroniques] est contaminée par des métaux lourds en raison de différentes activités d'acidification » (Awasthi et al., 2016). Le procédé d'acidification provoque également la lixiviation de différents polluants tels que les PBDE » (Awasthi et al., 2016) ou Polybromodiphényléthers.

Le recyclage des métaux est une activité à l'origine de « nombreux impacts sanitaires allant de toux de courte durée à la mort prématurée» (Worrell & Reuter, 2014, Chapitre 31). Ces impacts sanitaires sont différents en fonction des produits recyclés, des procédés utilisés et bien sûr du secteur étudié (formel ou informel). Concernant le recyclage des déchets électroniques en Inde, l'impact « sur l'environnement lors du recyclage des déchets électroniques a été étudié et les métaux ainsi que d'autres polluants (c'est-à-dire les Polybromodiphényléthers (PBDE), les polychlorobiphényles (PCB)] ont été trouvés en quantités excessives dans le sol, l'eau et d'autres habitats. […les] processus [utilisés pour le recyclage] libèrent des dioxines, des furannes et des métaux lourds qui sont nocifs pour l'environnement, les travailleurs engagés et les résidents habitant à proximité des sites. […] Il a été confirmé que les contaminants se propagent dans la chaîne alimentaire […], menaçant ainsi la santé humaine » (Awasthi et al., 2016). En effet les déchets électroniques présentent « un taux élevé de métaux lourds, tels que le plomb et le cadmium dans les circuits imprimés, le cadmium dans les batteries, et le cuivre dans les câbles électriques » (Awasthi et al., 2016). Or « de grandes quantités de ces métaux de valeur restent après l'élimination des produits électroniques » (Awasthi et al., 2016). Les substances dangereuses contenues dans les déchets électroniques peuvent être résumées à la liste suivante : Cd, Cr, Pb, Hg, les chlorofluorocarbures, le PCB, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les PBDE, les dioxines, les retardateurs de flamme bromé (Awasthi et al., 2016). Les études d'impact environnementales montrent que les sols autour de ces exploitations sont contaminés lourdement par les HAP, qui sont des substances cancérigènes, mutagènes et toxiques (Abdel-Shafy & Mansour, 2016) dans des zones fortement peuplé, laissant entrevoir un haut risque (Awasthi et al., 2016). Pour prendre un deuxième exemple, le recyclage des batteries plomb-acide était considéré en 2012 comme l'industrie la plus polluante du monde par le Blacksmith Institute, toujours selon l'étude de 2012 (Mills-Knapp et al., 2012). « La quantité de plomb et la nature hautement toxique de l'élément en font le principal polluant dans les sites de recyclage de batteries polluées. Les autres polluants comprennent l'arsenic et le cadmium. Le plomb cause de nombreux problèmes de santé et affecte de manière disproportionnée les enfants, causant des problèmes développementaux et neurologiques» aussi appelé saturnisme (Mills-Knapp et al., 2012). En effet, le recyclage des batteries n'échappe pas à la tendance évoquée ci-avant d'exportation des déchets dangereux depuis les pays développés vers les pays pauvres et en développement. Ainsi, d'après la base de données COMTRADE des Nations Unies proposant des statistiques sur le commerce mondial des produits de base, la Chine importait en 2015 48,9 kt de batteries depuis l'Allemagne, 820 t depuis l'Italie et 0,9 t depuis la France. Ce qui laisse penser qu'une partie des batteries européennes transite par l'Allemagne, puisque par exemple il est estimé au

niveau français qu'environ 7 000 tonnes de plomb sont perdues chaque année lors du recyclage (car le taux de traitement déclaré par la filière n'est que de 83%) et que le devenir de ces pertes n'est pas clair (Brignon, 2015). Or, dans les pays en développement en « raison des processus de recyclage dépassés […], de grandes quantités de poussières de plomb, de vapeurs et de déchets dangereux sont déversées, ce qui nuit gravement à la santé publique.»(Tian et al., 2017). La Chine est le premier producteur mondial de plomb, que ce soit en production primaire (Jewell & Kimball, 2017) ou secondaire (International Lead Association, 2012). Or en Chine, 50% des batteries au plomb-acide sont récupérées et recyclées par des petites entreprises non réglementées (Van der Kuijp, Huang, & Cherry, 2013), et le «*four* à réverbère, processus le plus polluant, domine toujours la production des usines de recyclage illégales en Chine» (Tian et al., 2017). La plupart des installations sont émettrices de vapeurs de plomb dans l'atmosphère qui finissent par contaminer les sols de manière persistante. Les eaux usées produites pendant le processus de lavage peuvent également contenir beaucoup de métaux lourds et ne sont traitées que dans les grandes entreprises, les petits recycleurs déchargeant souvent les eaux usées toxiques directement dans l'environnement, contaminant ainsi les sources d'eau locales. Chez ces derniers, les taux de perte de plomb dans le processus de retraitement peuvent aller jusqu'à 50% de la teneur en plomb de la batterie. La production et le recyclage des batteries plomb-acide constituent ainsi la principale source de contamination au plomb dans le pays, les taux moyens chez les enfants vivant près des usines étant quatre fois supérieurs aux normes de l'OMS(Van der Kuijp et al., 2013). Enfin, si les impacts sanitaires actuels du recyclage dans les pays développés n'ont pas de commune mesure avec le secteur informel des pays en développement, il convient de rappeler que la pollution historique est toujours présente. Ainsi, les sites actuellement actifs de recyclage de batteries au plomb en France comme la STCM n'ont pas d'impacts sanitaires avérés (dépistage au plomb des personnes vivant près de l'usine effectué par l'Agence Nationale de Santé en 2015), en revanche certaines pollutions historiques ont eu et ont toujours des impacts sanitaires. Ainsi, les campagnes de dépistages menées autour de l'ancienne usine Metaleurop à Noyelles-Godault révélaient qu'environ 10% des enfants des 5 communes riveraines du site présentaient des taux de plombémies supérieurs à la norme en vigueur en 2003, plombémie pouvant provoquer le saturnisme. Depuis l'arrêt de l'usine, ce taux est retombé à 2-3%.(Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2016). Concernant l'impact du recyclage quant à la production de produits radioactifs, il sera uniquement souligné ici que le besoin de contrôler les ferrailles en termes de radioactivité a été reconnu depuis 1983 lorsque des sources radioactives ont été fondues dans une aciérie à Juarez au Mexique et à Auburn Steel à New York, Etats-Unis. Depuis des systèmes de plus en plus sophistiqués ont été développés (United Nations, Economic Commission for Europe, 2002). Enfin, concernant la question sanitaire, il faut se rappeler que l'industrie minière crée un risque sanitaire à partir de matériaux généralement ne présentant pas de risques (voir les explications sur le caractère anthropogénique de la pollution minière). Or le recyclage est une alternative à la mise en décharge de produits en fin de vie contenant déjà des métaux lourds et produits chimiques potentiellement polluants. S'il est nécessaire d'améliorer les conditions de travail, sanitaires et environnementales du recyclage aujourd'hui, l'arrêt du recyclage ne garantit pas l'arrêt de la pollution issue des produits en fin de vie contenant des métaux.

Le principal enjeu social au niveau mondial lié à la question du recyclage est la question du secteur informel. Concernant le recyclage des déchets des estimations anciennes évaluait à 2% la population des pays en développement qui survivait grâce à la récupération de matériaux depuis les déchets » (Bartone, 1988 in Worrell & Reuter, 2014, Chapitre 29). Le secteur informel, comme pour la mine, est donc générateur de conditions de travail particulièrement dangereuses comme nous l'avons vu avec les impacts sanitaires, mais également particulièrement précaires. Il existe de plus une marginalisation de ces travailleurs :« fondée sur un lien fait communément entre la saleté et les déchets, les individus travaillant dans la gestion informelle des déchets se voient souvent attribuer le statut social le plus bas de la société » (Worrell & Reuter, 2014, Chapitre 29).

Nous avons donc vu dans ce point 3.2.1 que le secteur minier et métallique contribuait largement au changement climatique (9,5% de la CED (Nuss & Eckelman, 2014)), et présentait des enjeux importants en termes d'acidification à travers les dépôts acides et le drainage minier acide, d'impacts sanitaires à travers la diffusion de métaux lourds et de radionucléides, et enfin d'impacts sociaux concernant les conditions de travail, le développement du secteur informel, le changement d'usage des terres ou empreinte minière, et la répression des conflits sociaux. Il a été vu également que le recyclage présente un net avantage par rapport à la production primaire sur le plan environnemental en ce qui concerne l'impact sur le changement climatique, particulièrement pour les grands métaux industriels. Concernant les impacts sanitaires et sociaux, il existe des points communs avec le secteur minier (contaminations aux métaux lourds, travail précaire) qui se concentrent dans le secteur informel des pays en développement. Cependant, la part de du secteur informel ne semble pas négligeable dans la production mondiale de métaux secondaires, en particulier pour les petits métaux dont le recyclage dans le secteur formel est coûteux énergétiquement. Mais également pour certains grands métaux industriels comme le plomb.

3.2.2. Les liens entre les impacts de l'exploitation des ressources métalliques et l'épuisement physique des ressources

Nous avons vu au paragraphe précédent que l'exploitation des ressources métalliques générait de nombreux impacts négatifs parmi lesquels : le changement climatique, l'acidification, les principaux enjeux sanitaires, et les principaux enjeux sociaux (conditions de travail, secteur informel, changement d'usage des terres ou empreinte minière, et gestion parfois violente des conflits sociaux). Il s'agira dans ce paragraphe d'expliquer en quoi ces impacts sont liés au phénomène de déplétion des ressources métalliques, pris comme un phénomène continu, caractérisé par une diminution des teneurs des ressources primaires, une complexification des ressources secondaires, et des pertes de matière tout au long du processus de production.

Il a été vu au paragraphe 2.4 que l'épuisement physique des ressources métalliques se caractérisait par une diminution des teneurs au fur et à mesure de l'exploitation. Il s'agit ici de s'intéresser au lien entre cette diminution des teneurs et les enjeux évoqués au paragraphe précédent. Ainsi, l'impact en termes de changement climatique est-il renforcé par la diminution des teneurs. En effet, un gisement de faible teneur nécessitera une utilisation plus importante d'énergie pour produire la même quantité de métal qu'un gisement plus riche, et donc produira plus d'émissions de gaz à effet de serre comme le montre les tendances historiques étudiées à travers les données minières par Mudd (voir l'exemple de la Figure 20 pour l'or) et les modélisations en termes d'impacts environnementaux (notamment par ACV) par Norgate, Memary et Prior (pour l'or in G. M. Mudd, 2007b; pour l'or Gavin M. Mudd, 2007; pour le cuivre, les mines, plomb–zinc–argent, le nickel en Australie G. M. Mudd, 2007a; pour le nickel Kemp & Wiseman, 2004; pour le nickel Gavin M. Mudd, 2010; pour l'or Terry Norgate & Haque, 2012; Prior et al., 2012; Giurco, McLellan, Franks, Nansai, & Prior, 2014; pour le cuivre Memary, Giurco, Mudd, & Mason, 2012).

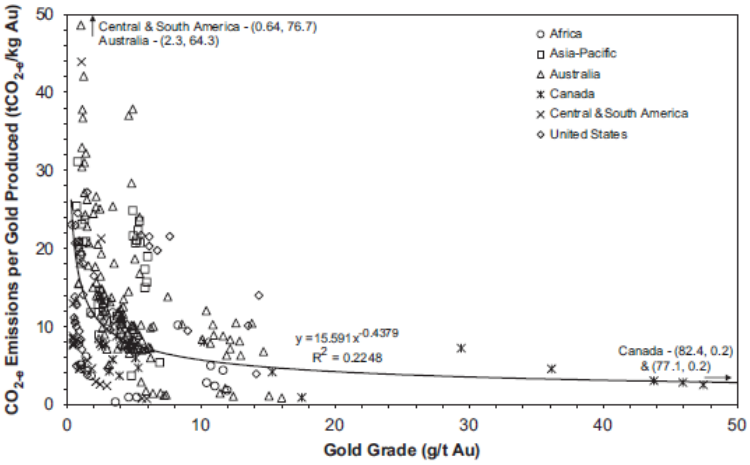


Figure 20 : Émissions de gaz à effet de serre en tonnes de CO_2 eq pour chaque kilogramme d'or produit en fonction de la teneur (en g/t ou ppm). Source : Mudd, 2007b

Ainsi Norgate affirme-t-il que « la demande croissante de métaux primaires, ainsi que la baisse des teneurs en minerai et des corps minéralisés plus complexes, peuvent conduire à une augmentation de la consommation énergétique mondiale et des émissions de gaz à effet de serre provenant de la production primaire de métaux (en particulier dans les phases d'extraction minière et de traitement des minéraux) » (T. Norgate & Haque, 2010). Cette augmentation de l'énergie nécessaire revêt un caractère quasi automatique : en effet plus la teneur est faible plus le minerai doit être extrait en quantité importante pour un même produit, et plus le broyage devra être fin (Mwale et al., 2005 in G. M. Mudd, 2007c). De même, le passage à une ressource de moindre qualité, les « gisements à venir [… étant] probablement des formes beaucoup plus réfractaires, [… contenant] plus d'impuretés, seront plus profonds et nécessiteront un broyage plus fin (UNEP, 2013). Tous ces obstacles accentuent la relation inverse […] entre l'énergie et épuisement des métaux » (Fizaine, 2014, p. 296). C'est le cas par exemple, dans l'exploitation du Nickel où la part de latérites grandit par rapport à la part de minerai sulfuré, peut entraîner une augmentation de l'énergie utilisée et de l'émission de gaz à effet de serre, effet qui vient se cumuler avec la baisse des teneurs (Gavin M. Mudd, 2010). La diminution de ces teneurs et l'augmentation subséquente de l'énergie nécessaire à l'exploitation des petits métaux pourraient poser des problèmes sur le plan d'une transition énergétique vers les énergies renouvelables. En effet, l'indicateur *Energy Return On Investment* (EROI) illustre la quantité d'énergie obtenue pour une unité d'énergie investie dans le cadre de l'exploitation de matières premières énergétiques. Dès 1986, Hall notait que l'EROI allait décroitre avec la diminution de la production prévue par Hubbert, c'est-à-dire avec la dégradation des conditions de production (Martinez-Alier et al., 2010). Les séries de données longues concernant l'EROI indiquent que celui-ci ne cesse de diminuer pour le pétrole (depuis les années 2000) et le gaz naturel (depuis les années 1950), seul le charbon ne diminue pas jusqu'à présent (Fizaine & others, 2015). Ces études sont menées sur des ressources fossiles, par rapport à leur utilisation en tant que source d'énergie. Les études menées sur l'EROI des énergies renouvelables utilisant des matières premières minérales, et notamment des métaux, font état d'un EROI bien plus faible que celui des ressources hydrocarbures (Fizaine & others, 2015). Il n'existe pas encore d'études sur l'impact de la diminution des teneurs dans l'exploitation des métaux sur l'EROI des énergies renouvelables, mais il ne fait pas de doute que cet impact est négatif.

La diminution des teneurs entraîne une augmentation du volume de déchets miniers produits (pour l'or Gavin M. Mudd, 2007; pour le cuivre, les mines, plomb–zinc–argent, le nickel en Australie G. M. Mudd, 2007a; pour l'or Terry Norgate & Haque, 2012; Prior et al., 2012). En effet lorsque la teneur est plus faible la quantité de roche extraite doit être plus élevée pour produire une même quantité de métal, créant plus de stériles de sélectivité (Tableau 7). De plus, pour exploiter ces gisements d'une

teneur de plus en plus faible, la part des mines exploitées à ciel ouvert grandit (Pokhrel & Dubey, 2013; West, 2011 in Prior et al., 2012). Or, cette technique d'exploitation est moins sélective, c'est-à-dire qu'elle cible moins précisément les zones riches du gisement, créant donc d'autant plus de stériles de sélectivité. L'exemple de l'exploitation de l'or en Australie illustre bien cet effet : la Figure 21 montre que la baisse de teneur des gisements exploités est une tendance de long terme qui précède l'apparition des mines à ciel ouvert dans les années 1980 (Figure 22, figuré de croix). Le passage aux teneurs très basses et aux mines à ciel ouvert s'accompagne d'une forte augmentation des déchets miniers (Figure 22, figuré de losanges).

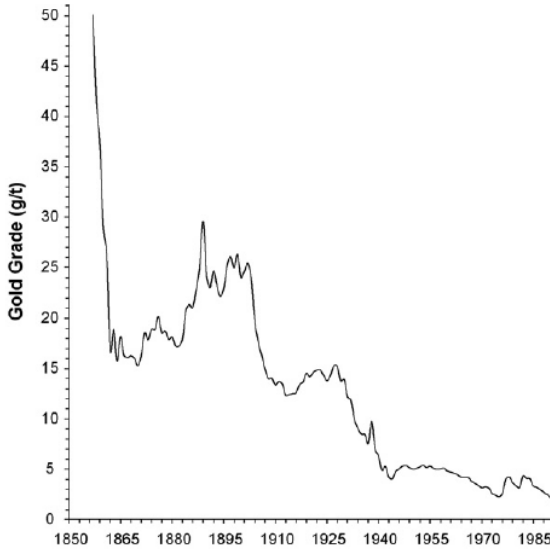


Figure 21 : Teneur moyenne des minerais d'or extraits en Australie des gisements en roche (*hard rock* mining) au cours du temps. Source : Mudd, 2007

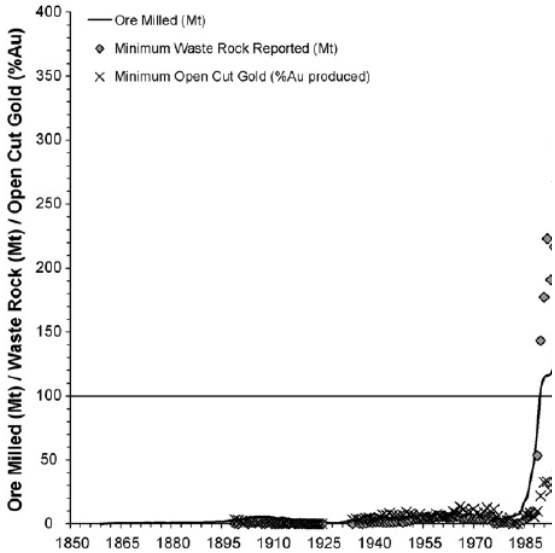


Figure 22 : Production australienne de minerai d'or broyé (*ore milled*), déchets miniers reportés à minima (minimum Waste Rock Reported) et part de la production nationale provenant des mines à ciel ouvert à minima (*minimum open cut gold*). Source : Mudd, 2007

Cette augmentation des déchets entraîne à son tour une augmentation de certains impacts liés à la production de métaux. En effet, les déchets miniers (stériles et résidus) et métallurgiques sont un élément clef de l'émergence d'impacts environnementaux, sanitaires et sociaux, car ils constituent un vecteur d'autres impacts : l'acidification due au drainage minier acide, les enjeux liés aux métaux lourds et radionucléides. Ainsi, nous avons vus dans le point 3.2.1 que les déchets constituaient une source de DMA lorsqu'ils contenaient des sulfures, augmenter les déchets c'est donc augmenter les phénomènes d'acidification (Martinez-Alier & Walter, 2016). Nous avons également vu que la diffusion de métaux lourds ou des radionucléides dans l'environnement se faisait notamment via les déchets miniers et métallurgiques. Cette diffusion peut se faire via le stockage, les fuites, le déversement volontaire et les accidents impliquant des déchets. Ces accidents n'étant malheureusement pas rares comme nous l'avons vu avec l'exemple des ruptures de digue. Ainsi, l'augmentation des déchets miniers augmente les impacts du secteur minier en termes d'acidification et d'impacts sanitaires. Enfin, au-delà des impacts évoqués dans le point 3.2.1, les déchets miniers sont à l'origine de divers impacts sur les écosystèmes : impacts directs paysagers, peuvent contribuer de manière importante à l'érosion ou au comblement des cours d'eau et des fonds marins (par l'élimination sous-marine des déchets miniers, en anglais *submarine tailings disposal*), mettant en danger la vie sous-marine (Pokhrel & Dubey, 2013).

Concernant les impacts sociaux, le principal enjeu directement en lien avec la baisse des teneurs est l'usage des terres. En effet, nous avons vu que la baisse des teneurs provoquait l'augmentation de

la production de déchets miniers et donc d'avantage de stockage des déchets, que ce soit via des verses à stériles ou des bassins de résidus. Cela augmente donc directement l'emprise des terrains impactés (Sonter et al., 2014). De plus la baisse des teneurs conduit également à augmenter la taille des mines, et à les exploiter en mines à ciel ouvert ce qui crée une emprise minière beaucoup plus importante (Prior et al., 2012; Sonter et al., 2014). Enfin, l'utilisation de l'eau pour l'exploitation augmente avec la baisse des teneurs, car plus la mine est à grande échelle plus le pompage des eaux d'exhaure augmente. De plus, moins le minerai est concentré, plus l'utilisation d'intrants, et donc d'eau dans le cas de l'hydrométallurgie est importante (Martinez-Alier & Walter, 2016; Prior et al., 2012). Ces trois facteurs peuvent exacerber les conflits liés à l'usage des terres et de l'eau avec la population locale. Ainsi, Prior et al. soulignent-t-il que l'expansion minière dans certaines régions d'Australie a augmenté les conflits avec les communautés locales (Prior et al., 2012). De même, si les études sur les conflits socio-environnementaux (Martinez-Alier et al., 2010; Vallejo, 2010; Vallejo et al., 2011) évoquées au point 3.2.1 n'explicitent pas le lien entre diminution de la qualité des gisements et augmentation des conflits, il convient de noter que ces études établissent un lien de causalité entre impacts environnementaux et impacts sociaux. En ce sens, la diminution des teneurs contribueraient à l'apparition de conflits socio-environnementaux.

Pour le reste des enjeux sociaux, c'est-à-dire concernant les conditions de travail et le secteur informel, il est difficile de dégager à l'échelle mondiale comment la baisse de teneurs affectent ces enjeux, et les effets auront tendance à dépendre du contexte local. Les travailleurs peuvent être affectés à travers l'augmentation des coûts de la production, à laquelle nous nous intéresserons dans le chapitre 2.

Il a été vu au paragraphe 2.4 que l'épuisement physique des ressources métalliques se caractérisait par une complexification des produits en fin de vie pouvant être utilisé pour le recyclage : miniaturisation, dispersion, alliage, conception de produits non aisément démontables, utilisation d'un nombre croissant de métaux différents. Il s'agit de se poser la question de l'impact de cette complexification sur les enjeux sociaux, environnementaux et sanitaires liés au recyclage. Or, le point 3.2.1 a montré que le secteur informel se développait pour les petits métaux du fait de son moindre coût par rapport au recyclage formel, avec les conséquences que nous avons évoquées précédemment. L'accélération de la baisse de qualité des matériaux recyclés augmente l'énergie requise nécessaire pour récupérer ces métaux dans des bonnes conditions, augmentant ainsi l'impact sur le changement climatique et rendant coûteux le recyclage de ces métaux dans le secteur formel. L'hypothèse peut donc être faite que l'augmentation de la production de produits en fin de vie de « mauvaise qualité » d'un point de vue de leur recyclabilité, augmente la probabilité de leur récupération par un secteur informel moins coûteux et dont les impacts sanitaires et sociaux sont importants.

Après avoir passé en revue les études expérimentales et théoriques permettant de faire l'hypothèse d'un accroissement des impacts environnementaux, sanitaires et sociaux liés à la diminution des teneurs, il devient possible d'affirmer que tout processus augmentant la baisse des teneurs accroît indirectement les pressions environnementales sociales et sanitaires liées à la production des métaux. Or, la complexification des ressources secondaires et plus généralement les pertes de matière tout au long du processus de production, augmentent artificiellement les besoins en ressources métalliques (figuré par une boucle de rétroaction entre pertes de matière et exploitation Figure 23) et participent de l'épuisement plus rapide des gisements primaires. Les pertes de matières viennent donc indirectement renforcer les impacts environnementaux, sanitaires et sociaux.

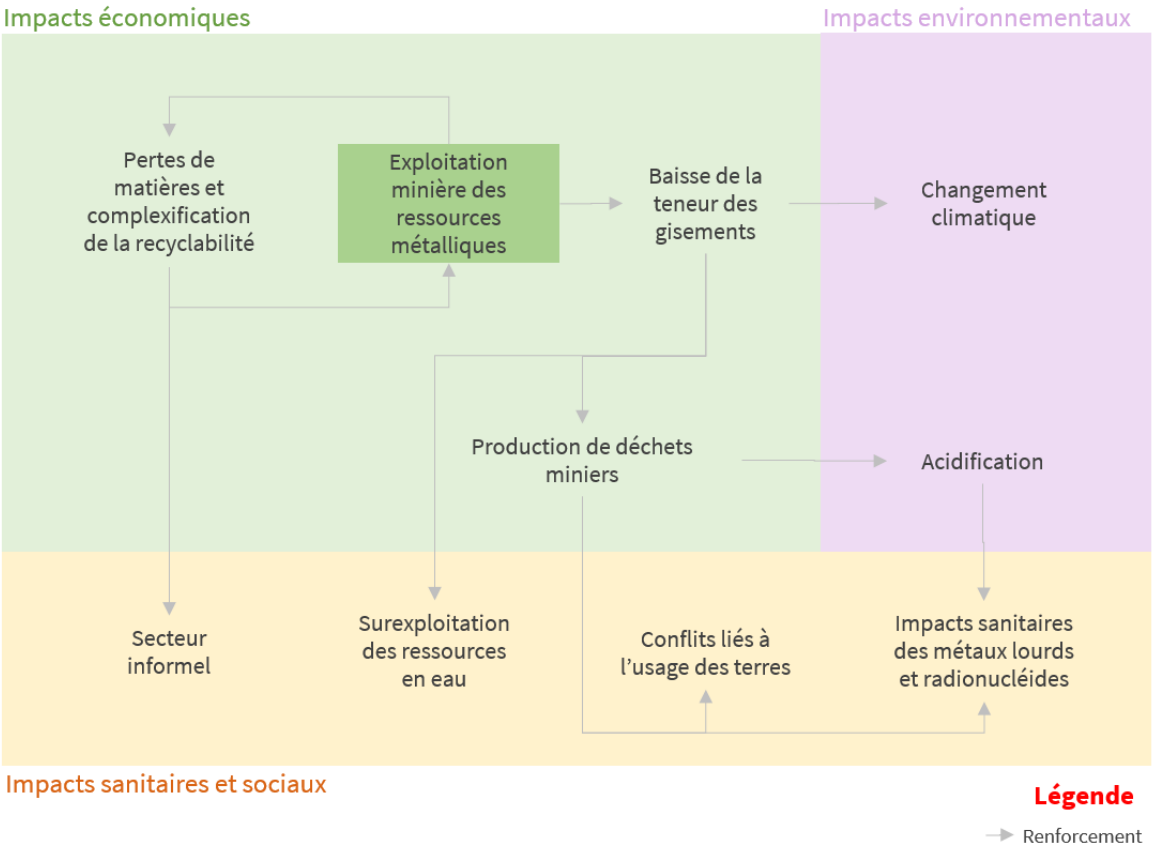


Figure 23 : Augmentation des impacts négatifs des systèmes miniers en raison de l'épuisement des ressources. Source : autrice

Ce paragraphe 3.2.2 permet de développer l'hypothèse selon laquelle les impacts négatifs environnementaux, sanitaires et sociaux peuvent être liés au phénomène de l'épuisement physique, comme cela est résumé par la Figure 23. Ainsi, la baisse de teneur a-t-elle un impact principalement à travers l'augmentation des déchets miniers et l'augmentation de l'apport énergétique nécessaire à la production, et la complexification des produits en fin de vie impacte-t-elle le développement d'un secteur informel. Plusieurs auteurs soulignent ce phénomène d'augmentations des impacts avec l'épuisement des ressources physiques pour questionner le fait de se concentrer uniquement sur l'épuisement des stocks (Martinez-Alier & Walter, 2016; Gavin M. Mudd & Jowitt, 2018; Prior et al., 2012; Tilton, 2003). C'est notamment le cas de la réédition du rapport Meadows (Meadows et al., 2004). En effet, si le premier rapport se concentrait sur la question de l'épuisement physique des ressources (voir point 1.4) et évoquait le report des coûts économiques de la déplétion du présent vers le futur, la réédition du rapport s'interroge sur les coûts sociaux et environnementaux grandissant de l'exploitation des ressources minérales et sur l'atteinte aux limites environnementales de planète conduisant à une dégradation irréversible de la sphère biophysique (Meadows et al., 2004). Cependant le rapport, souligne que les coûts économiques associés à cette atteinte des limites de la planète font l'objet de peu d'évaluation et qu'il est donc difficile de se prononcer sur la menace que constitue le dépassement de ces limites sur la disponibilité économique des ressources minérales. Cependant, si ces enjeux sont considérés dans une perspective de soutenabilité forte telle que présentée au 3.1.1, c'est-à-dire dans une volonté de conservation de la sphère biophysique sur laquelle repose les activités humaines, ce sont moins les impacts sur la disponibilité économique qui importent que l'existence des coûts sociaux et environnementaux eux-mêmes.

3.2.3. Redéfinition du concept d'épuisement

Il a été vu dans le paragraphe 1 que l'ENC répondait aux craintes soulevées quant à la stagnation ou la diminution de la production et définissait la question de l'épuisement comme une problématique d'efficience, l'objectif étant de maximiser dans le temps la valeur créée par l'exploitation de la ressource. Les mécanismes mis en avant par les économistes néo-hotelliniens pour atténuer la pénurie économique afin d'avoir une période de croissance la plus longue possible sont alors une meilleure allocation dans le temps des ressources, la substitution des ressources, substitution entre ressources et capital, le progrès technologique permettant une utilisation/exploitation plus efficientes des ressources, etc. Cependant, le paragraphe 3.1 a montré que selon l'économie écologique l'irréversibilité de l'épuisement physique des ressources, et le fait que la substituabilité ne puisse jouer qu'un rôle marginal comme solution à l'épuisement physique rendait en partie caduc ces mécanismes, mais surtout questionnait l'intérêt de définir l'épuisement des ressources comme un problème de maximisation de la valeur issue de l'exploitation des ressources. Les constats dressés dans le point 3.2.1 quant aux impacts sociaux, sanitaires et environnementaux liés à l'exploitation des ressources métalliques montrent que l'augmentation de la production (exposée dans le point 2.3) donne lieu à une augmentation absolue des impacts. Le point 3.2.2 a montré que l'épuisement physique venait renforcer la part de ces impacts au fur et à mesure de l'exploitation des ressources métalliques. Dans ces conditions, la dégradation irréversible des sphères biophysique et sociale s'amplifie de manière absolue et relative avec l'exploitation des ressources métalliques et vient questionner la pertinence de la maximisation de la valeur économique de l'exploitation comme indicateur de soutenabilité du modèle dans une perspective de soutenabilité forte. Il est donc proposé de redéfinir l'épuisement afin de saisir ces dimensions environnementales, sanitaires et sociales dans une perspective de soutenabilité forte.

C'est par la diminution de la disponibilité physique du fait des pertes de matière tout au long de la chaine de valeur et par la mise en exploitation de gisements de moindre qualité que se traduit la déplétion physique. Ceci se traduit en retour par une augmentation des impacts sociaux sanitaires et environnementaux du fait de la baisse de la teneur et de la qualité des gisements des métaux.

Il est donc proposer de redéfinir l'épuisement dans une perspective de soutenabilité forte comme 2 phénomènes conjoints, continus et irréversibles : perte de quantité (perte de matière tout au long de la filière) et de qualité (diminution des teneurs du gisement et difficultés du recyclage) de la ressource au fur et à mesure de son utilisation dans notre économie d'une part ; et comme un démultiplicateur d'impacts environnementaux, sanitaires et sociaux des filières de matières premières minérales d'autre part.

Défini comme tel, l'épuisement est fortement influencé par l'organisation des filières et par la recherche de la maximisation de la valeur économique de l'exploitation des ressources. C'est pourquoi l'évaluation de l'épuisement des métaux (les pertes de quantité et qualité et l'augmentation des impacts associés à la production de biens de consommation) doit se faire au niveau des filières pour pouvoir être minimisé dans nos choix de modèles de production et de consommation. Il s'agit donc de mettre en regard de la maximisation de la valeur de l'exploitation des ressources métalliques, une évaluation des coûts sociaux et environnementaux qui lui sont associés, et de déceler les mécanismes générant l'apparition de ces coûts.

Conclusion du chapitre 1

Ce chapitre a montré que la définition de l'épuisement des ressources était une clef de compréhension du débat entre tenants du rapport Meadows (Meadows et al., 1972) et économistes néoclassiques. En effet, les économistes néoclassiques distinguent la rareté physique augmentant inéluctablement, et la pénurie économique, et s'intéressent à cette dernière qui peut être atténuée. Ils définissent alors la question de l'épuisement comme une problématique d'efficience, l'objectif étant de maximiser dans le temps la valeur créée par l'exploitation de la ressource. Dans la

perspective de l'économie écologique, cette conception s'oppose à l'idée de la conservation des ressources naturelles. Ainsi, les économistes écologiques rejettent les modèles néoclassiques conçus dans un cadre où les moments du temps sont considérés comme équivalents comme n'étant pas capable de traduire les irréversibilités liées au phénomène de déplétion des ressources. La non-substituabilité des ressources par des capitaux produits par l'homme est affirmée et devient un critère de durabilité définissant un projet de « soutenabilité forte » par opposition à la soutenabilité des modèles de croissance des néo-hotelliniens considérée comme « faible ». Dans ce débat la thèse s'intéresse particulièrement à l'épuisement physique des ressources métalliques, pour lesquelles il a été montré d'une part que ces irréversibilités se traduisent continuellement par une diminution des teneurs des ressources primaires, une complexification des ressources secondaires, et des pertes de matière tout au long du processus de production, et d'autre part que la substitution des ressources non renouvelables par d'autre ressources dans le processus de production ne se vérifie pas historiquement.

De plus, ce chapitre apporte une assertion nouvelle : il semble que l'épuisement physique des ressources métalliques constitue un facteur augmentant les impacts environnementaux, sociaux et sanitaires de la production des ressources métalliques. Aborder la question de la soutenabilité de la production et de la consommation des ressources métalliques ne se traduit donc plus uniquement par la question de l'accès aux ressources des générations futures, mais également par la question du maintien de conditions de vie considérées comme acceptable par les sociétés. Cette hypothèse, étayée par la documentation des enjeux liés aux ressources métalliques, va donc dans le sens de la réédition du rapport du club de Rome de 2004 (Meadows et al., 2004) qui affirme que les dommages irréversibles causés aux limites planétaires et l'incapacité de l'économie réelle à supporter les coûts sociaux et environnementaux croissants de l'extraction des ressources constituent un problème au moins aussi important. Cette affirmation remet donc la question des coûts croissants de l'exploitation des ressources, qui avait été écartée dans le débat économique sur les ressources par les économistes néoclassiques après Jevons, au cœur du débat sur la soutenabilité de notre modèle.

Dans une perspective de soutenabilité forte dans laquelle s'ancre la thèse, il s'agit donc d'adopter une évaluation économique de l'épuisement des ressources qui puisse prendre en compte la question de l'interaction entre sphère économique, sociale et biophysique. Or, il existe aujourd'hui peu d'évaluations quantitatives et qualitatives sur lesquelles s'appuyer pour étayer ou rejeter l'importance des dommages liés à l'épuisement des ressources métalliques et aux coûts pour la société de ces activités économiques. C'est pourquoi le chapitre 2 s'intéresse à la question des coûts sociaux et environnementaux des activités économiques afin de pouvoir développer une approche en soutenabilité forte des coûts de l'épuisement des ressources métalliques.

CHAPITRE 2 : DÉFINITION DU COUT SOCIAL DE L'ÉPUISEMENT ET CADRE MÉTHODOLOGIQUE POUR SON ÉVALUATION

Introduction chapitre 2

L'épuisement a été défini dans le chapitre 1 comme deux phénomènes conjoints, continus et irréversibles que sont d'une part les pertes de quantité (pertes de matière tout au long de la filière) et de qualité (diminution des teneurs du gisement et difficultés du recyclage) de la ressource au fur et à mesure de son utilisation dans notre économie d'une part et d'autre part la démultiplication des impacts environnementaux, sanitaires et sociaux des filières de matières premières minérales.

Ce chapitre a pour objectif de proposer un cadre pour l'évaluation économique de l'épuisement des ressources qui puisse prendre en compte la question de l'interaction entre sphère économique, sociale et biophysique.

Dans un premier temps, les approches existantes pour évaluer monétairement l'épuisement sont synthétisées. Il s'agit d'étudier si les méthodes existantes peuvent contribuer à une évaluation de l'épuisement tel que défini au chapitre 1. Cette section permet de formuler la question de recherche suivante : comment évaluer les coûts liés à l'épuisement physique des ressources métalliques dans une approche de soutenabilité forte ? Comment définir ces coûts et évaluer leur prise en charge ?

Dans un deuxième temps, en l'absence de prise en compte des coûts liés aux impacts sociaux et environnementaux dans les méthodes économiques s'intéressant à l'épuisement, une présentation du concept d'externalité est réalisée. Cette section passe en revue la prise en compte des impacts environnementaux et sociaux de la production par l'ENC à travers la notion d'externalité.

Dans un troisième temps, le concept de coût social formulé par Kapp (W. Kapp, 1963) est présenté comme un cadre conceptuel adapté à l'évaluation de l'épuisement tel que défini dans le chapitre 1. Une définition du concept de coût social est donnée, et l'attachement de la démarche de Kapp à interroger les causes de l'apparition de ces coûts et à analyser les effets des systèmes institutionnels sur ces coûts sociaux à travers le concept de causalité circulaire cumulative (CCC), est souligné. Cette partie montre ensuite comment ce concept de coût social prend en compte la question de l'épuisement physique des ressources non renouvelables et des coûts sociaux et environnementaux.

Dans un quatrième temps, les effets de filières mondialisées sur la capacité des acteurs à externaliser les coûts sont soulignés et il est proposé pour mettre en lumière ces effets de prendre pour objet d'étude les chaînes globales de valeur plutôt que les entreprises extractives.

Enfin, la définition des coûts sociaux de l'épuisement des ressources métalliques est précisée en prenant pour base conceptuelle les travaux de Karl William Kapp, et en la complétant par l'approche de l'épuisement définie au chapitre 1. Sur la base de cette définition, des propositions pour une méthode intégrée de l'évaluation de ces coûts sont formulées. Ces propositions concernent les principales étapes à suivre, les critères pour l'utilisation ou le rejet de méthodes d'évaluation monétaires des impacts des activités économiques, l'identification de mécanismes générateurs de ces impacts à travers l'analyse des chaînes globales de valeur, et enfin la mobilisation des travaux de Kapp pour l'étude des chaînes de causalité circulaire cumulative.

1. Approches existantes pour évaluer le coût de l'épuisement

Dans cette première partie, la revue des différentes évaluations des coûts liés à l'épuisement est réalisée. Cette revue de la littérature est mise en perspective par rapport aux différentes approches de l'épuisement étudiées dans le chapitre 1 et à la correspondance des évaluations à la définition de l'épuisement établie par l'autrice. Cette revue a été réalisée à partir de la compilation de revues déjà existantes (Naeem Adibi, Lafhaj, & Payet, 2018; Gérand et al., 2018; Yellishetty, Haque, & Dubreuil, 2012) et d'articles complémentaires (Cleveland & Stern, 1998; da Motta, 1994). Cette revue est synthétisée dans le Tableau 14. Il est à noter que la liste des auteurs n'est pas exhaustive, l'objectif de cette revue étant de souligner la continuité qui existe entre les méthodes de calculs de l'épuisement et les différences de définition du problème de l'épuisement présentées au chapitre 1.

1.1.Approches par le prix

La plupart des études réalisées historiquement sur cette question s'intéressent à l'évolution dans le temps des coûts de production des ressources non renouvelables, et ce afin de confirmer ou de rejeter l'hypothèse des classiques des rendements décroissants. Il s'agit pour la plupart des auteurs de distinguer si l'évolution des coûts de production est majoritairement influencée par l'augmentation de la productivité (liée au progrès technologique et considérée comme spontanée) qui provoquerait une baisse des coûts de production, ou par la diminution de la qualité au fur et à mesure de l'épuisement de la ressource. Ce débat est central en économie dans la prise en compte des problématiques d'épuisement comme cela a été vu au chapitre 1.

Dans ce paragraphe sont présentées brièvement les approches qui abordent les questions d'épuisement à travers la notion de rareté et qui sont dans la droite ligne d'une conception hotellinienne de ce phénomène.

1.1.1. Coût de dépréciation, approche par les bénéfices nets ou rente hotellinienne

Dans cette approche, le coût lié à la « dépréciation » (da Motta, 1994) de la ressource est équivalent au concept de rente chez Hotelling. Le coût d'exploiter une ressource épuisable est donc la rente de rareté tirée par le producteur de l'exploitation de la ressource. Comme vu au chapitre 1, il est considéré dans ce cadre que les exploitants de la ressource peuvent fixer le prix de la ressource, afin d'accumuler une rente de rareté qui, une fois placée sur les marchés financiers, leur permettra de dégager un revenu régulier et de financer les investissements nécessaires au développement de produits de substitution. Dans cette approche, le prix est donc un bon indicateur de la rareté de la ressource (Lyon, 1981; Sedjo and Lyon, 1990; Slade, 1982; Farzin,1992,1995 in Cleveland & Stern, 1998; Fisher, 1979; Hartwick, 1977; Hotelling, 1931; Ozdemiroglu, 1993). Pour évaluer une rente au sens d'Hotelling, la rente devrait être mesurée théoriquement par le prix auquel on déduit le coût marginal de la dernière unité produite. Mais, comme ces coûts sont difficiles à mesurer en pratique, les coûts moyens sont utilisés, ce qui revient à calculer les bénéfices nets moyens (da Motta, 1994). S'il existe des différences d'approches selon les auteurs (présentées au paragraphe 1.5. du chapitre 1), la définition de l'épuisement reste la même et correspond à la question de la pénurie économique de la ressource, pouvant être palliée par l'investissement dans un substitut. L'augmentation des dommages sociaux et environnementaux, ainsi que la non-substituabilité des ressources ne sont pas prises en compte. Cette approche ne correspond donc pas à notre définition de l'épuisement.

Il est à noter que la méthode ACV « Ecovalue08 »[44] (Gérand et al., 2018) donne une évaluation monétaire de l'épuisement des ressources en utilisant l'approche par les prix (vue dans la partie 1

[44] (Pizzol et al. , 2015) classent également la méthode EPS 2000) dans les méthodes utilisant le prix de marché pour calculer le facteur déplétion, mais ceci contredit la description de la méthode par (Gérand et al., 2018),

du présent chapitre), soit la rente hotellinienne, pour mesurer le facteur épuisement. C'est donc strictement la définition de l'ENC de l'épuisement qui est reprise ici, soit un problème de disponibilité économique. Or ces méthodes considèrent ce facteur d'épuisement comme une externalité environnementale. Le concept d'externalité sera présenté plus en détail par la suite, mais on peut cependant déjà souligner que la méthode d'évaluation ne peut pas être considérée comme une externalité, que ce soit d'un point de vue des sciences économiques, car ce n'est pas « l'effet de l'action d'un agent économique sur un autre qui s'exerce hors marché » (Pigou, 1932), et ne peut pas non plus être comprise comme une prise en compte des impacts environnementaux de l'épuisement.

1.1.2. Coût d'usage

Cette approche a été construite à partir du concept keynésien de coût d'usage ou *user cost* (da Motta, 1994). Cette approche considère que le coût de la dépréciation, lié à l'épuisement, correspond à une partie seulement des bénéfices nets. Pour El Serafy, qui développe son approche à un niveau macro-économique, la totalité des revenus dégagés de l'extraction ne peut pas être comptée comme la rente de rareté (ou le coût de l'épuisement), puisque cela conduirait à considérer que l'exploitation des ressources non renouvelables a une contribution nulle au PIB. Pour El Serafy, il s'agit donc de considérer qu'une part du revenu net de l'exploitation (et non la totalité comme dans l'approche par le coût de dépréciation) est mise de côté pour être transformée en un flux continu de revenus grâce à la valorisation de ce capital (Ahmad et al., 1989). C'est cette part qui est considérée comme le coût d'usage (la part des revenus placée sur les marchés) et qui représente alors l'érosion des biens. Cette approche est une approche de soutenabilité faible qui considère que les effets négatifs de l'épuisement des ressources peuvent être palliés par l'augmentation du flux de capitaux tirés de la ressource. Dans cette approche, il n'y a donc pas de prise en compte des pertes réalisées dans la production, ni de l'augmentation des coûts réels de la production, ou encore des coûts sociaux et environnementaux liés à la déplétion. Cette approche ne correspond donc pas non plus à notre définition de l'épuisement.

1.2. Approches par le coût de production

Les approches s'intéressant à l'évolution des coûts de production au cours du temps sont résumées ici. Au-delà des raisons conceptuelles qui conduisent les économistes néoclassiques à considérer que le prix est un bon indicateur de la rareté d'une ressource, l'autre facteur expliquant cette démarche est la difficulté d'accès aux données de coûts de production. Les études sur les coûts de production réels sont peu nombreuses, car ces données restent majoritairement peu communiquées par les industriels (Halvorsen et Smith, 1984 in Fizaine, 2014). Cette problématique est loin d'être nouvelle puisque Jevons soulignait déjà l'importance de la question des coûts et l'indisponibilité des données réelles de coûts de production (William Stanley Jevons, 1866, p. 62). Ceci explique en partie pourquoi les économistes se sont rapidement dirigés vers l'indicateur de prix (Alicia Valero Delgado, 2008; Fizaine, 2014). Cependant, la capacité des mécanismes de fixation des prix à prendre en compte les caractéristiques « physiques concrètes » (Alicia Valero Delgado, 2008) de l'exploitation des ressources, ou tout simplement le postulat selon lequel les producteurs détiennent des informations complètes sur les dynamiques d'épuisement, ont été souvent mis en doute (A. Valero Delgado, 2008; W. Kapp, 1963; Norgaard, 1990; Seyhan, Weikard, & van Ierland, 2012).

1.2.1. Indicateur de coût unitaire

L'étude la plus connue tentant une approche de l'évolution des coûts est une étude de Barnett et Morse (H. J. Barnett & Morse, 1963). Cette étude basée sur l'analyse des coûts de production conclut qu'il n'y a pas de coûts supplémentaires liés à la déplétion pour les minéraux et les métaux (Barnett et Morse, 1963). Barnett et Morse ont développé un indicateur de coût unitaire d'après leur lecture

de l'approche de Ricardo (Barnett et Morse, 1963). Ils ont donc effectué des études sur l'évolution des coûts de production, en calculant le coût du travail et du capital utilisé pour produire la ressource à partir de données[45] sur les États-Unis sur la période de 1870 à 1957 (Kendrick, 1961; Potter & Christy, 1962). Ils en tirent la conclusion que l'influence de la déplétion n'est pas déterminante dans l'évolution des coûts de production des matières premières minérales, qui diminuent sous l'impulsion du progrès technique (H. Barnett & Morse, 1963). Ils ont été critiqués par des auteurs préférant le prix comme indicateur de richesse (Cleveland & Stern, 1998; Ozdemiroglu, 1993), car les coûts de production utilisés sont pris à un niveau très agrégé, mais également parce que leur proposition s'oppose à la conception néoclassique de l'épuisement, attachée à la question de la disponibilité des ressources par rapport à la demande. En effet, cette approche étudie l'épuisement du point de vue de l'offre (Fizaine, 2014). Plusieurs études ultérieures ont repris cette approche sur différentes périodes aux États-Unis (Johnson et al.,1980; Hall and Hall, 1984; Cleveland and Stern, 1993 in Cleveland & Stern, 1998) et ont toutes trouvées une diminution du coût de production pour les métaux et autres matières premières, excepté pour le pétrole dont le coût de production augmente à partir des années 1990.

1.2.2. Coût unitaire généralisé

Cette approche, mise au point par Cleveland et Stern (Cleveland & Stern, 1998) a pour but de mettre au point un indicateur qui permette de faire des prévisions sur la rareté future des ressources et d'arriver à mesurer les effets de la déplétion et de l'innovation sur les prix. Selon les auteurs, cet indicateur reflète une « rareté d'usage » par opposition à la « rareté d'échange » de l'approche par les prix. La rareté d'usage fait référence à la capacité d'une ressource à créer de la valeur d'usage, elle est calculée comme l'équilibre entre la productivité, la disponibilité de la ressource, et le niveau de technologie utilisé (Cleveland & Stern, 1998). Selon Cleveland et Stern, le coût unitaire de Barnett et Morse est un cas spécifique de leur coût unitaire généralisé. Le point de départ du calcul de ce coût unitaire généralisé est la fonction de production. Cleveland et Stern appliquent cette méthodologie à l'agriculture et en tire la conclusion que le coût diminue grâce au progrès technique qui augmente plus vite que la détérioration de trois facteurs : la dégradation des sols, l'efficacité des pesticides et la diminution des terres arables (Cleveland & Stern, 1998). L'idée que le progrès technologique permet de maintenir la disponibilité des ressources dans le cadre de la déplétion est donc maintenue.

Dans les deux cas, l'évaluation du coût de l'épuisement consiste à établir quelle est la part du coût d'opération des activités de production de matières premières qui est attribuable à l'épuisement des ressources et si cette augmentation des coûts à une conséquence sur la diminution de la disponibilité de la ressource. Là encore, l'épuisement est défini comme un problème de disponibilité de la ressource : ce qui est évalué est la possibilité d'une pénurie économique. Cependant, cette approche est légèrement plus proche de la définition de l'épuisement qui a été établie au chapitre 1, puisqu'il y a une tentative de mesurer l'augmentation des coûts d'opération liée à l'épuisement physique (soit la déplétion, ou la diminution de la qualité de la ressource primaire). Ainsi, dans le modèle de Cleveland et Stern, il y a bien une augmentation des coûts liés à la déplétion (dégradation des sols, diminution des terres arables et diminution de l'efficacité des pesticides), même si cette diminution du coût est contrecarrée par l'augmentation de la productivité liée au progrès

[45] Les sources utilisées par Barnett & Morse sont des données empiriques tirées d'un autre rapport de RFF (Potter & Christy, 1962)(Potter & Christy, 1962). Excepté pour les données sur le capital non incluses dans l'ouvrage de Potter et Christy. De ce fait, les données sur le capital et le coefficient de pondération entre le capital et le travail sont prises d'un rapport sur les tendances de la productivité aux Etats-Unis (Kendrick, 1961). Les données sur le coût du travail sont exprimées en nombres de personnes employées, indicateur que Potter et Christy trouvent plus pertinent que le nombre d'heures travaillées, cette donnée étant d'après eux peu fiable et ayant tendance à diminuer avec l'augmentation des compétences.

technologique. Cette approche n’est donc pas en phase avec notre définition de l’épuisement puisque ni les pertes de matières le long de la chaîne de production, ni les coûts liés aux impacts sociaux et environnementaux augmentés par l’épuisement, ni l’impact du recyclage ne sont considérés.

Tableau 14 : Comparaison des différentes approches existantes pour prendre en compte les coûts de l'épuisement

	Approche	Principaux auteurs	Courant de pensée économique	Ce qui est calculé	Lien avec notre définition de l'épuisement
Prix	Coût de dépréciation, approche par les bénéfices nets ou rente hotellinienne (*Net receipt approach or depreciation approach*)	Lyon, 1981; Sedjo and Lyon, 1990; Slade, 1982; Farzin,1992,1995 in Cleveland & Stern, 1998; Fisher, 1979; Hartwick, 1977; Hotelling, 1931; Ozdemiroglu, 1993	ENC (Matérialistes)	Rente	Pas de prise en compte des coûts sociaux et environnementaux liés à la déplétion, ni des pertes de matières
	Coût d'usage (*User cost*)	Ahmad, El Serafy, & Lutz, 1989	Néokeynésiens (Fundistes)	Élément de la rente qui correspond au coût du capital à investir	
Coût d'opération	Coût unitaire (Unit cost)	Barnett and Morse, 1963; Johnson et al.,1980; Hall and Hall, 1984; Cleveland and Stern, 1993	Classique	Coût du capital et du travail nécessaire pour produire la ressource	
	Coût unitaire généralisé (Generalized Unit Cost)	Cleveland and Stern, 1998	ENC (Matérialistes)	Coût de production à partir de la fonction de production	
Coût énergétique	Coût énergétique	Cleveland, 1991		Coût énergétique de l'exploitation	Correspond à une partie de l'augmentation des coûts induite par l'épuisement
Diminution de la disponibilité future	ReCiPe : Potentiel de surcoût (Surplus Cost Potential)	Vieira et al., 2016 ; Goedkoop et al., 2009		Augmentation du coût d'opération marginal	
	EcoIndicator 99	Mark and Renilde, 2001; Goedkoop and Spriensma, 2001: Jolliet et al. 2003		Augmentation du coût énergétique marginal de l'exploitation	

1.3.Coût énergétique de l'exploitation

Le coût énergétique pour exploiter les métaux a été étudié par Cleveland dès 1991. Cleveland montrait alors que le coût de l'énergie utilisée pour l'exploitation de l'argent, de la bauxite et du fer augmentait aux États-Unis, alors que l'exploitation du cuivre, du plomb et du zinc avait un coût stable ou décroissant (Cleveland & Stern, 1998). L'étude de ces coûts énergétiques a été abandonnée plus tard par Cleveland, car jugés non représentatifs de la disponibilité de la ressource (influencée par d'autres facteurs de productivité).

Cependant ces coûts présentent plusieurs points d'intérêt. Tout d'abord, ils permettent d'approximer l'épuisement physique de la ressource plus directement que le coût d'opération, l'énergie utilisée pour extraire les métaux étant liée à la qualité de la ressource. Toutefois, le coût énergétique peut également dépendre de la technique d'extraction choisie et ne peut donc pas être complètement équivalent à la diminution de la qualité de la ressource. Ensuite, le coût énergétique est également lié à un coût environnemental, puisque l'énergie utilisée participe à l'émission de gaz à effet de serre et donc au changement climatique. Il faut tout de même noter que même si l'augmentation du coût énergétique peut être le reflet et/ou le révélateur de l'augmentation d'autres coûts environnementaux également liés à l'épuisement physique de la ressource (comme vu au chapitre 1), ces autres facteurs ne peuvent être réduits au coût énergétique. Comme le souligne Cleveland : « l'énergie utilisée pour extraire une ressource est reflétée par l'utilisation additionnelle de ressources renouvelables et de services écosystémiques, comme l'eau, l'air pur et les terres utilisées comme support de l'extraction. L'augmentation de l'utilisation d'énergie et d'intrants augmente également la génération de déchets, qui à son tour augmente l'utilisation du capital naturel sous des formes diverses […] la déplétion cumulative d'une ressource augmente la demande d'utilisation de capital naturel, car l'expansion [de la mine] détourne l'usage de plus grandes portions de terres vers l'extraction. Le changement de qualité de la ressource affecte tous ces coûts comme elle affecte le coût énergétique de l'extraction. […] Dans les mines métalliques de surface et de charbon la dégradation de la qualité des ressources augmente le taux de décapage et donc les déchets produits par unité de ressource produite » (Cleveland & Stern, 1998). Ainsi si le coût énergétique peut être un révélateur d'autres coûts environnementaux, cela n'en fait pas un indicateur intégré de l'ensemble des coûts associés à l'épuisement physique.

1.3.1. Diminution de la disponibilité future

Ce paragraphe regroupe les approches monétaires de l'épuisement utilisées dans les analyses de cycles de vie (N. Adibi et al., 2017; Gérand et al., 2018). L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthodologie éprouvée et largement utilisée, permettant la mesure d'impacts environnementaux clefs (émissions de gaz à effet de serre, phénomène d'acidification, etc.) le long du cycle de vie des produits. Les activités minières et de traitement font partie intégrante de la plupart des cycles de production, et l'application de l'ACV aux minéraux et aux métaux a ainsi gagné une importance conséquente dans le monde de la recherche (Yellishetty et al., 2009). Dans la dernière décennie, l'utilisation accrue de l'ACV dans le secteur minéral et des métaux a fait progresser les connaissances scientifiques à travers le développement de bases de données d'inventaires (Nuss and Eckelman, 2014, sec. references 25 à 38) utilisés pour l'ACV (Yellishetty et al., 2009). Cependant cette connaissance est beaucoup plus approfondie pour les « grands métaux industriels » (voir Tableau 6 du chapitre 1) que pour les « petits métaux ». De plus, la prise en compte de l'épuisement des ressources non renouvelables dans ces méthodologies fait toujours débat. Il s'agit ici de s'intéresser aux méthodes ayant une approche monétarisée de l'épuisement.

L'approche qui prévaut est d'établir les coûts additionnels que la société future devra payer du fait de l'extraction présente. Il s'agit donc de voir comment la diminution de la qualité de la ressource, en l'occurrence la teneur, augmente les coûts de production.

1.3.2. ReCiPe (potentiel de surcoût)

La méthode d'ACV ReCIPe 2016 (Huijbregts et al., 2017) contient une méthode d'évaluation de la « rareté des ressources minérales ». Dans cette méthode, l'impact de l'épuisement est considéré comme le surcoût à payer pour les générations futures de l'extraction présente du fait de la baisse de la teneur. Elle évalue pour cela le surcoût en deux temps.

Tout d'abord, un facteur non monétaire, le surplus moyen de minerai à extraire dans le futur pour une unité de ressource extraite aujourd'hui. Ce facteur est établi grâce à des relations statistiques entre teneur et production cumulée pour 18 métaux et minéraux[46] avec des données suffisantes. Ces données sont issues principalement d'un article de 1993 de l'USGS passant en revue les tonnages et les teneurs de différents gisements (Donald A Singer, Mosier, & Menzie, 1993), en faisant l'hypothèse forte que les gisements seront et/ou ont été exploités strictement par ordre décroissant de teneur. Ce ne sont donc pas des données réelles de production qui sont utilisées, mais un modèle hypothétique à partir de données sur des gisements connus. De plus, l'hypothèse prise pour les rendements de l'exploitation de ces métaux n'est pas donnée dans la méthodologie[47]. Or ces rendements varient considérablement d'un métal à l'autre (notamment les co-produits qui ont tendance à avoir de faibles rendements). La non-prise en compte des rendements laisse penser que le surplus moyen de minerai à extraire dans le futur pour une unité de ressource extraite aujourd'hui est sous-estimé. Les auteurs obtiennent le surplus moyen de minerai à extraire pour ces 18 métaux et font une régression par rapport au prix des métaux en 2013. La bonne corrélation de cette régression leur permet de faire l'hypothèse que le surplus moyen de minerai à extraire pour les autres métaux peut être déduit du prix en 2013 de ces métaux. Ceci demande à être vérifié pour les petits métaux, puisque dans les métaux étudiés, seulement 4 petits métaux et 2 métaux précieux ont été pris en compte. Enfin, pour le facteur monétaire (le surcoût moyen d'opération dans le futur pour une unité de ressource extraite aujourd'hui), un facteur unique est proposé pour tous les métaux. Cette simplification est faite sur la base d'une régression production cumulée-coût moyen d'opération. Or, là encore, le rendement du procédé utilisé a un impact sur les coûts d'opération par unité de métal produit, et parmi les métaux pour lesquels il n'y a pas de données, on trouve de nombreux sous-produits avec de mauvais rendements. De plus, d'après le BRGM[48] (Gérand et al., 2018), les sources de données utilisées pour les coûts sont surtout concentrées sur l'« Occident ».

Pour résumer, cette méthodologie pour le calcul de l'épuisement a l'avantage de prendre en compte un phénomène d'épuisement « aussi proche que possible d'une réalité physique » (Gérand et al., 2018), mais pâtit du manques de données sur les petits métaux, dont l'utilisation est plus récente (années 1970), ce qui la rend délicate à utiliser pour cette catégorie. Cette méthodologie met en place un indicateur qui correspond à une partie de notre définition de l'épuisement qui est la diminution de la qualité de la ressource au fur et à mesure de l'exploitation. En revanche, par son absence de prise en compte des rendements utilisés, elle met de côté un phénomène qui a un grand rôle dans l'épuisement des ressources que sont les pertes de matière. De même, les différents taux de recyclage des métaux ne sont pas pris en compte. Enfin, la méthodologie ne prend pas en compte l'augmentation des impacts sociaux et environnementaux induite par la diminution de la qualité des ressources.

[46] Aluminium, antimoine, chrome, cobalt, cuivre, or, fer, plomb, lithium, manganèse, molybdène, nickel, niobium, phosphore, argent, étain, uranium et zinc.

[47] La lecture de l'annexe de la méthodologie porte à croire que les auteurs font l'hypothèse d'un rendement de 100%.

[48] Bureau de Recherches Géologiques et Minières est le service géologique national français.

1.3.3. EcoIndicator 99

La méthode d'ACV EcoIndicator comporte un facteur « ressources » qui traite des ressources minérales et fossiles. Ce facteur est pris en compte à travers le coût du surplus énergétique de l'exploitation des métaux. Ce surplus est dû à la baisse de la teneur du fait de l'extraction présente. Cette caractérisation de l'épuisement est reprise dans d'autres méthodes comme Impact 2002+ (Jolliet et al., 2003). La méthode part du principe que la demande d'énergie augmente lorsqu'une ressource doit être extraite de gisements de qualité inférieure. C'est donc le même principe utilisé que dans le coût énergétique de l'exploitation. Cependant, ce qui est pris en compte ici n'est pas l'augmentation du coût énergétique totale, mais l'augmentation marginale pour chaque unité de ressource supplémentaire extraite. La méthode raisonne à technologie constante et projette la consommation énergétique de l'exploitation dans le futur jusqu'à un point choisi arbitrairement, 1990 dans la méthode EcoIndicator 99 (Klinglmair, Sala, & Brandão, 2014). L'énergie utilisée est calculée par type de mine considérée. Il s'agit ensuite de monétiser l'énergie supplémentaire nécessaire à l'extraction des ressources. D'après le BRGM, les données utilisées pour ce facteur de caractérisation du coût de l'épuisement datent des années 1960-1980 et sont prises de modèles géostatistiques dont la validité n'a pas été établie (Gérand et al., 2018).

Cette approche de l'épuisement, comme le coût énergétique de l'exploitation vu précédemment, est donc une première approche des coûts environnementaux de l'extraction, puisqu'elle peut être reliée à l'émission de gaz à effet de serre. De plus, le lien est ici fait explicitement entre la diminution de la teneur et l'augmentation du coût énergétique. Cependant, cette méthode n'aborde pas le lien entre diminution de la qualité de la ressource et augmentation des coûts sociaux et environnementaux. De plus, les pertes de matières, comme la capacité des métaux à être recyclés, ne sont pas pris en compte.

Il a donc été vu que les approches qui évaluent le coût de l'épuisement à travers la diminution de la disponibilité future étaient celles qui s'approchaient le plus de la définition de l'épuisement établie au chapitre 1. En effet, elles prennent en compte la diminution de la qualité des ressources à travers la teneur, ce qui constitue une des caractéristiques de l'épuisement. Cependant, ni les pertes, ni le recyclage, ni l'augmentation des coûts sociaux et environnementaux ne sont pris en compte dans ces approches. Ce ne sont donc pas des approches intégrées de l'épuisement. Enfin, l'idée d'un coût énergétique marginal peut être une source d'inspiration pour la mise en place d'un coût marginal environnemental et social lié à la déplétion de la ressource. En fonction du métal étudié, il faudra évaluer si une approche similaire peut être utilisée, car cette approche demande une connaissance solide de la corrélation entre la teneur et l'augmentation des coûts sociaux et environnementaux, et une capacité à projeter dans le futur le lien entre ces variables. Or, comme cela a été souligné ci-avant, les données détaillées sur les exploitations sont rares (N. Adibi et al., 2017; Gérand et al., 2018), particulièrement pour les petits métaux dont l'exploitation est récente. En l'absence de données suffisantes pour pouvoir établir des relations sur des bases statistiques, une solution à privilégier serait de proposer des scénarii d'exploitation future, appuyés sur les connaissances géologiques, les types d'exploitation les plus probables, les rendements les plus courants, etc. Cependant, une approche par scénario a le désavantage (par rapport au coût du surplus énergétique marginal) de ne pas rendre possible l'établissement d'un coût marginal moyen calculé sur du très long terme, mais seulement l'augmentation des coûts à venir à moyen terme.

1.4. Reformulation de la problématique

Cette première partie a passé en revue les principales approches existantes pour évaluer le coût de l'épuisement. Il a été vu que les approches n'étaient pas satisfaisantes pour évaluer le coût de l'épuisement, défini comme deux phénomènes conjoints, continus et irréversibles que sont les pertes de quantité (pertes de matière tout au long de la filière) et de qualité (diminution des teneurs du gisement et difficultés du recyclage) de la ressource au fur et à mesure de son utilisation dans notre économie d'une part et la démultiplication des impacts environnementaux, sanitaires et sociaux des filières de matières premières minérales d'autre part. Si les approches utilisées pour mesurer le coût de cet épuisement dans les ACV depuis quelques années prennent en compte la diminution de la qualité des ressources, elles n'étendent pas la démarche d'évaluation à l'effet de cette diminution sur les impacts sociaux et environnementaux. Toutes ces approches considèrent que le problème de l'épuisement des ressources est un problème de disponibilité. L'analyse montre également que des définitions différentes du coût de l'épuisement sont reflétées dans les différentes approches. Ainsi, dans l'approche par les prix, le coût de l'épuisement est la rente hotellinienne, vu comme le coût de remplacement de la ressource ; dans les approches du coût unitaire et du coût unitaire généralisé l'intérêt est porté à l'évolution du coût d'opération pour prévoir les éventuelles ruptures d'approvisionnement, le coût de l'épuisement physique étant une composante parmi d'autres de ce coût d'opération ; dans l'approche de la diminution de la disponibilité future l'épuisement est traduit par la part de l'augmentation du futur coût de production de la ressource due à l'épuisement physique. Dans toutes ces approches (exceptée l'approche par les prix) le coût de l'épuisement est donc une partie du coût d'opération de l'exploitation.

Il a aussi été montré qu'il existe des études rejetant l'hypothèse d'une hausse des coûts de production liée à l'exploitation des ressources non renouvelables. Pourtant, il a été vu dans le chapitre 1 que l'augmentation des coûts environnementaux liée à la diminution de la teneur a ainsi fait l'objet de nombreuses études empiriques (Giurco et al., 2014; G. M. Mudd, 2007c; Prior et al., 2012) et que ces impacts environnementaux généraient à leur tour des impacts sociaux (Martinez-Alier & Walter, 2016). Ces impacts ont nécessairement un coût pour la société, et sont souvent considérés comme importants, même s'ils ne font pas l'objet d'évaluations précises : « le coût d'atténuation des dommages environnementaux lié au drainage minier acide est grand [… évalué au Canada] entre 2 et 5 milliards de dollars » (Jennings et al., 2008), « les sites les plus étendus et les plus cher que l'EPA a listé sous la Loi sur la responsabilité et l'indemnisation globales en matière de ressources environnementales (CERCLA, alias Superfund) sont les sites miniers de l'Ouest » (Jennings et al., 2008). Il existe aujourd'hui peu d'évaluations quantitatives et qualitatives sur lesquelles s'appuyer pour étayer ou rejeter l'importance des dommages liés à la production de ressources métalliques et aux coûts pour la société, de l'épuisement tel que défini dans le chapitre 1. Ces coûts environnementaux ne sont pas toujours estimés, et souvent sous-estimés, notamment parce que dans de nombreux cas, les problèmes environnementaux et sanitaires ne sont pas ou peu pris en charge. L'absence de prise en charge et d'évaluation de ces impacts explique pourquoi les coûts de production, qui constituent la base de l'évaluation du coût d'épuisement dans ces études, ne prennent pas en compte les coûts environnementaux et sociaux.

Dit autrement, dans un cadre de comptabilisation des coûts où n'apparaissent pas les coûts associés aux impacts sociaux et environnementaux, la diminution des coûts pourrait aussi bien être l'œuvre d'un gain de productivité, comme le suggère les approches par les prix et les coûts de production, que d'une diminution de la prise en charge des coûts sociaux et environnementaux par les acteurs économiques. Le transfert des coûts peut se faire sur plusieurs plans : d'un acteur à un autre (recours à un sous-traitant dont la rémunération est moindre par exemple), dans le temps (non prise en charge de la pollution qui sera prise en charge par les générations suivantes, ou dont les conséquences seront prises en charge par la génération suivante), dans l'espace (délocalisation

d’une activité dans un pays dont la règlementation sociale et environnementale est moins stricte et le coût du travail plus bas). Ainsi, dans le Chapitre 1, la description des impacts environnementaux, sociaux et sanitaires de l’exploitation des métaux faisait déjà apparaître en creux des coûts sociaux plus importants pour les pays pauvres.

Dans ce contexte, la recherche d’une diminution des coûts peut même être un des facteurs explicatifs des transferts de coûts vers les sphères sociale et biophysique. Ou comme le formulait déjà Swaney dans les années 1980 : «il existe une incitation systématique à éviter les coûts par quelque moyen que ce soit, et plus l'économie est compétitive, plus la pression est forte. […] Lorsque les coûts sont évités avec succès, les coûts comptables de l'entreprise, mais souvent pas les coûts d'opportunité sociaux de la production, sont réduits. […] les pressions exercées pour transférer les coûts résultent des pratiques comptables traditionnelles ainsi que de la concurrence » (Swaney, 1987). C’est également ce qu’analyse un chercheur travaillant sur les impacts de l’épuisement dans l’industrie minière : « afin de répondre à la demande croissante, cela a contraint le coût de production unitaire à la baisse et a conduit à l’exploitation de mines plus larges afin de réduire les coûts unitaires grâce aux économies d'échelle » (G. M. Mudd, 2007a). Il fait référence ici à la généralisation de l’exploitation en mine à ciel ouvert, qui est en partie responsable de l’augmentation de la production de déchets dans l’industrie minière.

Ainsi, dans une perspective de soutenabilité forte, il n’est pas possible de rejeter l’hypothèse d’augmentation des coûts puisque les coûts environnementaux et sociaux ne sont pas comptabilisés comme des coûts de production. Cependant, la question des rendements décroissants, liée chez Ricardo à la question du partage entre rente, profits capitalistes et travail, et chez Jevons à la question de la disponibilité de la ressource, n’est plus centrale dans une approche de soutenabilité forte. En effet, la question prioritaire dans ce cadre n’est plus de savoir pour combien de temps les ressources seront disponibles à un coût économique raisonnable, mais quels coûts, au sens de pertes sociales et environnementales irréversibles, la société est prête à supporter pour exploiter des ressources, alors que les effets de l’épuisement physique se font déjà sentir. Cette question, comme vu précédemment, est évoquée dans la réédition du rapport Meadows (Meadows et al., 2004) qui interroge la capacité de l'économie réelle à supporter ces coûts croissants d'extraction des ressources. Cette idée n’est cependant pas neuve. Ainsi, d’autres auteurs affirmaient dès les années 1980 que si les phénomènes irréversibles de pertes de qualité des gisements de ressources non-renouvelables (en l’occurrence pour l’énergie nucléaire) était un « problème de long terme, les symptômes de cette détérioration font l’objet de préoccupations immédiates pour la stabilité écologique » (Swaney, 1987). Ainsi Swaney concluait-il déjà que « la menace n’est pas l’épuisement des ressources naturelles […], mais la perturbation des fonctions environnementales par une mise en application téméraire des technologies modernes et des autres abus de l’environnement » (Swaney, 1987). Dans ce cadre, dans une perspective de soutenabilité forte, il ne semble pas raisonnable d’attendre que les coûts miniers ne prenant pas en compte, ou très peu, les coûts sociaux et environnementaux, dépassent le consentement à payer pour la ressource pour fixer une limite à l’expansion des coûts réels de l’exploitation de ces ressources. Or, il n’existe pas aujourd’hui de consensus sur les limites à fixer socialement et environnementalement à cette exploitation. La présente thèse vise à contribuer à informer ce débat, que certains travaux abordent sous un angle biophysique (Vela-Almeida, Brooks, & Kosoy, 2015).

Pour pouvoir minimiser les deux phénomènes irréversibles mentionnés dans le chapitre 1 (pertes de matières et augmentation des impacts) dans le choix des modèles de production et de consommation, il est donc nécessaire d'avoir recours à une évaluation des coûts sociaux, des coûts environnementaux et des pertes générés par la production et l'utilisation de ces ressources. La recherche vise à explorer les liens entre épuisement physique, augmentation des coûts réels de l'exploitation, et tendance des acteurs économiques à externaliser ces coûts. La problématique de

cette recherche peut être ainsi reformulée : comment évaluer les coûts liés à l'épuisement physique des ressources métalliques dans une approche de soutenabilité forte ? Comment définir ces coûts, et évaluer leur prise en charge ?

Ces questions guident notre formulation d'un cadre conceptuel et méthodologique pour évaluer ces coûts sociaux et environnementaux de l'épuisement. Cadre qui permettra une évaluation au Chapitre 3 des coûts sociaux de l'épuisement pour un cas d'étude. Cette évaluation donnera des éléments de réponses aux questionnements introduits dans les deux premiers chapitres :

- Y a-t-il un lien entre épuisement physique et augmentation des coûts ? Entre épuisement physique et transfert des coûts ?
- Entre la recherche de coûts bas, l'augmentation de la production d'une part et l'épuisement physique d'autre part ?
- Entre la recherche de coûts bas, l'augmentation de la production d'une part et le transfert de coûts d'autre part ?
- Existe-t-il des tendances contraires comme la prise en charge des coûts sociaux et environnementaux par les acteurs économiques ?
- Qu'est-ce qui favorise cette prise en charge ?

2. La notion d'externalité et le phénomène d'épuisement des ressources

Il a été vu que les impacts sociaux et environnementaux ne sont pas comptabilisés dans les coûts économiques de l'exploitation des métaux et que les définitions existantes des coûts liés à l'épuisement des ressources ne permettaient pas de prendre en compte ces impacts. Pour pouvoir évaluer les coûts liés à l'épuisement physique des ressources métalliques dans une approche de soutenabilité forte, il s'agit donc de se doter d'une approche en « coût complet » qui puisse évaluer les différentes composantes de l'épuisement des ressources. Dans ce paragraphe, l'approche dominante de prise en compte du transfert des coûts des acteurs économiques vers les sphères sociale et environnementale est présentée : les externalités. Cette approche est discutée au regard de sa prise en compte de l'épuisement. Tout d'abord, le concept des externalités est brièvement présenté. Puis sa mise en application dans la recherche et en pratique est résumée. Enfin, le peu de prise en compte de l'épuisement tel que défini au chapitre 1 dans ce domaine est expliqué et il est alors proposé de se tourner vers un autre cadre conceptuel.

2.1. La définition des externalités de Pigou à Stigler

Dans le cadre de la théorie économique néoclassique, les conséquences sociales et environnementales négatives des activités économiques, comme « la dégradation de l'environnement s'explique[nt] par l'absence de propriété privée et de prix, deux conditions essentielles à la création d'un marché » (Gadrey & Lalucq, 2015). C'est la théorie développée par Arthur Cecil Pigou, précurseur de l'économie du bien-être et de l'économie environnementale (Pigou, 1932). Pigou explique l'apparition de ces dommages comme « l'effet de l'action d'un agent économique sur un autre qui s'exerce hors marché » (Pigou, 1932), et il les qualifie d'"externalités", dans la lignée des travaux esquissés par Alfred Marshall en 1890 sur l'économie externe. Dans la majeure partie du travail de Pigou, les externalités sont vues comme des divergences accidentelles entre les intérêts privés et sociaux qui empêchent le marché d'atteindre son équilibre optimum (Ramazzotti, Frigato, & Elsner, 2012, Chapitres 5, Sebastian Berger), bien qu'il ait plus tard souligné dans ses travaux, l'apparition de dysharmonies généralisées dans les systèmes de production et de distributions (Pigou, 1937). Pour réduire ces externalités, il préconise l'intervention de l'État via l'instauration de taxes qui permettraient d'intégrer les externalités au marché, objectif principal à atteindre. L'ENC se concentre donc sur les problèmes environnementaux qui ne sont « pas ''correctement intégrés'' dans les décisions individuelles des agents [et …] échappent donc

partiellement au domaine du choix individuel » (Morales Belpaire, 2013). Cette branche de l'économie qui utilise les bases de l'économie néoclassique pour s'intéresser à l'apparition de problèmes environnementaux considérés comme des externalités est l'économie environnementale. L'économie environnementale s'établit presque 40 ans après les travaux de Pigou (Morales Belpaire, 2013). Comme le résume Morales Belpaire : l'« Économie environnementale se pose comme une branche de l'ENC. Elle en adopte les techniques et le langage. Elle considère l'allocation des marchés comme la solution la plus efficiente pour la société pourvu que les gains et les coûts environnementaux soient correctement intégrés aux décisions économiques des acteurs de ces marchés. […] On peut donc dire que l'Économie environnementale traite de problèmes qui sont publics mais ne devraient pas l'être » (Morales Belpaire, 2013).

Ronald Coase, économiste dont les travaux déboucheront dans les années 1970 à la création de la nouvelle économie institutionnelle (paragraphe 1.6. du chapitre 1), a consacré ses travaux à l'étude des coûts de transaction dans l'économie réelle, démontrant ainsi les limites du modèle de la concurrence parfaite (Coase, 1937, 1960). Dans son approche de la question des externalités, il s'est appuyé sur le cadre théorique développé par Pigou, mais a analysé les inconvénients des systèmes de taxation que ce dernier avait imaginés, en particulier le fait que les coûts sociaux devaient chez Pigou être éliminés à travers une action publique, « quel qu'en soit le coût ». L'article de Coase « The Problem of Social Cost » contient un appel à un examen plus minutieux de différentes politiques possibles et de leurs coûts respectifs face au problème des externalités : une action gouvernementale, visant à rééquilibrer le marché, et l'option de ne rien faire (Ramazzotti et al., 2012, Chapitres 5, Sebastian Berger). Coase reprend donc l'analyse de la gestion des externalités pour montrer que la réglementation publique n'est pas supérieure *a priori* aux négociations privées pour traiter les défaillances des marchés, puisque l'intervention publique génère aussi un coût réel (Glachant, 2002). Il faut donc comparer les coûts des deux solutions, privée et publique, sur une base d'égal réalisme (Glachant, 2002). Coase met en avant qu'il importe peu de déterminer le responsable de l'origine des coûts sociaux, et expose qu'il est plus efficace de déterminer qui accorde le plus de valeur à la ressource spoliée. Il propose ainsi, à la place du système de taxation de Pigou, un système d'attribution de droits de propriété par l'État qui vise à accorder le droit de propriété à l'agent accordant le plus de valeur à la ressource, et ce faisant, corriger plus efficacement les externalités par la négociation directe de compensations entre l'auteur de l'externalité et celui qui en subit les conséquences. La nouvelle économie institutionnelle s'est ensuite concentrée jusque dans les années 2000 sur l'étude des différentes formes d'organisation de l'activité économique : avec les travaux de Williamson, qui s'inspirent des travaux de Coase, pour établir une théorie des coûts de transaction selon laquelle le choix de la structure de gouvernance (marché, hiérarchie, hybride) est contraint par l'existence de coûts de transaction qu'il s'agit de minimiser (Chervier, Millet-Amrani, & Méral, 2016). Ces travaux ont cependant été mobilisés ces dernières années pour l'étude de la mise en place de dispositifs pour prendre en compte les externalités (Chervier et al., 2016).

Stigler en a tiré un principe, appelé « théorème de Coase » (Stigler, 1966, p. 120) : « *the Coase theorem thus asserts that under perfect competition private and social costs will be equal* », qui vise à démontrer la non nécessité de l'action de l'État. Stigler s'intéresse donc au cas où il n'y a pas de coût de transaction pour en conclure que, dans ce cas, le droit de propriété ou droit à polluer, tel que l'envisageait Coase, appartient automatiquement à celui ou celle qui accorde le plus de valeur au bien spolié. Le théorème de Coase tel que formulé par Stigler porte donc mal son nom puisqu'il s'intéresse uniquement au cas exceptionnel où il n'y a pas de coût de transaction, objet d'étude privilégié de Coase, revenant à l'hypothèse d'un marché parfait. Coase n'en a d'ailleurs pas reconnu la paternité (McCloskey, 1998). Stigler est un penseur important de l'école de Chicago et de la société du Mont Pèlerin qui s'est développée à partir de 1947 avec Hayek, Mises et Buchanan comme chefs de file. Quelques principes directeurs de cette école économique peuvent être dégagés : 1) Le marché peut toujours produire des solutions à des problèmes créés par le marché au départ ; 2) Le

marché surpasse toujours l'état dans sa capacité de traitement de l'information ; 3) Les entreprises ne peuvent pas causer de préjudices, ou dans une moindre mesure, elles ne peuvent pas en être tenues responsables si elles en causent (Ramazzotti et al., 2012, Chapitres 5, Sebastian Berger). Les courants de pensée de l'école de Chicago, se fondant sur les idées développées par G. Stigler, ont redéfinis les coûts sociaux de manière cruciale. Entre autres, cette redéfinition implique que « l'objectif de l'étude des coûts sociaux n'est plus l'élimination des pertes subie par la société dans son ensemble mais, au contraire, la recherche d'un maximum d'efficacité, c'est-à-dire, de la valeur maximale en termes d'utilité et de valeur d'échange ou de la croissance économique tout simplement. Les coûts sociaux ne sont plus alors considérés comme une menace fondamentale pour la société qui doit être éliminée quelle qu'en soit le coût, et l'argument est même avancé qu'ils ne peuvent pas être éliminés du tout » (Ramazzotti et al., 2012, Chapitres 5, Sebastian Berger). Cela a contribué à largement diffuser l'idée qu'il suffit de compenser les externalités quand elles surviennent pour que tout rentre dans l'ordre et a donné naissance aux stratégies de compensation qui permettent à des entreprises de s'acquitter de certaines externalités négatives en valorisant leurs externalités positives. La nouvelle économie des ressources (NER) évoquées au chapitre 1, ne cite pas directement les travaux de Stigler, mais a une interprétation similaire du théorème de Coase, qui amène ces auteurs à présenter la stricte « privatisation comme l'unique voie pour assurer une gestion durable des espèces et des milieux naturels » (Boisvert et al., 2012).

2.2. La mobilisation du concept d'externalités

Le concept des externalités a été mobilisé par des acteurs différents, en référence à différents cadres conceptuels et avec différentes approches. Les différentes méthodes de monétarisation pour le calcul des externalités seront abordées dans la partie méthodologique du présent chapitre. Devant l'impossibilité de faire une revue exhaustive de l'utilisation du concept d'externalité, il s'agit d'en tracer les grandes tendances. Pour cela deux articles académiques majeurs utilisant le concept d'externalité sont présentés, ainsi que les raisons de leur retentissement institutionnel.

Les années 1990 ont marqué un tournant dans la reprise de ce concept avec la première utilisation à grande échelle pour chiffrer les dommages liés à la marée noire lors du procès de l'Exxon Valdez, ce qui lui a conféré une reconnaissance officielle et internationale (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, & Pigneur, 2016). A la même époque, la première évaluation des externalités positives des écosystèmes naturels à l'échelle de la planète fut publiée par Costanza et ses collaborateurs (Robert Costanza et al., 1997). Costanza fait partie avec Norgaard (voir chapitre 1), des auteurs fondateurs de l'économie écologique. Costanza diffère de ce dernier par son recours à des méthodes de la théorie néoclassique ou de l'économie environnementale. Son travail s'est consacré tout d'abord à la question du coût énergétique de la production avant de s'orienter principalement vers la valorisation monétaire des services écosystémiques (Petit & Vivien, 2015). Cet article a contribué à établir la notion de « services écosystémiques » soit l'ensemble des services rendus « gratuitement » par les écosystèmes, mais pouvant être évalués économiquement : régulation de l'eau et de l'air, habitat, valeur esthétique et récréative, etc. Dans cet article, Costanza et ses collaborateurs soulignent que la non prise en compte de la valeur des écosystèmes vient de leur absence de prise en compte par le marché (Robert Costanza et al., 1997), rejoignant en cela la tradition pigouvienne. Cependant, les auteurs soulignent que ce "capital naturel" est en partie non-substituable, en premier lieu parce que cette substitution coûterait très cher, en deuxième lieu parce qu'une partie des services écosystémiques est considérée comme irremplaçable[49]. Ils ne prônent donc pas un système de taxe ou de compensation, mais une prise en compte de ces services dans la comptabilité nationale et dans l'évaluation des projets (à travers des mécanismes de type analyse coût-bénéfice). En 2007, dans le prolongement de ces travaux, les Nations Unies ont créé un groupe d'experts sur

[49] Voir paragraphe 1.1.1. du chapitre 1 pour la discussion sur la non-substituabilité des ressources. Costanza étant avec Daly un des partisans de la complémentarité entre capital et ressource et non de la substituabilité

l'évaluation monétaire des services écosystémiques (TEEB) (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, et al., 2016).

En parallèle, le rapport Stern a fortement influencé le débat international sur le dérèglement climatique en chiffrant les externalités futures de l'inaction sur les émissions de gaz à effet de serre (Stern, 2007). Dans ce rapport, Stern rappelle que le point de départ de son analyse est « la théorie de base des externalités et des biens publics [...] (Pigou, Meade, Samuelson, Coase) » (Stern, 2007). Les initiatives internationales se référant au concept d'externalités n'ont cessé de se multiplier depuis. Le Bureau d'Analyse Sociétale pour une Information Citoyenne (Basic au sein duquel cette recherche a été réalisée dans le cadre d'un contrat CIFRE), liste à titre d'exemples (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, et al., 2016) :

- Le TEEB a lancé une évaluation des externalités de l'alimentation mondiale dont le premier rapport a été rendu public en septembre 2015 (TEEB, 2015) ;
- La FAO a publié en décembre 2015 une étude sur les impacts mondiaux de l'agriculture sur le capital naturel (FAO, 2015) , et a initié en partenariat avec IFOAM, début 2016 une campagne internationale sur « le vrai coût de l'alimentation » (Nature & More, 2016).

Le Basic souligne que la mobilisation du concept par différents acteurs répond à des besoins stratégiques spécifiques. Ainsi, pour les pouvoirs publics, l'évaluation des externalités à un niveau macro-économique permet de démontrer le bien-fondé de leur politiques (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, et al., 2016). Pour les entreprises, il s'agit désormais de calculer des externalités négatives (notamment dans un objectif de communication), mais surtout des externalités positives, qui sont habituellement ignorées par le marché ou par leurs clients (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, et al., 2016). Cette vision pragmatique emporte désormais l'adhésion des acteurs économiques ou institutionnels les plus importants, qu'il s'agisse des géants de l'agro-industrie (Coca-Cola, Nestlé, Syngenta, Monsanto…), des principaux cabinets de conseil (PWC, Deloitte, EY, KPMG) ou des bailleurs internationaux (Banque Mondiale, PNUE…) (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, et al., 2016).

Une critique importante des approches inspirées de la vision pigouvienne des externalités concerne le postulat qui présente les externalités comme de simples défaillances accidentelles du système économique : il suffirait d'identifier ces défaillances et d'appliquer une action économique corrective, via des taxes ou des compensations, visant à internaliser les externalités au marché pour que les problématiques sociales et environnementales se résolvent. Cette critique est d'autant plus pertinente sur des enjeux globaux tels que ceux qui sont évoqués ci-dessus (soutenabilité du système agricole et alimentaire, préservation des écosystèmes à l'échelle mondiale et changement climatique). Ces externalités ne correspondent pas à la description de défaillances ponctuelles ou accidentelles telles que les envisageaient Pigou. Un exemple, peut être pris via la question du changement climatique, pour laquelle le concept de Pigou est régulièrement utilisé, comme dans le cas du rapport Stern où le changement climatique est considéré comme « la plus grande défaillance de marché que le monde ait jamais connue » (Stern, 2007). Ainsi Damian souligne-t-il que les émissions de gaz à effet de serre rentrent difficilement dans le cadre des externalités de Pigou (Damian, 2012). Damian rappelle que le changement climatique est un problème « global à la fois dans ses causes et conséquences, les effets néfastes sont persistants et se développent dans le temps, les incertitudes sont multiples et considérables, et les impacts sur l'économie mondiale seront vraisemblablement élevés » (Damian, 2012), ce qui rend le problème difficile à considérer comme un problème ponctuel pouvant être régler avec une action corrective simple impliquant un nombre d'acteurs limité. Plus encore, le caractère ponctuel ou accidentel du changement climatique est difficile à défendre, alors que celui-ci est intrinsèquement lié à nos modes de production et de consommation très gourmands en ressources (voir Chapitre 1) : « les émissions ne peuvent être séparées du reste des infrastructures physiques de l'économie et […] une société à

basse teneur en carbone sera par nécessité une société à faible usage en ressources » (Fischer-Kowalski M.et al., 2010 in Damian, 2012). Autrement dit, les solutions au changement climatique nécessitent de fortes transformations économiques et sociales, dont la taxe pigouvienne peut être un des instruments, mais certainement pas l'unique instrument. C'est en cela que les problèmes climatiques ne rentrent pas dans « le schéma de l'externalité néoclassique » (Damian, 2012). Damian appuie notamment sa critique théorique sur deux autres articles (Godard & Sachs, 1978; Greffe, 1978) qui mettent en évidence les « ambiguïtés » (Greffe, 1978) du concept d'externalité, qui témoigneraient de « l'inadéquation de la position néo-classique » (Godard & Sachs, 1978) en matière d'environnement. En effet, pour ces auteurs, le concept d'externalité a émergé pour tenter de corriger la théorie marginaliste de l'ENC, en créant un concept théorique, alors qu'il s'agit pour les auteurs « d'un révélateur des défaillances expérimentales d'autres concepts » (Greffe, 1978). Cette critique porte donc sur l'absence de remise en question du cadre de l'économie standard face à l'apparition de défaillances de grande ampleur, la réduction de problèmes systémiques nécessitant de fortes transformations sociétales à un problème pouvant être réglé par la mise en place d'une politique de type taxe, et non sur la question de l'évaluation monétaire des externalités, ce qui constitue un débat en soi.

A un niveau plus local, la mise en place des analyses coûts-bénéfices (ACB) des projets, incluant des externalités environnementales est un outil de politique publique depuis les années 1930 aux États-Unis et depuis les années 1990 en Europe et Grande-Bretagne (Turner, 2007). L'article de Turner souligne que les ACB prennent en compte les services écosystémiques, mais également que les dommages aux services écosystémiques peuvent faire l'objet d'une compensation « acceptable », en principe sous la forme d'une compensation réparatrice écologique, mais qui peut être envisagée dans un domaine complètement différent (Turner, 2007). Dans cette optique, l'utilisation des externalités serait clairement en ligne avec l'utilisation de Stigler du théorème de Coase, et n'atteint plus un objectif de diminution des dommages portés aux sphères sociales et environnementales. Cette considération souligne également que l'application concrète des externalités, comme les services écosystémiques, n'est évidemment pas soumise à la finalité envisagée par leurs auteurs, comme dans tout travail de recherche. Notamment, les limites clairement soulignées par Costanza de la substitution du capital naturel (Robert Costanza et al., 1997) ne trouvent pas de traduction opérationnelle dans l'analyse coûts-bénéfices, si ce n'est que la compensation ne serait pas envisageable en cas de valeur « très élevé » d'un écosystème (Turner, 2007). Un autre type de mécanisme à l'échelle locale pour la prise en compte des externalités est illustré par les « Paiements pour Services Environnementaux »[50] (PSE) qui « ont pris une importance croissante dans les politiques de conservation des ressources naturelles contemporaines » (Chervier et al., 2016). Sur la base d'une revue de 102 articles concernant l'analyse des dispositifs de paiement, les auteurs « Schomers et Matzdorf (2013) […] concluent que les PSE qui correspondent à la définition de Wunder (2005) ne représentent que 10 % des cas. Les PSE sont souvent mis en place sous forme de politique publique financée par des taxes ou des subventions. L'intervention de l'administration publique est si significative que ces auteurs parlent d'internalisation « pigouvienne » pour qualifier ces PSE » (Chervier et al., 2016). Ainsi, même pour un dispositif plus proche du concept de Coase des externalités (contractualisation directe entre les émetteurs et bénéficiaires), la mise en pratique du concept tend à faire intervenir des intermédiaires et dans la plupart des cas, l'État.

[50] « La plupart des organisations qui promeuvent cet outil, et en premier lieu la Banque mondiale (Pagiola et Platais, 2007), retiennent la définition suivante : un PSE est '' une transaction volontaire, où un service environnemental (SE) bien défini — ou un usage pouvant assurer la fourniture de ce SE — est « acheté » par (au moins) un client de SE à (au moins) un fournisseur de SE, si — et seulement si — le fournisseur de SE assure la fourniture ininterrompue du SE (conditionnalité) '' » (Wunder, 2005 in Chervier et al., 2016)

Il a donc été vu dans ce paragraphe que les approches actuelles du problème des externalités se référaient essentiellement au cadre développé par Pigou pour la prise en compte des défaillances de marché à travers des taxes, mais également d'autres dispositifs similaires (ACB, PSE, marché de droits à polluer), visant à internaliser les externalités au marché. Une des critiques qui a été formulée à l'encontre de l'utilisation du concept des externalités porte sur l'absence de remise en question du cadre de l'économie standard face à l'apparition de défaillances de grandes ampleurs, ainsi que sur la réduction de problèmes systémiques nécessitant de fortes transformations sociétales à un problème pouvant être réglé par la mise en place d'une politique de type taxe. Cette critique est particulièrement intéressante pour la thèse en ce qu'elle est également applicable à la question de l'épuisement des ressources comme le montre le paragraphe suivant.

2.3. Externalités et épuisement des ressources

Après avoir défini la notion d'externalité et souligné que la mobilisation de cette notion est dominée par la référence au cadre pigouvien, ce paragraphe s'intéresse au lien entre l'approche des externalités et l'épuisement des ressources métalliques. Dans un premier temps, ce paragraphe passe brièvement en revue les analyses existantes concernant les externalités des ressources. Puis dans un deuxième temps il est souligné que l'absence de lien entre l'épuisement et les externalités peut potentiellement être expliquée par l'absence d'intérêt porté à la question de l'épuisement physique dans le cadre d'analyse néoclassique. Dans un troisième temps, il est souligné que la définition même du concept d'externalité exclut de l'analyse des phénomènes qui sont néanmoins identifiés comme des pertes pour la société. Enfin, la définition de l'épuisement et des externalités de l'ENC, conduit l'autrice à privilégier l'appel à un autre cadre théorique pour une évaluation des coûts liés à l'épuisement des ressources.

Comme vu précédemment, il n'existe pas d'approche établie d'évaluation économique de l'épuisement des ressources qui ferait le lien entre épuisement physique de la ressource et augmentation des impacts sociaux et environnementaux. Dit autrement, à la connaissance de l'autrice, il n'existe pas d'évaluation des externalités (pigouviennes) de l'épuisement des ressources. Cependant, des études sur les externalités de l'exploitation des mines existent. Ainsi, dans les méthodes d'ACV, il existe au moins deux propositions pour évaluer ces externalités (Gérand et al., 2018; Klinglmair et al., 2014) : EPS (hypothèse d'une extraction durable d'une ressource à la teneur moyenne de la croûte terrestre, puis évaluation des externalités), ECOTAXES 2002 (considère que les taxes de l'extraction des ressources sont le reflet des externalités). Ainsi que des ACB par projet, particulièrement dans des pays riches exploitant des ressources métalliques, tel que l'Australie (Gérand et al., 2018). Par ailleurs, un courant de pensée en économie s'attache à l'étude conjointe de la question de la disponibilité des ressources et des externalités environnementales : *Environmental and natural resource economics* (Hoel & Kverndokk, 1996; Krabbe & Heijman, 2012; Tietenberg & Lewis, 2016). Ce champ d'étude met sous une même bannière l'économie environnementale (qui cherche à régler les problèmes environnementaux en internalisant les externalités) et l'économie des ressources (qui cherche à prendre en compte le problème de l'épuisement à travers la question de l'efficience de l'allocation intertemporelle des ressources), c'est-à-dire finalement la prise en compte des problématiques environnementales et d'épuisement des ressources par l'économie néoclassique. Cependant, l'objet d'étude des auteurs de ce courant est l'impact de la mise en application (ou l'absence de mise en application) de politiques prenant en charge les externalités (généralement le changement climatique), sur le chemin de prix et la vitesse de consommation des ressources. Il s'agit donc d'étudier comment co-évolue la question de la disponibilité économique de la ressource et des externalités. Il ne s'agit pas d'étudier comment l'épuisement physique impacte les externalités. Ainsi, Tietienberg & Lewis après avoir synthétisé les théories néoclassiques concernant les conditions (droits de propriétés, évolution des coûts marginaux, etc.) dans lesquelles l'allocation des ressources par le marché est optimale, explique

pourquoi, selon lui, la question des coûts environnementaux de l'extraction implique de combiner les analyses de l'économie environnementale et de l'économie des ressources : « *One of the most important situations in which property rights structures may not be well defined occurs when the extraction of natural resource imposes an environmental cost on society that is not internalized by the producers. The aesthetic costs of strip mining, the health risks associated with uranium tailings, and the acids leached into streams from mine operations are all examples of associated environmental costs. […] it is conceptually important, since it forms one of the bridges between the traditionally separate fields of environmental economics and natural resource economics* » (Tietenberg & Lewis, 2016, p. 136). Pour l'auteur, le danger d'étudier ces problématiques séparément réside dans le fait qu'ignorer les externalités provoquées par l'extraction a un impact sur l'épuisement de la ressource. En effet, d'après les théories mobilisées par l'auteur (dérivées du modèle d'Hotelling), cela maintient un prix de la ressource trop bas et donc la vitesse d'extraction des ressources est trop élevée et une part trop importante de la ressource est exploitée (Tietenberg & Lewis, 2016, p. 138). L'objectif est donc d'étudier l'internalisation des externalités dans le but de rétablir l'allocation optimale des ressources et de corriger la rente de rareté obtenue. Il s'agit de mieux répartir l'allocation dans le temps et d'obtenir une rente de substitution optimale et non de diminuer les coûts sociaux et environnementaux de l'exploitation ou de diminuer les pertes liées à l'exploitation de la ressource dans de mauvaises conditions.

Il n'y a donc pas de lien établi entre externalités de l'exploitation des ressources métalliques et épuisement physique de la ressource dans l'approche de l'économie environnementale. Ceci est cohérent avec une approche néoclassique des problèmes environnementaux. En effet, comme cela a été vu dans le chapitre 1, dans un respect strict du cadre de pensée néoclassique le lien ne peut pas être fait entre augmentation des impacts d'une part et augmentation de l'épuisement physique d'autre part, tout simplement parce que l'épuisement physique de la ressource ne constitue pas un sujet d'étude en soi de l'économie néoclassique. L'épuisement est considéré à travers la question de la disponibilité économique et de l'allocation optimale de la ressource dans le temps, et les impacts environnementaux sont étudiés séparément à travers les externalités. L'épuisement physique est exclu du cadre de réflexion de l'allocation optimale des ressources comme cela a été vu au chapitre 1, et l'épuisement physique ne peut pas non plus être considéré comme une externalité. En effet, dans le cadre de l'ENC, les externalités s'expliquent par l'absence de propriété privée et de prix, « deux conditions essentielles à la création d'un marché. […] [Il s'agit donc de les] ramener […] à une catégorie économique pour installer les conditions d'émergence d'une offre et d'une demande à même de créer de la rareté [, ce qui] doit aussi permettre de réduire la consommation de la ressource concernée ou de favoriser la production de produits de substitution » (Gadrey & Lalucq, 2015, p. 19-20). Or les ressources métalliques contrairement aux ressources environnementales font déjà l'objet d'une propriété privée à travers la mise en place de concessions par les états et ont déjà un prix. Leur utilisation (ou plus exactement leur allocation) devrait déjà être optimale selon la théorie néoclassique.

De plus, l'épuisement physique des ressources non-renouvelable est un phénomène généralisé, intrinsèquement lié à la production de valeur depuis la révolution industrielle, ce n'est donc pas un phénomène ponctuel ou accidentel. C'est donc typiquement un cas qui ne rentre pas dans « le schéma de l'externalité néoclassique » (Damian, 2012), et qui est « un révélateur des défaillances expérimentales d'autres concepts »(Greffe, 1978) comme cela a été souligné par Damian sur les externalités du changement climatique.

La concentration du cadre de l'économie environnementale sur les défaillances de marché exclut de fait des problèmes qui ne seraient pas dus à une absence de marché, mais à d'autres facteurs : organisation de la production (structure de gouvernances, organisation internationale de la filière, etc.) et à l'institutionnalisation de certains mécanismes (stratégie de production de masse,

recherche systématique du coût le plus bas, réglementation, etc.). Les pertes de matières tout au long des filières métalliques que nous avons documentées au paragraphe 1.1.4. du chapitre 1, qui sont liées, comme l'a très bien documenté (Allwood, 2014), à l'organisation des filières et à la recherche d'économies d'échelle sont un bon exemple du type d'angle mort créer par le paradigme des externalités. Ces pertes de matières considérables de ressources non renouvelables (faisant l'objet d'un marché) mettent en lumière l'échec de l'allocation optimale des ressources plutôt que l'apparition d'une défaillance ponctuelle liée à l'absence de prix. Ce constat a déjà été fait sur d'autres problématiques qui ne rentrent pas dans le cadre des externalités au sens strict comme le problème de la sous-rémunération, « les coûts engendrés par les conditions de travail dans les ateliers textiles asiatiques, et qui restent à la charge des travailleurs et de leurs familles, ne sont pas considérés comme une externalité, mais comme le résultat de la confrontation entre offre et demande de main d'œuvre » (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, et al., 2016) ou de la « même manière, le gaspillage alimentaire n'est pas considéré comme une externalité par la théorie économique (sur le périmètre français, il a été estimé en 2016 par l'ADEME à 16 milliards d'euros par an, au prix de marché des denrées agricoles et alimentaires) »(Ademe, BASIC, AScA, 2017a).

Par ailleurs, les critiques du modèle néoclassique concernant l'épuisement des ressources non renouvelables dans une perspective de soutenabilité forte résumées au chapitre 1 s'appliquent de la même manière à la prise en compte des externalités. Ainsi, la perspective de la recherche d'une croissance durable définie comme la maximisation du bien-être des générations successives chez les néo-hotelliniens s'oppose à l'idée de la conservation des ressources naturelles pour les économistes écologiques. Cette constatation amène certains auteurs (N. Georgescu-Roegen, 1971; W. Kapp, 1963; Norgaard, 1990) à rejeter les modèles néoclassiques conçus dans un cadre où les moments du temps sont considérés comme équivalents comme n'étant pas capable de traduire les irréversibilités liées au phénomène de déplétion des ressources que ce soit des ressources métalliques ou des ressources naturelles. Cette irréversibilité, et le fait que la substituabilité ne puisse jouer qu'un rôle marginal comme solution à l'épuisement physique, rend en partie caduc l'intérêt de définir les externalités et l'épuisement comme un problème d'allocation de la valeur et des externalités de l'exploitation dans le temps. Dit autrement, dégager une rente de rareté et émettre un signal prix à travers l'intégration des externalités restent des moyens limités de prise en charge de l'épuisement physique et des impacts associés. Cela ne permet pas non plus de prendre en compte la possibilité que les générations futures aient plus besoin que nous de certaines ressources métalliques notamment dans la lutte pour le changement climatique. L'ancrage de la thèse dans une perspective de soutenabilité forte, qui subordonne la création de valeur à la sauvegarde des sphères biophysique et sociale, nous semble la seule à même de pouvoir prendre en compte les phénomènes irréversibles de déplétion des ressources métalliques et son lien avec l'augmentation des impacts sociaux et environnementaux de l'exploitation.

Le domaine d'étude des externalités est aujourd'hui l'approche la plus développée de prise en compte des effets économiques des impacts sociaux, et surtout environnementaux, de la production. L'évaluation monétaire dans le but de révéler les coûts cachés ou « *shadow costs* » (Robert Costanza et al., 1997) de la production à travers la mobilisation du concept d'externalités a ainsi pris une place importante, que ce soit au sein de l'économie environnementale ou de l'économie écologique à travers les notions de services écosystémiques monétarisés (Petit & Vivien, 2015) et c'est pourquoi elle a fait l'objet d'une discussion concernant son applicabilité au concept d'épuisement. Bien entendu, au-delà des critiques théoriques appliquées à ces concepts, tous les auteurs de l'économie environnementale et écologiques n'appliquent pas une définition au sens strict du concept d'externalité, ni de l'épuisement. Ce qui se traduit dans les faits par une grande hétérogénéité de l'application du concept notamment en termes méthodologiques (Ademe, BASIC, AScA, 2017a; CGSP, France Stratégue, 2013; Chervier et al., 2016; Turner, 2007). Cependant, comme nous l'avons vu, il n'y a pas aujourd'hui de travaux développés sur la question des coûts liés à

l'épuisement des ressources dans l'approche par les externalités. Donc plutôt que d'utiliser des concepts qui n'ont pas été pensés dans une approche de soutenabilité forte en leur appliquant des facteurs correctifs, il paraît préférable d'utiliser directement une approche différente.

Il a donc été vu dans ce paragraphe que l'approche par les externalités, ancrée dans l'économie environnementale, mais également largement utilisée par les économistes écologiques, ne prend pas en compte le lien entre déplétion (ou épuisement physique) et augmentation des impacts sociaux et environnementaux. De plus, il a été rappelé que, malgré la diversité des approches utilisées pour évaluer les externalités, le cadre conceptuel de l'économie néoclassique restait difficilement compatible avec la définition de l'épuisement telle qu'établie au chapitre 1. Ces constatations nous conduisent donc à rechercher un cadre conceptuel pour la prise en compte des coûts sociaux et environnementaux compatible avec la définition de l'épuisement établie au chapitre précédent, et avec une approche en soutenabilité forte.

3. Approche de l'épuisement dans le travail de K.W. Kapp et choix de ce cadre conceptuel pour la thèse

Dans ce paragraphe, il est montré en quoi l'approche des coûts sociaux dans le domaine de l'économie écologique, et particulièrement l'approche de Karl William Kapp (W. Kapp, 1963), économiste à la croisée de l'économie institutionnelle (au sens de la première école institutionnaliste) et de l'économie écologique, est compatible avec la définition de l'épuisement présentée au chapitre 1. A titre de préambule, il est rappelé que l'évaluation économique des impacts environnementaux et sociaux, sujette à de nombreuses controverses, ne fait pas l'unanimité au sein de l'économie écologique et il est également exposé pourquoi la thèse s'attache à réaliser une telle démarche. Ensuite, la définition des coûts sociaux au sens de Kapp est précisée et les principales différences avec le concept d'externalités sont soulignées. Enfin, l'approche de Kapp du coût social de l'épuisement est présentée et 3 types principaux de coûts sociaux liés à l'épuisement en sont dégagés.

3.1. Limites et avantages de l'évaluation monétaire, approches de l'économie écologique et du Basic

L'approche de l'épuisement des ressources fait consensus dans l'économie écologique, avec la reconnaissance par tous les auteurs de la complémentarité entre ressources et capital, des ressources entre elles, la prise en compte du caractère irréversible des dommages portés aux écosystèmes et de l'épuisement des ressources physiques. Cependant, ce n'est pas le cas de l'évaluation monétaire des impacts. L'évaluation monétaire est rejetée ou critiquée par une partie des économistes écologiques pour différentes raisons : le risque de commodification ou de marchandisation de la nature (Gómez-Baggethun & Ruiz-Pérez, 2011), pour son hégémonie sur tout autre système de valeur (Spash, 2008), son accaparement des termes du débat (Martinez-Alier, Munda, & O'Neill, 1998; Zografos & Martínez-Alier, 2009), l'existence de facteurs non monétarisables, la subjectivité des mesures (Laurans & Mermet, 2014), etc.

L'objectif initial de la thèse est de mettre au point une méthode d'analyse des coûts sociétaux (au sens de sociaux et environnementaux) liés aux activités économiques à l'échelle d'une filière de matière première minérale, apportant ainsi une contribution à la méthodologie établie par le Bureau d'Analyse Sociétale pour une Information Citoyenne (la société le Basic) en termes d'évaluation des coûts sociaux et environnementaux. Au vu de la spécificité des matières extractives en termes d'épuisement, la thèse s'est progressivement concentrée sur la question de l'épuisement. Mais l'objectif de consolider une méthode intégrée, au sens de la prise en compte des interactions entre sphère sociale, environnementale et économique, et analytique, au sens de l'identification des

causes systémiques et structurelles de ces impacts, demeure. Le Basic considère qu'un des leviers de la mise en place d'un développement soutenable réside dans une meilleure information sur des coûts sociétaux liés aux activités économiques afin de nourrir le débat public sur les modèles de production ou de consommation qui permettent de réduire ces coûts et d'assurer la soutenabilité de nos sociétés. Pour cela, le Basic produit aussi bien des analyses des impacts environnementaux, économiques et sociaux des modes de production et de consommation, que des évaluations monétaires de ces impacts à chaque fois que cela est possible. Le Basic est conscient des limites de cette approche, mais conçoit la monétarisation des impacts comme un moyen de comparaison entre différents modes de production et de consommation, et comme une mise en lumière des relations existant entre les questions économiques et sociétales. Cette approche permet en effet de mettre en regard les impacts économiques positifs de ces filières avec les coûts non pris en charge par les acteurs économiques et répercutés sur la société, et venir ainsi questionner les modèles de production qui ne sont pas « efficient » dans une approche de coût complet. En comparant plusieurs filières existantes, on évite l'écueil de « confondre monétarisation [et] marchandisation » (Gadrey et Lalucq, 2015). En effet, il s'agit moins de calculer le juste prix des biens de consommation que de rendre visibles aux citoyens, à la société civile, aux pouvoirs publics et aux acteurs économiques les raisons pour lesquelles les secteurs génèrent des coûts sociétaux aujourd'hui, de manière à identifier des leviers d'action à un niveau socio-institutionnel.

Cependant, si l'existence d'un unique indicateur peut être parlante pour comparer plusieurs scénarii alternatifs pour une même filière, elle pose plus de questions lorsqu'elle est appliquée à un seul modèle et permet la compensation d'impacts négatifs par des impacts positifs répartis inégalement. Il est donc envisagé de mettre au point une méthodologie dont le résultat final permettra plusieurs niveaux de lecture : la description et l'évaluation de chaque type d'impacts permettant notamment la prise en compte d'impacts non monétarisables, voire non quantifiables, la comparaison de plusieurs scénarii de coûts sociaux. Intégrée dans un ensemble plus large d'indicateurs non monétaires, et à condition qu'elle soit conçue et utilisée comme un moyen d'information et de débat - et non pas comme une fin en soi - l'évaluation des coûts sociétaux peut ainsi permettre d'analyser la (non) durabilité des modes de production et de consommation pour tendre vers une société « zéro coûts sociétaux » (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, et al., 2016). Pour cela le Basic, prend appui sur les apports conceptuels de l'économie des institutions et de l'économie écologique (Robert Costanza, 1992; Jackson, 2009; W. Kapp, 1963; Polanyi, 1944; Rockström et al., 2009; Veblen, 1923) peu exploités à ce jour, pour ancrer l'analyse économique dans son contexte environnemental, social, culturel et historique.

Enfin, si une approche en termes de comparaison ayant pour objectifs d'identifier les causes de l'apparition des coûts sociaux et d'identifier les modèles à promouvoir ou à réformer permet d'éviter certains écueils liés à la monétarisation (risques de marchandisation des biens communs, compensations ne réduisant pas les impacts de départ, approche purement « accidentelle » des externalités, etc.), elle reste soumise à certains nombres d'autres critiques (approche normative, diffusion du langage et des méthodes économiques au-delà de la sphère économique etc.). De plus, malgré toutes les précautions prises sur la contextualisation de l'évaluation et l'attachement porté à l'étude des dynamiques générant ces coûts sociaux, c'est-à-dire la distinction opérée par le Basic et l'autrice de ces lignes entre monétarisation, marchandisation et financiarisation, cela ne protège en rien d'une utilisation des évaluations monétaires obtenues en dehors de leur contexte.

3.2. Définition du concept de coût social

Kapp définit les coûts sociaux comme l'« ensemble des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble » générés par « les modes de production » dont les acteurs privés « ne sont pas tenus responsables » et qui « auraient pu être évités » (W. Kapp, 1963). Il est à noter que le champ couvert par le terme de coût social diffère donc

de celui de Pigou pour qui le terme de « coût social » signifie « coût total », à savoir, la somme des coûts privés et des externalités (voir Figure 24).

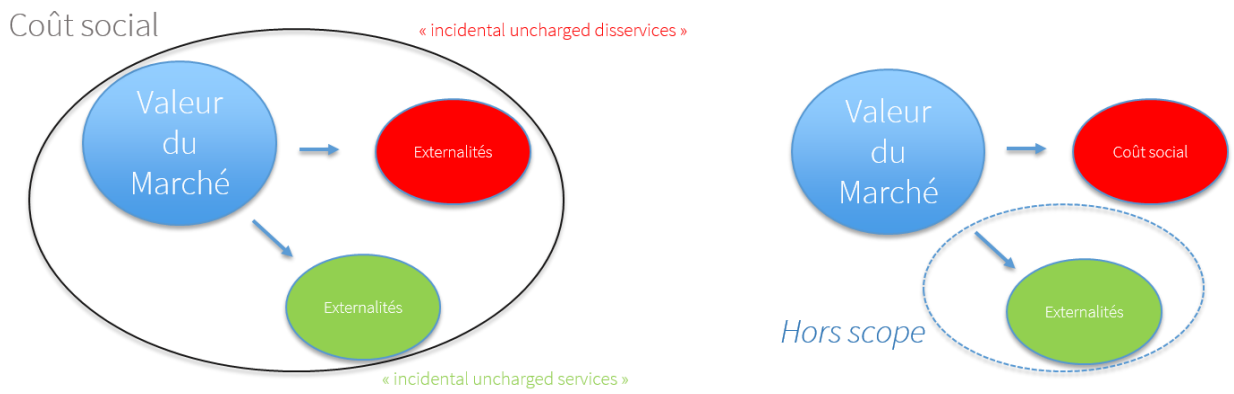


Figure 24 : Différence de périmètre entre le coût social selon Pigou (à gauche) et selon Kapp (à droite). Source : autrice

Kapp s'inscrit dans le courant de pensée de l'économie institutionnelle ; il a prolongé les travaux de deux de ses principaux théoriciens, T. Veblen et K. Polanyi (Polanyi, 1944; Veblen, 1904), et contribué à la remise en question des théories fondées sur la notion d'équilibre optimum, stable et mécanique du système économique et non des coûts sociaux au sens de Pigou ou de Coase, même si anglais le terme « *Social costs* » peut aussi bien faire référence au cadre Pigouvien qu'à la réflexion des économistes institutionnels.

Selon Kapp, la comptabilité basée sur le marché ne peut pas pourvoir aux besoins sociaux, ce que Berger appelle « *Kapp's impossibility thesis* » (S. Berger, 2012), faisant référence au *socialist calculation debate*[51], auquel Kapp a apporté sa contribution (S. Berger, 2017). C'est pourquoi, bien que « le travail de Kapp trouve une source majeure d'inspiration dans l'argumentaire de Pigou, Kapp a critiqué le fait que Pigou ait contraint le problème des coûts sociaux à rentrer dans le cadre conceptuel de l'économie néoclassique, alors que celui-ci n'a jamais été pensé pour adresser les phénomènes hors-marché, comme la pollution » (S. Berger, 2012). Pour Kapp « les économistes néoclassiques invoquent l'apparition de l'économie du bien-être comme preuve du fait que la théorie de la valeur a dépassé le stade atteint à l'époque de Wicksell et Wicksteed, et que de nombreux coûts sociaux [analysés dans son ouvrage] ont déjà été reconnus. C'est exact en un sens, […] Ce qui n'est pas reconnu cependant, c'est que les déséconomies externes et les bénéfices sociaux ne sont pas des cas isolés, mais des phénomènes répandus et inévitables dans les conditions d'entreprise privés. […] L'identification implicite des coûts et bénéfices de l'entrepreneur avec le total des coûts et bénéfices continue à régir la méthodologie de l'économie théorique » (W. Kapp, 1963, p. 43-44). Les coûts sociaux sont donc pour lui des effets inhérents au modèle économique de libre marché : parce qu'il pose la recherche de croissance et de profits à court terme au cœur du système d'entreprises, et que les coûts ne prennent pas en compte les coûts sociaux de la production, ce dernier génère tout à la fois des impacts environnementaux et sociaux croissants, et

[51] La définition des externalités par l'école de Chicago (voir paragraphe 2.1) s'est faite en réaction aux écrits de l'école institutionnaliste américaine, notamment à la théorie de Kapp des coûts sociaux. En réalité, ce débat théorique remonte au *socialist calculation debate* datant des années 1920, 1930 opposant Mises qui défend l'impossibilité de la mise en place d'une économie rationnelle sous le socialisme, à Weber qui oppose les rationalités formelle et substantielle. Dans ce cadre Kapp souligne la rationalité formelle de l'allocation des ressources par le marché, rationalité qui apparaît limitée dans la recherche d'un optimum sociale de l'allocation des ressources (S. Berger, 2017).

leur non prise en charge par ceux qui en sont à l'origine, au détriment des acteurs externes, individuels ou collectifs.

Le qualificatif d'« évitable » utilisé par Kapp dans sa définition des coûts sociaux sert à souligner que ces coûts peuvent être supprimés grâce à la mise en place de mesure adéquates. Ainsi, a contrario du courant néolibérale (école de Chicago), les travaux de Kapp sur les coûts sociaux ont « explicitement rejeté l'idée que la fin (c'est-à-dire la recherche d'un maximum d'efficacité) justifiait les pertes subies par la société […]. Kapp a également remise en question l'idée que les coûts sociaux ne pouvaient pas être éliminés en montrant que l'histoire donnait de nombreux exemples de luttes couronnées de succès contre les coûts sociaux » (S. Berger, 2012). Selon Kapp, les coûts sociaux peuvent être évités par la « [transformation des] coûts sociaux en coûts privés par une action politique » (W. Kapp, 1963, p. 96).

Le caractère systémique et évitable des coûts sociaux pourrait apparaître comme contradictoire. Pour éviter les coûts sociaux Kapp pense en effet qu'il « faudrait réformer radicalement la législation sociale et la structure de la société » (W. Kapp, 1963, p. 96). Ainsi, il préconise :

- De susciter des changements institutionnels en profondeur (éducation, réglementation, gouvernance démocratique de la science et de la technologie…) ;
- D'agir en amont (*ex ante*) plutôt que d'essayer de réparer les dommages après coup (*ex post*). Pour Kapp les politiques économiques mettent en place de nombreuses 'corrections' ex post plutôt que de calculer les dommages possibles ex ante (S. Berger, 2012) pour proposer des politiques adaptées ;
- D'établir des « normes minimales » environnementales, sanitaires, sociales (W. Kapp, 1963, p. 461) ;
- De renverser la charge de la preuve sur les acteurs économiques (ceux-ci doivent prouver que leur activité ne provoque pas de dommages pour des tiers).

L'identification et l'évaluation des coûts a donc pour but d'interroger les causes, et les effets des systèmes institutionnels sur ces coûts sociaux pour les besoins de la formulation d'une politique minimisant, voire excluant l'apparition de coût sociaux, à l'échelle du cas d'étude (W. Kapp, 1963, pp. 200–205). L'objectif actuel de l'analyse des coûts sociaux est de dépasser l'analyse des politiques publiques à travers le prisme de l'analyse de l'efficacité de telle ou telle allocation ou de la croissance des revenus et d'analyser les causes des coûts sociaux, comme par exemple celles de la crise financière de 2008 (Ramazzotti et al., 2012). Si chaque auteur adapte la définition de K.W. Kapp selon l'enjeu de politique publique ou le coût social étudié, l'un des points clefs de l'analyse des coûts sociaux reste d'évaluer en quoi les institutions ont une importance dans l'apparition ou la mitigation des coûts sociaux et qui elles avantagent.

Par ailleurs, pour Kapp, comme pour les auteurs se réclamant de la lignée de son concept de coûts sociaux (Ramazzotti et al., 2012), les coûts sociaux ont une dimension monétaire, mais ne sont pas traduits uniquement en termes monétaires. Ainsi, Kapp souligne que la prise en compte des coûts sociaux peut être qualitative : « de nombreux coûts sociaux se laissent exprimer en argent, mais beaucoup d'autres […] ont nettement un caractère qualitatif et c'est ainsi qu'il convient de les évaluer » (W. Kapp, 1963).

Le Tableau 15 synthétise les principales différences entre l'approche des externalités et l'approche des coûts sociaux au sens de Kapp. Ce tableau est tiré des travaux de Sebastian Berger, qui a mené un travail exhaustif de recherche en histoire de la pensée économique sur les travaux de Kapp (S. Berger, 2012, 2017; Sebastian Berger, 2008b, 2008a; Sebastian Berger & Forstater, 2007).

Tableau 15 : Comparaison des approches des externalités et des coûts sociaux. Source : adapté de S. Berger, 2017

Concepts	Externalités		Coûts Sociaux
École de pensée	Néolibérale	Néoclassique	Institutionnelle
Définition	Accidentelles, perturbation mineure du système		Transfert systématique de coûts dus au système économique ; problèmes sociaux et environnementaux majeurs
Perspective	Échelle « micro », approche individualiste		Échelle « micro » ou « macro », analyse institutionnelle
Nature des solutions	Ad hoc, ex post		Systémiques, ex ante
Principales solutions	Négociation, assurance sociale, juridique	Taxes	Contrôle social, normes de sécurité, principe de précaution, minima sociaux
Approche d'économie politique	Anti-interventionniste, le pouvoir de remédier aux problèmes est entre les mains des acteurs du marché	Légèrement interventionniste mais sans que les mécanismes d'allocation des ressources ne soient remis en question	Les mécanismes d'allocation des ressources sont fortement contrôlés : planification, prévention, interdictions, contrôles, contre-pouvoirs
Monétarisation	Systématique	Systématique	Tous les indicateurs de coûts sociaux ne sont pas monétaires

Pour Kapp, l'évaluation de coûts sociaux doit se faire le plus possible en références à des « normes objectives de minimums sociaux » ou environnementaux « permettant de mesurer les coûts sociaux en écarts à ces minimums », ou en référence à un « optimum technique pragmatique » (K. W. Kapp, Sachs, Richard, & Bronstein-Vinaver, 2015, p. 65). Cela permet selon lui d'éviter d'évaluer les coûts « d'après les propres normes et préférences du chercheur » (W. Kapp, 1963). Cette définition, comme celle du caractère « évitable » des coûts sociaux pose de nombreuses questions dans la mise en application comme nous le verrons dans le paragraphe 5.2.2.

Par ailleurs, Kapp considère l'irréversibilité du phénomène d'épuisement : « comparés aux coûts sociaux potentiels qui peuvent être occasionnés par un épuisement économiquement irréversible, les coûts effectifs nécessaires pour prévenir ces conséquences sociales préjudiciables sont relativement faibles » (W. Kapp, 1963). Et celui des dommages environnementaux et sociaux. C'est pourquoi les actions préventives (*ex ante*) sont privilégiées. Par ailleurs, la présence de pertes de matières est prise en compte dans le cadre de l'étude des coûts sociaux au sens de Kapp (comme cela sera détaillé au point 3.4.2) à travers le concept de déséconomies : « une approche institutionnelle du problème de l'utilisation des ressources révèle l'existence de fortes déséconomies au sens d'un gaspillage évitable sur le plan technique et économique » (Kapp, 1963).

Enfin, l'épuisement des ressources est directement considéré par Kapp comme un coût social généré par les activités de production. Ainsi, Kapp liste de manière non exhaustive les coûts sociaux suivants dans son ouvrage « Les coûts sociaux de l'entreprise privée » (W. Kapp, 1963) :

- Les atteintes à la santé humaine : accidents du travail et maladies professionnelles ;
- La destruction ou la détérioration des ressources naturelles : pollution de l'air et de l'eau ;

- Les pertes sociales liées aux investissements excessifs et à la surcapacité ;
- Surexploitation des ressources renouvelables et épuisement des ressources non renouvelables ;
- Des coûts sociaux plus larges et plus complexes : coûts sociaux liés aux changements techniques et au chômage, coûts sociaux de la concurrence sans merci, de la mise hors d'usage des équipements et de la promotion des ventes, pertes sociales dues au ralentissement du progrès technique, ainsi que de la concentration excessive des activités économiques dans un petit nombre de centres industriels.

Bien que Kapp soit rarement cité en économie écologique, à quelques exceptions près (Norgaard, 1985), on peut donc dire que son approche des coûts sociaux, à travers sa prise en compte de l'irréversibilité et des pertes est compatible avec cette école de l'économie. Pour modérer cette constatation, il faut souligner que, comme c'est souvent le cas dans les approches des évaluations monétaires des impacts de la production, l'environnement (ou la sphère biophysique) est pris en compte à travers son interaction avec la sphère sociale. Ainsi les dommages environnementaux sont principalement considérés à travers les dommages sur la santé et les pertes d'usages que cela engendre pour la société. Cependant, cette approche utilitariste de la nature est palliée dans l'approche de Kapp par une forte prise en compte de l'irréversibilité des pertes et dommages portées à la sphère biophysique, qui amène l'auteur à se placer dans une perspective de long terme et dans une approche préventive. Autrement dit, si dans la définition des coûts sociaux de Kapp, c'est bien un coût social (et non environnemental) qui est évalué, l'approche préconisée de prévention, voire la mise en place du principe de précaution face à l'incertitude et la complexité des conséquences d'une dynamique d'épuisement des ressources naturelles, conduit Kapp à des solutions qui sont proches de la prise en compte de la sphère biophysique « pour elle-même ».

Il a donc été vu que les coûts sociaux sont définis par Kapp comme l'« ensemble des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble » générés par « les modes de production » dont les acteurs privés « ne sont pas tenus responsables » et qui « auraient pu être évités » (W. Kapp, 1963). Kapp considère les coûts sociaux comme un problème systématique dû à leur absence de prise en compte dans les coûts de la production et non comme un effet accidentel ou ponctuel. Néanmoins, ces coûts restent évitables si l'on entreprend de « réformer radicalement la législation sociale et la structure de la société » (W. Kapp, 1963, p. 96). Kapp s'inscrit dans le courant de l'économie institutionnelle et en cela il s'attache à interroger les causes de l'apparition de ces coûts, et à analyser les effets des systèmes institutionnels sur ces coûts sociaux. Pour mener à bien cet objectif analytique des pertes et dommages sociaux, le recours à l'approche monétaire est utile, mais n'est pas systématique, certains coûts sociaux étant mieux décrits par une approche quantitative non monétaire ou qualitative. Enfin Kapp, identifie dès la formulation de son concept l'épuisement des ressources non renouvelables comme un coût social.

3.3. Causalité circulaire cumulative et approche en système ouvert

Le paragraphe précédent a défini les coûts sociaux au sens de Kapp et souligné entre autres l'attachement de Kapp à interroger les causes de l'apparition de ces coûts, et l'analyser des effets des systèmes institutionnels sur ces coûts sociaux. Pour cela Kapp mobilise en particulier un concept, celui de causalité circulaire cumulative (CCC), qu'il partage avec Myrdal et Polanyi (S. Berger, 2017). Nous verrons ici dans un premier temps que le concept de causalité circulaire fait référence à la notion d' « accélération » ou de « cercle vicieux » de l'apparition des coûts sociaux, et dans un second temps que leur caractère cumulatif fait référence à l'institutionnalisation des mécanismes à l'origine de ces cercles vicieux. Dans un troisième temps, l'ancrage de ce concept dans l'approche en système ouvert est souligné.

Kapp souligne dans son ouvrage sur les coûts sociaux que le « principe de la causalité cumulative ou circulaire, qui souligne l'interaction de plusieurs facteurs faisant avancer le système social dans le sens de l'impulsion initiale, mais plus rapidement, constitue la principale hypothèse causale de l'étude des coûts sociaux et son cadre conceptuel général. »(W. Kapp, 1963, p. 68). Myrdal fait intervenir la notion d'accélération et d'éloignement de la position d'équilibre d'un système pour expliquer la notion de circularité des CCC (S. Berger, 2017). Cette notion d'accélération se comprend comme associée à des phénomènes de boucle de rétroactions[52]. Si cette notion est déjà bien connue dans la documentation des processus naturels (par exemple le changement climatique fait fondre les glaces ce qui diminue l'albédo terrestre et augmente par conséquent le changement climatique), il est plus difficile de percevoir la notion « d'accélération » dans l'interaction entre des phénomènes sociaux complexes et qui ne sont pas forcément continus. Il s'agit donc de mettre en lumière des interactions qui viendraient renforcer des coûts sociaux déjà existants, mais en abandonnant l'approche mécaniste de la modélisation. C'est-à-dire que les causalités circulaires mise en évidence sont relatives à un cas d'étude donné, à une géographie donnée, et à un moment donné et ne peuvent pas permettre d'établir des régularités permettant la modélisation de ces phénomènes.

Le caractère cumulatif des CCC peut être compris en lien avec l'approche institutionnelle de Veblen. En effet, Kapp fait appel à des concepts de Veblen pour envisager les processus de renforcement des institutions[53] : « le processus d'évolution culturelle et les processus économiques ne sauraient être compris qu'en fonction du principe d'une séquence cumulative de causes et d'effets. La séquence doit être considérée comme infinie, non téléologique et indépendante des désirs humains, mue par une espèce d'inertie institutionnelle plutôt que par une tendance vers l'équilibre partiel ou général (Watkins 1958 « Veblen's view of cultural evolution ») » (Kapp, 163). Le caractère cumulatif des CCC peut être compris comme l'ancrage dans les institutions des boucles de rétroaction. L'inertie au changement qui tend à faire cumuler la causalité circulaire. Par exemple, comme nous le verrons ci-après, selon Kapp, l'institutionnalisation de la préférence pour le présent tend à augmenter le processus d'épuisement. Cependant, si « le rejet d'une tendance vers la position d'équilibre [en économie] et la conception des processus culturelles et économiques comme sans fin, non-téléologiques, et affectés par l'inertie institutionnelle » (S. Berger, 2017) réunissent les travaux de Kapp, Myrdal et Veblen, Berger souligne que le concept de CCC est différent du concept de causalité cumulative de Veblen. En effet, chez Veblen le changement cumulatif ne prend pas en compte l'idée d'auto-renforcement ou même de tendance (S. Berger, 2017), contrairement aux CCC telles qu'appliquées aux coûts sociaux.

Ainsi, comme le résume Kapp, « le principe de causalité cumulative ou circulaire met l'accent sur le fait que les processus sociaux sont marqués par l'interaction de plusieurs variables, tant « économiques que « non-économiques » dont les effets combinés éloignent le système de la position d'équilibre. En effet, au lieu de provoquer une tendance de stabilisation spontanée, les

[52] Une rétroaction désigne l'action en retour d'un système à la modification d'un paramètre. Si la réponse du système amplifie le phénomène, on parlera alors de rétroaction positive. Si elle l'atténue, on parlera à l'inverse de rétroaction négative. Une boucle de rétroaction est un cycle de processus qui agissent en chaîne. Une boucle de rétroaction positive induit que toutes les rétroactions entre les différents chaînons conduisent à amplifier la perturbation, qui modifie l'équilibre entre les chaînons.

[53] Il s'agit ici de l'institution au sens de Veblen. Dans son approche, la société en général et l'économie en particulier sont des ensembles évolutifs d'institutions. Thorstein Veblen définit la notion d'institution comme des habitudes de pensées et d'actions dominantes dans la communauté sociale. Leur caractère essentiel est une inertie relative au regard de l'évolution sociale. Elles se sont formées dans le passé et en sont donc héritées. Les institutions découlent elles-mêmes des habitudes de vie : or comme celles-ci résultent des habitudes de pensée, la discipline de la vie quotidienne a pour effet de modifier ou de renforcer les institutions héritées dans le cadre desquelles vivent les hommes. La formation des institutions ou des habitudes de pensée résulte d'une interaction complexe entre différents niveaux et temporalités d'évolution.

processus sociaux semblent obéir à une sorte d'inertie sociale, qui a tendance à pousser le système dans le sens de l'impulsion initiale : '' Le système en lui-même ne s'achemine pas vers un équilibre quelconque entre les forces ; son mouvement, qui est constant, ne fait que l'éloigner de cette position. Normalement, un changement ne provoque pas des changements compensateurs, mais, bien au contraire des changements qui le renforcent et font avancer le système dans la même direction que le premier changement, mais beaucoup plus loin'' (G.Myrdal Rich lands and Poor 1957 p13 et 33-37) »(W. Kapp, 1963, p. 68).

Le principe de la causalité circulaire cumulative a pour ambition de faire le lien entre des considérations économiques abordées avec une approche institutionnelle et « ouverte » (interrelations changeantes, approche dynamique, etc.) et la prise en compte d'autres savoirs, notamment issus des sciences naturelles, comme les phénomènes biophysiques d'épuisement. Pour cela Kapp adopte « une approche intégrée et transdisciplinaire » telle que pensée dans l'approche en système ouvert. L'approche des systèmes ouverts[54] (Chick & Dow, 2005) permet la prise en compte des interactions entre différents phénomènes, dont l'étude dépend de champs de la connaissance différents, sans pour autant réduire leur portée. Par exemple, dans le cas de la prise en compte de phénomènes naturels irréversibles, il s'agit de voir en quoi ces phénomènes ont un impact et sont impactés par des phénomènes socio-économiques complexes, et non pas de réduire l'approche socio-économique de l'épuisement à sa seule dimension biophysique. Dit autrement, il s'agit autant d'éviter l'écueil de penser l'économie comme un système fermé en dehors de toute interaction, que d'une réduction de l'économie à des considérations biophysiques, ce que Nicolas Postel nomme le « réductionnisme biologique »[55] (Postel, 2007).

Nous pensons donc que l'ancrage dans ce cadre conceptuel permet de clarifier le lien entre différentes sphères étudiées dans l'analyse des coûts sociaux et dans l'analyse des causalités circulaires cumulatives. Ainsi les sphères biophysique et socio-économique sont bien entendues liées, mais les approches mobilisées pour les étudier ne sont pas les mêmes. La vision ainsi mobilisée de l'approche en système ouvert permet de mobiliser certaines critiques, notamment la critique du réductionnisme, mais avec une approche pragmatique qui ne rejettent pas les résultats existants dans l'étude des sphères biophysiques (physique, sciences de l'environnement, toxicologie, etc.) et dans l'étude des mécanismes sociaux et institutionnels (économie institutionnelle, économie écologique), mais les mobilisent dans un cadre cohérent.

Dans ce paragraphe il a été vu que pour interroger les causes de l'apparition et de l'augmentation des coûts sociaux, Kapp mobilise le concept de causalité circulaire cumulative (CCC), qu'il partage avec Myrdal et Polanyi (S. Berger, 2017). Ce concept de causalité circulaire cumulative fait référence à la notion d' « accélération » ou de « cercle vicieux » de l'apparition des coûts sociaux, et à l'institutionnalisation des mécanismes à l'origine de ces cercles vicieux qui fait avancer le système social dans le sens de l'impulsion initiale, mais plus rapidement. Pour étudier ces interactions complexes entre des phénomènes de différentes natures, Kapp s'appuie sur l'approche des systèmes ouverts. Il s'agira pour nous de mettre en lumière des interactions qui viendraient

[54] Il existe plusieurs approches des systèmes ouverts. Il est fait référence ici à l'approche de (Chick et Dow, 2005), qui met l'accent sur la compréhension des systèmes sociaux comme ouverts et dynamiques, mais structurés par des institutions, des habitudes, etc. Cette approche se distingue de celles des réalistes critiques qui rejettent la notion même de limites des systèmes posées comme moyen de construire des théories, ou même d'utiliser des modèles comme outil de théorisation.

[55] « Les institutionnalistes ont toujours refusé d'appliquer une méthodologie mécaniste aux sciences économiques, évitant par-là tout monisme méthodologique, et toute mécanisation de l'espace social. Il serait bien regrettable que leur mouvement les envoie finalement vers une autre forme de réductionnisme, le réductionnisme biologique, qui réduit toute action humaine à des pulsions et instincts physiquement identifiables » (Postel, 2007).

renforcer des coûts sociaux déjà existants, mais en abandonnant l'approche mécaniste de la modélisation. C'est-à-dire que les causalités circulaires cumulatives mises en évidence sont relatives à un cas d'étude donné, à une géographie donnée, et à un moment donné et ne peuvent pas permettre d'établir des régularités permettant la modélisation de ces phénomènes.

3.4.Les coûts sociaux de l'épuisement des ressources dans le travail de K.W.Kapp

Dans ce paragraphe, la définition du coût social (au sens de Kapp) de l'épuisement est développée. Dans un premier temps, la critique de l'approche néohotellinienne de l'épuisement par Kapp est brièvement présentée, car c'est sur cette critique que s'assoit l'analyse des coûts sociaux de l'épuisement dans les travaux de Kapp. Puis l'approche du coût social de l'épuisement dans les travaux de Kapp est présentée et 3 types principaux de coûts sociaux liés à l'épuisement en sont dégagés. Enfin, l'analyse de Kapp est mise en relation avec la définition de l'épuisement proposée au chapitre 1 et est proposée comme cadre d'analyse des coûts sociaux de l'épuisement.

3.4.1. Critique de l'approche hotellinienne de l'épuisement

Comme cela a été vu dans le paragraphe précédent Kapp émet une critique générale de la notion d'équilibre optimum, stable et mécanique du système économique. Cette critique est précisée par Kapp sur la question de l'épuisement des ressources. Il est à noter que le raisonnement de Kapp sur le modèle d'Hotelling et son lien avec les coûts sociaux est mené dans le chapitre consacré à la question des ressources renouvelables (W. Kapp, 1963, Chapitre 6). Ce chapitre de Kapp avance la thèse qu'il existe un « optimum technique pragmatique » du taux d'exploitation de la ressource prenant en compte leur renouvellement, ce qui n'est pas le cas pour les ressources non-renouvelables. Cependant, la dernière partie exposée ici sur l' « optimum fictif » traite de considérations qui s'appliquent également pour les ressources non renouvelables (entre autres métalliques étudiées dans la thèse).

Comme le rappelle Kapp (voir également chapitre 1), selon Hotelling, « l'optimum est identifié avec la maximisation de la valeur présente des profits futurs qui seront retirés du bien physique aussi longtemps que celui-ci pourra en rapporter. Bref, ce qui est préconisé, c'est d'estimer l'espérance de vie économique d'un bien physique et d'escompter le flux de profits de façon à les ramener à leur valeur actuelle » (W. Kapp, 1963).

Ainsi, Kapp met en question la capacité du marché à réguler l'utilisation des ressources : selon lui la définition de l'optimum avancée par l'ENC est purement formelle et non opérationnelle. Elle ne prend pas en considération les effets des systèmes institutionnels et des modèles de comportement autres que ceux fondés sur la maximisation. Tout d'abord, Kapp, comme de nombreux autres auteurs (voir chapitre 1), met en doute le fait que les producteurs aient réellement des informations détaillées sur l'épuisement futur de la ressource physique et que les prix soient fixés en fonction d'un calcul détaillé sur les profits futurs. Ainsi, pour appliquer cette règle il s'agit de calculer un optimum privé en estimant « l'espérance de vie économique d'un bien physique et [en escomptant] le flux de profits de façon à les ramener à leur valeur actuelle » (W. Kapp, 1963). Or, il y a peu de travaux visant à savoir si « le propriétaire individuel d'une ressource procède [réellement] au calcul de ce type, ce que la théorie préconise comme condition nécessaire pour atteindre l'optimum formel. En effet, il est plus probable que dans le domaine de l'utilisation des ressources comme dans de nombreux autres domaines, les entrepreneurs suivent diverses intuitions et habitudes qui constituent pour eux une espèce de test pragmatique personnel plutôt que de fonder leurs décisions sur une « maximisation » et sur un « calcul minutieux » »(W. Kapp, 1963).

Mais Kapp ne cherche pas à « réfuter le principe de 'maximisation' à la lumière des preuves empirique du contraire », mais bien à montrer que « l'optimum théorique formulé en termes du principe de « maximisation » ne convient pas pour définir un optimum social du taux d'utilisation

des ressources » (W. Kapp, 1963). Ainsi, même en estimant que les hypothèses sous-jacentes du modèle d'Hotelling soient vérifiées, Karl William Kapp pointe les limites d'un point de vue social de l'allocation optimale des ressources dans une logique hotellinienne. Il souligne que lorsque l'exploitation des ressources connues progresse en s'accompagnant d'une hausse des coûts et prix réels, cela peut effectivement stimuler le développement de techniques d'exploration nouvelles et plus efficaces qui permettront d'exploiter des qualités inférieures et des gisements précédemment sous-marginaux. Cependant, ceci n'amène pas à investir dans des produits de substitution comme le suppose Hotelling, mais au contraire à maintenir l'exploitation de ressources de moins en moins bonne qualité. A contrario en cas de baisse des prix, les ressources sont de plus en plus utilisées pour des « applications moins urgentes » (W. Kapp, 1963, p. 223).

Enfin, pour Kapp la mise en place dans la pratique de la règle d'Hotelling conduit nécessairement à l'utilisation de taux d'actualisation élevés. Pour montrer cela, Kapp s'appuie sur les travaux de Ciriacy-Wantrupt : « les profits nets futurs sont intrinsèquement indéterminables, car on ne peut connaitre ni les prix ni les coûts futurs » (W. Kapp, 1963). Cette impossibilité se traduit pour Ciriacy-Wantrupt par le fait que « les agents de la planification [de l'utilisation des ressources, donc ici les propriétaires,] vont essayer de modifier à l'avantage du présent la distribution des profits nets dans le temps » (W. Kapp, 1963). Cela tient à plusieurs facteurs pour Kapp : les facteurs de risque et d'incertitude sur les profits futurs, au fait que dans les calculs de ce genre l'horizon temporel est plus rapproché pour un propriétaire individuel que pour la société (difficulté donc pour un propriétaire individuel à se projeter sur la durée de vie de la ressource), et enfin sur certains facteurs institutionnels (dont le plus important est le fait que les producteurs peuvent agir sur la demande en créant des désirs « synthétiques » à travers la publicité). Ainsi, l'optimum peut aussi bien être atteint en « redistribuant les bénéfices vers le présent, en redistribuant les coûts vers l'avenir, ou par les deux moyens » (W. Kapp, 1963, p. 223).

Ainsi, pour Kapp si « cette norme était appliquée, c'est-à-dire si l'optimum théorique déterminait effectivement le taux de l'utilisation des ressources sans aucune restriction réglementaire, elle n'aurait qu'un seul résultat : celui d'accélérer le taux d'utilisation des ressources naturelles au-delà de ce qui pourrait être toléré par une société organisée, raisonnablement soucieuse des générations futures » (W. Kapp, 1963, p. 205). Finalement, le recours au taux d'actualisation est une « déformation institutionnalisée de l'ordre des priorités dans le temps », soit l'institutionnalisation (au sens de Veblen[56]) de la préférence pour le présent : « le principe de "maximisation" est devenu un dogme permettant de critiquer, de manière illégitime, certaines politiques concrètes en les considérant comme des violations du principe de l'économie» (W. Kapp, 1963). Il en conclut que cette dynamique contribue à l'épuisement rapide des ressources (W. Kapp, 1963, p. 200).

3.4.2. Identification de l'épuisement comme coût social :

Il a été vu que Kapp a identifié la « surexploitation des ressources renouvelables et l'épuisement des ressources non renouvelables » comme un coût social. Ce paragraphe vise à mieux identifier et définir ce que sont les coûts sociaux liés à l'épuisement pour Kapp et à discuter de la faisabilité d'en faire un cadre d'étude pour les phénomènes discutés au chapitre 1. Pour ce faire, 3 types principaux de coûts sociaux liés à l'épuisement utilisés par Kapp sont dégagés à partir de son analyse :

[56] Il s'agit ici de l'institution au sens de Veblen. Dans son approche, la société en général et l'économie en particulier sont des ensembles évolutifs d'institutions. Thorstein Veblen définit la notion d'institution comme des habitudes de pensées et d'actions dominantes dans la communauté sociale. Leur caractère essentiel est une inertie relative au regard de l'évolution sociale. Elles se sont formées dans le passé et en sont donc héritées. Les institutions découlent elles-mêmes des habitudes de vie : or comme celles-ci résultent des habitudes de pensée, la discipline de la vie quotidienne a pour effet de modifier ou de renforcer les institutions héritées dans le cadre desquelles vivent les hommes. La formation des institutions ou des habitudes de pensée résulte d'une interaction complexe entre différents niveaux et temporalités d'évolution.

déséconomies, dépenses publiques de lutte contre l'épuisement, et augmentation des autres coûts sociaux. Une des études de cas menée par Kapp est présentée plus en détail pour illustrer et préciser le concept de déséconomies : l'exploitation du pétrole aux États-Unis. Puis l'analyse des causes de ces coûts sociaux et des solutions proposées par Kapp est présentée. Enfin, l'analyse de Kapp est mise en relation avec la définition de l'épuisement proposée au chapitre 1, pour proposer un cadre d'analyse cohérent.

En préambule, de son analyse des coûts sociaux de l'épuisement des ressources non-renouvelables, Kapp souligne que, contrairement au cas des ressources renouvelable, il n'est pas possible de déterminer un « optimum technique pragmatique » (W. Kapp, 1963), puisqu'il n'existe pas de taux d'utilisation en deçà du taux de renouvellement de la ressource. Il n'y aurait donc pas de seuil auquel se référer pour s'assurer que l'usage et la production des ressources non-renouvelables sont soutenables. Cependant dans le cas des ressources métalliques, cette affirmation peut être modérée puisqu'il est possible de réutiliser ou recycler ces ressources. Cependant, comme vu au chapitre 1, le recyclage ne peut pas prévenir l'épuisement de la ressource sur le très long terme (pour des raisons thermodynamiques) et dans un contexte de croissance économique. La capacité de mise en place du recyclage faisant l'objet de difficultés spécifiques à l'organisation de chaque filière, elle ne sera pas discutée dans ce chapitre à titre général, mais fera l'objet d'une discussion sur le cas d'étude dans le chapitre 3.

Kapp souligne le fait que la question de l'épuisement des ressources non renouvelables n'est pas une question de disponibilité économique à court terme puisque : « leur importance relative dans l'industrie moderne peut changer sous l'effet du progrès technique. Bref elles sont remplaçables. » (W. Kapp, 1963, p. 209). L'auteur fait donc preuve d'un certain optimisme technologique sur la substituabilité des ressources non-renouvelables, qui peut, dans la pratique n'être discuté qu'usage par usage comme l'a montré le rapport de l'union européenne sur le caractère critique de certains métaux (Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014). De plus, comme cela a été souligné dans le premier chapitre, une vision de long terme, voire de moyen terme pour certaines applications métalliques, conduit malheureusement à une vision plus pessimiste de la substituabilité, car les ressources ne sont substituables que dans la mesure où il reste des ressources par lesquelles les substituer, ou comme le formule Alicia Valero Delgado : « *technological development will allow substitution among minerals, but this can only last whenever other concentrated mineral stocks are available* » (Alicia Valero Delgado, 2008, p. 335). Cependant Kapp pondère ce propos sur le long terme : « si les perspectives à court et moyen termes demeurent rassurantes, les perspectives à long et très long terme sont loin de l'être » notamment à cause de l'augmentation de la croissance (W. Kapp, 1963, p. 209).

Avant de s'attaquer à l'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement, Kapp met en garde sur le caractère obligatoirement non exhaustif d'une telle approche. En effet, il est impossible de prévoir les dommages futurs liés à l'épuisement, et donc d'approcher une évaluation complète de ce phénomène. Il souligne ce raisonnement sur la question des ressources énergétiques : il « est impossible d'estimer avec une précision significative la totalité des coûts sociaux qui résultent de l'épuisement prématuré des ressources énergétiques, et ce en partie parce que l'on ne sait pas combien de temps les réserves d'énergie actuelles vont durer» (W. Kapp, 1963). Ainsi, « toute quantification de ces coûts sociaux [futurs] semble difficile, sinon impossible » (W. Kapp, 1963). Cependant, pour lui la vraie question n'est pas là. Pour Kapp, une évaluation des coûts sociaux de la production de ressources non renouvelable qui ait un intérêt en termes de formulation de meilleures politiques publiques, doit évaluer comment l'exploitation des ressources non-renouvelables actuelle participe au phénomène d'épuisement notamment par des pertes et des coûts qui sont techniquement évitables. Dit autrement, il est possible d'évaluer les coûts sociaux des problèmes

posés actuellement par le processus d'épuisement vu comme continu et les déséconomies générées par le système de production et de consommation.

i. 3 types principaux de coûts sociaux liés à l'épuisement chez Kapp

Pour Kapp il y a principalement 3 types de coûts sociaux liés à l''épuisement des ressources non-renouvelables.

1) Les dépenses publiques liées à la substitution de ces ressources.

Ainsi, pour Kapp la substitution d'une ressource épuisée par une autre se fait en partie grâce à l'investissement public nécessaire à ce progrès technique, et ne se fait pas de manière automatique. En pratique, ce n'est donc pas la rente de rareté hotellinienne qui paie pour le substitut, en tout cas pas entièrement. Kapp suggère également que les pouvoirs publics ont en réalité plus intérêt que les acteurs privés à investir dans ce substitut : « pour tout ce qui a trait aux ressources fondamentales, une société organisée a nécessairement devant elle un horizon plus vaste qu'un individu ou une firme privée » (W. Kapp, 1963). Ainsi le fait de devoir investir pour un substitut constitue bien une conséquence négative supportée par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble, et constitue donc un coût social

2) Les déséconomies importantes liées à l'exploitation commerciale de ces ressources.

Kapp s'intéresse aux pertes issues de l'exploitation commerciale des ressources non-renouvelables, qu'il nomme des « déséconomies ». Il définit ainsi ces déséconomies : « une approche institutionnelle du problème de l'utilisation des ressources révèle l'existence de déséconomies substantielles dans le sens d'un gaspillage techniquement et économiquement évitable que l'exploitation de ces ressources sous le régime de la concurrence rend apparemment inévitable » (W. Kapp, 1963).

Ces déséconomies sont regroupées en deux types principaux (W. Kapp, 1963) :

a. Mises de fonds évitables qui font double emploi et coûts d'exploitation inutilement élevés

b. Pertes inutiles et irrécupérables de réserves : « la perte de réserves résultant de ce que la capacité excédentaire et les prix en baisse forcent les opérateurs à recourir à des méthodes de production techniquement moins efficaces et à abandonner prématurément les puits et les mines »

Ces différents types de déséconomies sont éclairées par les exemples pris par Kapp présentés ci-après.

3) L'augmentation graduelle des coûts réels.

Kapp reprend ici l'idée d'augmentation des coûts de production au fur et à mesure de la diminution de la qualité des ressources et son impact sur les coûts réels de l'exploitation. Selon Kapp, cette augmentation a lieu, car l'exploitation et l'exploration devront se déplacer vers des réserves de qualité inférieure, moins accessibles. « La montée des coûts se fera sentir bien avant que le point d'épuisement ne soit atteint, et ce malgré le fait que de nouvelles explorations vont rendre disponibles, dans un avenir prévisible, des quantités croissantes de matières de qualité commerciale inférieure » (W. Kapp, 1963). Comme de nombreux auteurs (voir partie 1 du présent chapitre) Kapp souligne le manque de données disponibles pour témoigner de l'augmentation du coût de production : « les données disponibles [sur les coûts d'exploitation et leur augmentation liée à l'épuisement] sont loin d'être suffisantes si l'on veut déterminer les vrais effets des dépenses accrues pour l'exploration ou des milliards de dollars de subventions indirectes sous forme d'indemnités accordées en cas d'épuisement et d'allègement fiscaux » (W. Kapp, 1963).

Enfin, Kapp souligne que tous ces coûts sociaux sont aggravés par des « processus cumulatifs typiques qui tendent à accélérer le taux d'utilisation des ressources » (W. Kapp, 1963), soit les CCC présentées au 3.3.

ii. Déséconomies illustrées sur le cas de l'exploitation des ressources pétrolières aux USA

Les déséconomies présentées par Kapp sur l'exploitation du pétrole dans les années 1950 sont exposées dans le Tableau 16 afin d'expliciter la notion de déséconomies. Dans cet exemple Kapp détaille comment l'exploitation compétitive du pétrole prend la forme d'une véritable ruée vers la ressource qui rend les conditions d'exploitation profondément inefficientes et générant de nombreuses pertes. Les liens entre les différents processus à l'origine des déséconomies sont illustrés sur la Figure 25.

Tableau 16 : Illustration du concept de déséconomies à travers l'exploitation du pétrole aux États-Unis. Source : autrice, à partir des travaux de Kapp, 1963

Type de déséconomies	Caractéristique de l'exploitation des ressources pétrolières aux USA
a. Mises de fonds évitables qui font double emploi et coûts d'exploitation inutilement élevés	- « course de forages rivaux » ou ruée vers le pétrole : aux États-Unis dans les années 1960, le pétrole appartient au propriétaire du puit d'extraction qui l'a extrait, même si le pétrole se situe sous un terrain appartenant à quelqu'un d'autre. Par « conséquent, lorsqu'un gisement est découvert chaque producteur s'acharne à drainer le champ avant que le pétrole ne migre et ne soit extrait par un puits voisin ». Cela génère entre autres la création de beaucoup plus de puits que ce qui est nécessaire pour exploiter le gisement. - la ruée vers le pétrole induit un excès d'offre qui incite à la construction d'installation de stockage, ce qui constitue également un investissement évitable - la ruée vers le pétrole conduit également à la baisse des prix et donc à l' « abandon prématuré » des puits marginaux. Lorsque l'on veut rouvrir les puits les installations sont quasi-systématiquement devenues inutilisable (corrosion rapide « trois fois plus rapide », etc.
b. Pertes inutiles et irrécupérables de réserves	- co-produits non valorisés, ici le torchage du gaz - la ruée vers le pétrole conduit également à la baisse des prix et donc à l' « abandon prématuré » des puits marginaux. Qui peuvent entraîner l'invasion par les eaux ou la migration du pétrole dans des zones inexploitables et donc une perte de ressource évitable. - la ruée et donc la baisse des prix, conduit également à rogner sur les coûts : « les firmes exploitantes [limitent] la mise de fonds en se servant d'un matériel d'extraction moins coûteux et moins efficace, ou en recourant à des méthodes de production qui sont un gâchis sur le plan technique »

Kapp souligne deux dispositifs réglementaires qui participent à la génération de déséconomies liées à l'exploitation du pétrole. Le premier dispositif est le droit de propriété de la ressource pétrolière : aux États-Unis dans les années 1960, le pétrole appartient au propriétaire du puit d'extraction qui l'a extrait, même si le pétrole se situe sous un terrain appartenant à quelqu'un d'autre. Cela conduit les exploitants dont les puits sont situés sur une même nappe de pétrole à pomper le pétrole le plus rapidement possible et créer une véritable ruée sur la ressource (voir Tableau 16). Le deuxième dispositif est le contrat de leasing entre la firme exploitante du puits et le bailleur : le propriétaire du gisement reçoit une redevance pour le pétrole extrait. Or, il existe des clauses spéciales obligeant la firme exploitante à produire. Le producteur, en plus d'être incité à produire par le phénomène de

ruée, est donc lié par un contrat qui l'empêche de reporter sa production même si les prix sont désavantageux. Tout le processus d'épuisement de la ressource décrit par Kapp est un processus de causalité circulaire cumulative (Figure 25), et ces deux mécanismes (en rouge) peuvent être décrits comme des mécanismes générateurs, qui ont tendance à institutionnaliser la « concurrence sans merci » (Kapp, 1963). Pour Kapp c'est en effet « l'exploitation concurrentielle [qui] favorise les investissements superflus, fait monter les coûts de l'exploitation et est la cause d'une récupération incomplète des réserves disponibles » (Kapp, 1963). Cependant, il faut comprendre cette constatation non comme une généralité universelle, mais comme un constat lié au cas d'étude évoqué et à la dynamique de ce cas d'étude.

La Figure 25 montre également les deux principaux types de déséconomies décrites ci-avant (en gris) : les mises de fonds évitables qui font double emploi et les coûts d'exploitation inutilement élevés ; et les pertes inutiles et irrécupérables de réserves. En bleu sur la Figure 25 sont soulignés les facteurs de l'épuisement tels que définis au chapitre 1. La correspondance entre ces facteurs d'épuisement et la définition des coûts sociaux de l'épuisement de Kapp sera détaillée ci-après. Enfin, en vert sur la Figure 25 est précisé le phénomène d'externalisation des coûts lié à l'épuisement. C'est un ajout de l'autrice, car Kapp n'en fait pas mention de ce cas d'étude précis.

Il est à noter que si les déséconomies sont exprimées monétairement lorsqu'il s'agit du surinvestissement, elles ne sont pas exprimées monétairement pour les pertes des réserves de pétrole et de gaz. Dans ce cas-là les pertes sont exprimées quantitativement en % évitables des réserves de pétrole et de gaz.

Les perspectives évoquées par Kapp pour lutter contre les coûts sociaux de l'épuisement sont dans la lignée des solutions générales évoquées au paragraphe 3.2 (W. Kapp, 1963, p. 255) : éducation, interdictions spécifiques, subsides accordés pour encourager une offre abondante de produits de remplacement, impôts, contrôle des prix, rationnement ou même prohibition de l'utilisation de l'utilisation de certaines matières pour des applications ayant un degré faible de priorité.

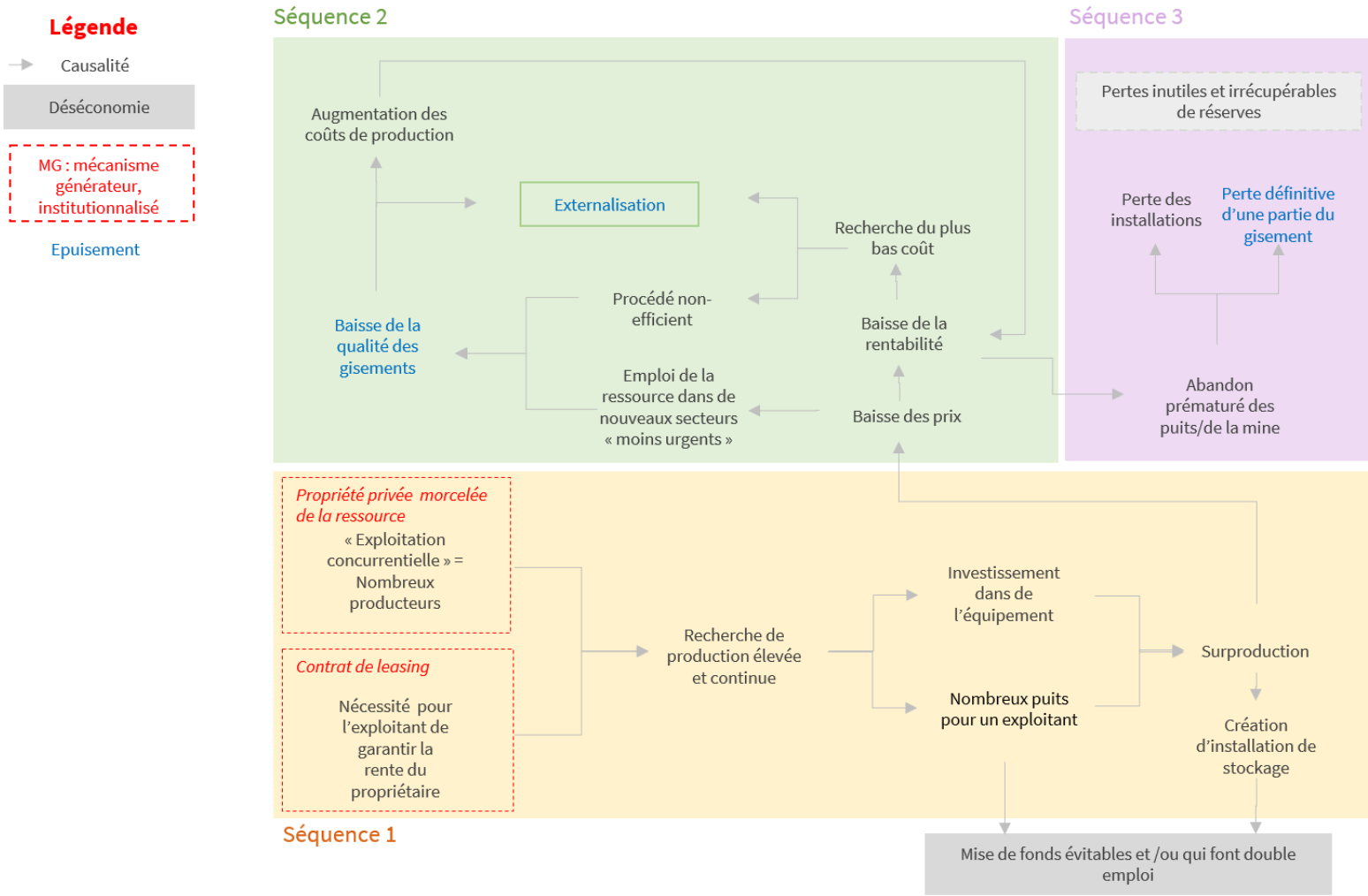


Figure 25 : Schéma illustrant les déséconomies, les phénomènes d'épuisement et les CCC dans les exemples de l'exploitation du charbon et du pétrole. Source : autrice, d'après Kapp, 1963

iii. Choix du cadre conceptuel développé par Kapp pour l'étude des coûts sociaux

Il a été vu précédemment que les approches monétaires existantes de l'épuisement (absence de prise en compte des pertes et des coûts sociaux et environnementaux) et l'approche des externalités (problèmes liés aux irréversibilité et à la substituabilité) ne permettaient pas d'englober tous les facteurs contribuant au coût de l'épuisement défini comme deux phénomènes conjoints, continus et irréversibles : les pertes de quantité (pertes de matière tout au long de la filière) et de qualité (diminution des teneurs du gisement et difficultés du recyclage) de la ressource au fur et à mesure de son utilisation dans notre économie d'une part ; et comme un démultiplicateur d'impacts environnementaux, sanitaires et sociaux des filières de matières premières minérales d'autre part. Pour explorer les liens entre épuisement physique, augmentation des coûts réels de l'exploitation, et tendance des acteurs économiques à externaliser ces coûts, et ainsi proposer un cadre permettant de répondre à la question de recherche, il est proposé de s'appuyer sur le cadre des coûts sociaux tel que développé par Karl William Kapp (W. Kapp, 1963).

En effet, ce cadre a l'avantage de directement considérer l'épuisement des ressources non-renouvelable comme un coût social à travers la prise en compte de 3 phénomènes : les dépenses publiques liées à la substitution de ces ressources, les déséconomies importantes liées à l'exploitation commerciale de ces ressources, l'augmentation graduelle des coûts réels. A travers ses 3 dimensions sont prises en compte à la fois la diminution de la qualité des ressources, de la quantité des ressources (voir Tableau 17). L'augmentation des coûts sociaux et environnementaux n'est pas étudiée en lien avec l'épuisement, sur ce point Kapp rejoint donc les autres approches. Comme cela a été évoqué dans la première partie de ce chapitre, l'étude de ce lien peut donc être ajoutée à l'étude de l'augmentation des coûts réels de la production.

Tableau 17 : Typologie des coûts sociaux de Kapp et prise en compte de l'épuisement des ressources

Typologie des coûts sociaux *sensu* Kapp	**Facteurs d'épuisement correspondant**
Dépenses publiques liées à la substitution de ces ressources	Pertes de quantité et de qualité
Déséconomies importantes liées à l'exploitation commerciale de ces ressources	Pertes de quantité
Augmentation graduelle des coûts réels	Pertes de qualité

L'avantage principal, au-delà de la définition du problème de l'épuisement, de ce cadre conceptuel par rapport à la question de recherche est l'étude des liens qu'il permet entre sphère socio-économique et sphère biophysique. En effet, pour répondre à la question de recherche, il s'agit de mettre en place un cadre qui permet l'évaluation des liens entre épuisement biophysique, dommages portés aux sphères sociales et biophysiques, et dynamiques d'externalisation/prise en charge de ces dommages par les acteurs économiques. Pour cela, il est nécessaire de mener une étude poussée sur le contexte institutionnel, les stratégies et l'organisation des acteurs économiques, mais également de prendre en compte les résultats des sciences naturelles. Une telle transversalité nécessite d'abandonner l'approche de modélisation, mais de se pencher sur les interactions entre les différents systèmes. Dans cet objectif, le cadre conceptuel de Kapp :

- Permet d'intégrer différentes strates du problème de l'épuisement : biophysique, social et économique ;

- Souligne la relation entre les problèmes économiques, sociaux et environnementaux pour identifier les causes systémiques de l'occurrence de ces coûts ;
- Se concentre sur une analyse institutionnelle qui identifie les leviers pour minimiser les coûts sociaux.

L'approche de Kapp de l'épuisement peut ainsi être considérée comme une analyse à la croisée de l'approche de l'économie écologique et de l'économie institutionnelle sur ce sujet (voir Tableau 18).

Tableau 18 : Synthèse des différentes approches abordées dans la thèse concernant la prise en compte des coûts sociaux de l'épuisement

ENC	Économie Écologique	Approche de Kapp
Pas de prise en compte des irréversibilités Prise en compte des impacts à travers les externalités Règle Hotelling assurant l'allocation optimale des ressources : l'épuisement des ressources n'est pas une externalité Pas de mention des problèmes de déséconomies L'allocation des ressources pourrait être équitable si R et K sont substituables et si l'économie est K intensive Système fermé	Épuisement : la croissance du PIB est liée à des pertes biophysiques irréversibles R n'est pas substituable par K mais complémentaire de K Est lié à l'augmentation des dommages Les déséconomies sont prises en compte à travers l'approche entropique Système ouvert	Épuisement : la croissance du PIB est liée à des pertes biophysiques irréversibles R n'est pas substituable par K mais complémentaire de K L'épuisement est un coût social Les déséconomies sont prises en compte pour elles-mêmes Analyse des systèmes institutionnelles et économiques conduisant à augmenter l'épuisement (CCC) Système ouvert

Dans cette troisième partie, il a donc été vu que les coûts sociaux sont définis par Kapp comme l'« ensemble des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble » générés par « les modes de production » dont les acteurs privés « ne sont pas tenus responsables » et qui « auraient pu être évités » (W. Kapp, 1963). Kapp considère les coûts sociaux comme un problème systématique dû à leur absence de prise en compte dans les coûts de la production, et il s'inscrit dans une approche institutionnelle de l'analyse de ces coûts, qui est non nécessairement monétaire. Il identifie dès la formulation de son concept l'épuisement des ressources non renouvelables comme un coût social. Pour explorer les liens entre épuisement physique, augmentation des coûts réels de l'exploitation, et tendance des acteurs économiques à externaliser ces coûts, et ainsi proposer un cadre permettant de répondre à la question de recherche, il est proposé de s'appuyer sur le cadre des coûts sociaux tel que développé par Karl William Kapp (W. Kapp, 1963).

Pour cela, sa démarche consiste à évaluer 3 types principaux de coûts sociaux liés à l'épuisement : déséconomies, dépenses publiques de lutte contre l'épuisement, et augmentation des autres coûts sociaux. Et à interroger les causes de l'apparition et de l'augmentation des coûts sociaux à travers le concept de causalité circulaire cumulative (CCC). Ce concept de causalité circulaire cumulative fait

référence à la notion d' « accélération » ou de « cercle vicieux » de l'apparition des coûts sociaux, et à l'institutionnalisation des mécanismes à l'origine de ces cercles vicieux. Il s'agira pour nous de mettre en lumière des interactions qui viendraient renforcer des coûts sociaux déjà existants, mais en abandonnant l'approche mécaniste de la modélisation. C'est-à-dire que les causalités circulaires cumulatives mises en évidence sont relatives à un cas d'étude donné, à une géographie donnée, et à un moment donné et ne peuvent pas permettre d'établir des régularités permettant la modélisation de ces phénomènes.

4. L'objet d'étude : de l'entreprise chez Kapp, aux filières de production mondialisées

Il a été évoqué dans la première partie de ce chapitre que l'apparition d'un coût social pouvait se faire par un transfert géographique d'une activité de production dans une zone où la règlementation sociale et environnementale est moins stricte, notamment vers les pays du Sud. L'exploitation des ressources métalliques, s'ancrant tout en amont dans une organisation mondialisée des filières, il paraît nécessaire que l'analyse actuelle des coûts sociaux dans une perspective institutionnelle prenne en compte l'ensemble de la dynamique d'une filière, afin d'évaluer comment cette dynamique joue sur le maintien ou la réduction des coûts sociaux en amont. Cependant, il s'agit de préciser ce qui est entendu par « coût social de la filière ». Dans une première section, le contexte de globalisation des interdépendances économiques reliant les économies nationales et structurant une asymétrie entre l'amont et l'aval des filières en termes de répartition de la valeur et des impacts sociaux et environnementaux est tout d'abord souligné. Puis, une deuxième section présente l'analyse des chaînes globales de valeur (CGV), comme un cadre d'étude tout à fait approprié à l'étude des coûts sociaux à l'échelle des filières.

4.1. Des filières mondialisées marquées par une asymétrie amont-aval

Si les auteurs qui se réclament du concept de Karl William Kapp mettent tous l'accent sur l'analyse institutionnelle de ces coûts sociaux, seule à même de formuler des préconisations à destination des politiques publiques (W. Kapp, 1963; Ramazzotti et al., 2012), à la connaissance de l'autrice les évaluations se concentrent toutes sur un contexte local, généralement celui de l'entreprise.

Or, le contexte de globalisation et les interdépendances économiques relient les différentes économies nationales (Palpacuer & Balas, 2010) et structurent la production et la consommation des biens à travers des réseaux d'activités. En effet, aujourd'hui le commerce international représente plus de 55% du PIB mondial, contre 30 % au milieu des années 1980 (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, et al., 2016). Cette évolution s'est traduite par un éclatement et une dispersion géographique des différentes activités économiques, qui étaient réalisées jusqu'alors à l'intérieur des frontières de l'entreprise selon une logique d'intégration verticale. Les processus de conception, production et commercialisation des produits et des services sont désormais éclatés et relocalisés à l'échelle mondiale. Il s'agit d'une reconfiguration profonde des chaînes de valeur nationales et intégrées qui étaient caractéristiques de l'économie fordiste depuis le début du 20ème siècle (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, et al., 2016; Palpacuer, 2008b).

Auparavant basée sur les capacités des producteurs de matières premières, la logique de nombreuses filières économiques est désormais soumise à la volonté de quelques acheteurs. Cette reconfiguration des filières établit une nouvelle hiérarchie entre les entreprises et fait émerger de nouveaux ensembles économiquement centralisés et socialement éclatés. La logique économique s'extrait de l'espace national pour être restructurée dans un espace global au fonctionnement autonome qui échappe aux mécanismes de régulation des Etats qui ne parviennent plus à endiguer les coûts sociaux de la production (Palpacuer 2008b in Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, et al., 2016).

Ainsi, ces dynamiques provoquent une concurrence accrue au niveau mondiale de la production des ressources et génère une « diminution des coûts de production, un accroissement de la flexibilité et la réalisation d'économies d'échelle au niveau mondial » (Vercher-Chaptal & Palpacuer, 2013). Cette dynamique profite essentiellement aux acteurs aval, mais s'opère « au détriment de la qualité des conditions de travail chez les fournisseurs et sous-traitants au Sud comme au Nord, et provoquent une croissance sans précédent des inégalités » (Bair, 2005 ; Vercher-Chaptal & Palpacuer, 2013).

Cela semble particulièrement vrai pour les filières de matières premières minérales, qui reposent historiquement sur un modèle économique « extractiviste » (Bednik, 2015; Gudynas, 2013; Svampa, 2011), c'est-à-dire tourné vers l'export, avec une concentration des acteurs économiques en amont/milieu de chaîne, et faisant l'objet d'une inégale répartition de la valeur en faveur de l'aval. Ainsi, pour Gudynas, l'extractivisme est une forme particulière d'extraction, celle qui remplit les trois conditions suivantes : les volumes extraits sont importants ou l'« intensité » de l'extraction, comprise dans le sens de l'apparition des impacts environnementaux, est forte ; au moins 50% des ressources naturelles obtenues sont destinées à l'exportation ; ces ressources sont exportées sous forme de matières premières non transformées ou ayant subi une transformation minimum (Gudynas, 2013, p. 3 et 15). Pour Maristella Svampa, l'extractivisme doit être compris comme un modèle d'accumulation, fondé sur la surexploitation des ressources naturelles en grande partie non renouvelables et sur le déplacement des frontières des territoires jusqu'alors considérés comme « improductifs » (Svampa, 2011). Bridge souligne que l'analyse de chaînes globales de valeur, que nous présenterons au paragraphe suivant, s'est peu intéressée aux industries extractives. Celles-ci ont, jusqu'à récemment, surtout fait l'objet d'études dans la littérature du développement à travers la notion de malédiction des ressources, qui concentre son analyse sur l'échelle nationale (Bridge, 2008). Alors que l'analyse des filières mondialisées à l'avantage d'attirer l'attention sur les relations de dépendance et de domination le long du réseau et entre les réseaux, ainsi que sur la manière dont elles évoluent dans le temps et dans l'espace, et non sur les seuls déterminants nationaux des pays fournisseurs de matières premières minérales (Bridge, 2008).

Face à la capacité des grands acteurs économiques à externaliser leurs activités en amont et en aval tout en gardant le contrôle des filières, et à les déplacer d'un pays à l'autre, les filières mondialisées jouent désormais un rôle prépondérant sur l'apparition des impacts sociaux et environnementaux, et des coûts sociaux associés (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, et al., 2016).

Il paraît donc essentiel de pouvoir évaluer les coûts à l'échelle des filières mondialisées, afin de pouvoir être à même d'éviter les transferts des impacts de l'aval vers l'amont, ou d'une région vers une autre et d'analyser l'influence de cette organisation sur l'apparition des coûts sociaux.

C'est pourquoi la thèse, qui s'attache à réaliser une analyse institutionnelle, à même d'identifier les leviers pour minimiser les coûts sociaux (W. Kapp, 1963), prend pour objet d'étude les filières mondialisées. Pour cela, il semble pertinent de mobiliser le cadre d'analyse des chaînes globales de valeur (CGV), qui permet la description de ces filières en termes de relations de pouvoir et de répartition de la valeur et de coûts sociaux entre les différents maillons de la chaîne.

4.2. Contexte de l'émergence des théories sur les chaînes globales de valeur

Tout d'abord le terme de « chaînes globales de valeur » renvoie en première approche en français à l'idée de filière de production, il s'agit donc d'expliquer en quoi les deux concepts sont distincts. L'approche filière a été développée par des institutions françaises de recherche[57] dans les années 1980 comme un outil d'analyse mettant en évidence les circuits de distribution des biens agricoles. Elle analyse plus particulièrement les flux de marchandises, les prix et la valeur ajoutée tout au long

[57] Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD)

de la filière, en utilisant les comptes de chaque agent. Elle a permis de montrer la manière dont les politiques publiques, les investissements et les institutions influent sur les systèmes de production (FAO, 2005).

Le concept de « chaînes globales de valeur » (en anglais Global Value Chain) est issu du concept de « chaînes de commodité »[58] (Bair, 2010). Ce concept s'ancre dans la théorie des systèmes-monde développée par Immanuel Wallerstein dans les années 1970 et défini comme « une mise en réseau de processus de travail et de production dont le résultat final est un produit fini » (Hopkins & Wallerstein, 1986, p. 159). Cette approche se distingue de l'approche filière en ce que le centre de l'étude est le travail et sa rémunération plus que les flux de marchandises pour eux-mêmes. D'après Jennifer Bair (Bair, 2010), l'analyse des systèmes-monde se caractérise par trois points. Tout d'abord, elle porte sur l'analyse historique de la division et l'intégration internationales du travail et montre que le début de cette organisation remonte à l'émergence du capitalisme au XIVème siècle. Ensuite, cette approche cherche à comprendre les mécanismes aboutissant à la répartition inégale des rémunérations et de l'accumulation du capital en les mettant en lien avec l'analyse des systèmes-monde : les rémunérations élevées vont de pair avec certains maillons de la chaîne au Centre[59], les rémunérations faibles sont à la Périphérie (la géographie et les contours de la chaînes se redessinant au cours du temps). Enfin, l'analyse montre que la géographie et l'organisation des chaînes sont liées à des changements cycliques dans l'économie mondiale (cycle de Kondratieff). C'est donc une approche historique, systémique et tentant de dégager des schémas qui se répètent dans le temps.

En 1994, Gereffi et Korzeniewicz ont remis le concept de chaînes de commodité au goût du jour en le recentrant sur les stratégies et pratiques des entreprises en lieu et place de celles des Etats (dans le contexte de libéralisation des échanges) (Gereffi & Korzeniewicz, 1994) et en créant le concept de chaînes globales de commodités (CGC, ou en anglais *Global Commodity Chains GCC*). Les CGC sont décrites comme « des ensembles de réseaux inter-organnisationels regroupés autour d'une commodité ou d'un produit, reliant des ménages, des entreprises et des Etats au sein de l'économie-monde » (Gereffi & Korzeniewicz, 1994). Si la définition des CGC reste proche de celle des chaînes de commodités, c'est l'approche qui change. En effet, au-delà de la focalisation sur le rôle des entreprises, une des grandes différences avec les études issues des systèmes-monde est que les CGC sont présentées comme un phénomène qualitativement nouveau (Bair, 2010). L'analyse des CGC est attachée à faire le lien entre des composantes micro et macro-économiques des chaînes de commodités (Gereffi & Korzeniewicz, 1994), notamment en faisant un pont entre l'analyse des organisations, des politiques économiques étatiques et des composantes macro-économiques et historiques. Gereffi identifie quatre dimensions de l'analyse des CGC (Gereffi, 1995, p. 112-115). Premièrement, la structure input-output des filières :la description de la chaîne comme « l'ensemble du processus d'entrée-sortie depuis la conception jusqu'à la consommation permettant de mettre un produit ou un service de la conception initiale entre les mains du consommateur » (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016). Parmi ces étapes sont souvent pris en compte : la recherche et la conception, les intrants, la production, la distribution et le marketing, les ventes et, dans certains cas, le recyclage des produits après utilisation (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016). Concrètement, cela est généralement représenté sous forme d'un ensemble de boîtes (maillons de la chaîne) reliées par des flèches indiquant les flux de biens et services tangibles et incorporels (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016). Deuxièmement, l'ancrage géographique qui explique comment l'industrie est dispersée à

[58] « Le terme 'chaîne de commodité' date d'un article publié en 1977 par Hopkins et Wallerstein dans lequel ces auteurs cherchent à différencier leur compréhension de la dimension territoriale du capitalisme de l'approche orthodoxe de la globalisation » (Bair, 2010).

[59] Les notions de Centre et de Périphérie sont issues du concept de l'économie-monde capitaliste tel que formulé par Braudel.

l'échelle mondiale et dans quels pays les différentes activités liées à la structure input-output sont menées (Gereffi, 1995). Troisièmement, la structure de gouvernance décrivant les relations de pouvoir et d'autorité entre les différents acteurs de la chaîne qui détermine l'allocation des ressources et les flux dans la chaîne (Gereffi, 1995). L'étude des structures de gouvernance distingue les CGC gouvernées par l'amont[60] ou par l'aval[61]. Quatrièmement, le cadre institutionnel de la filière qui « identifie comment les politiques mises en place à l'échelle locale, nationale et internationale détermine le processus de mondialisation dans la chaîne » (Gereffi, 1995).

Au début des années 2000, l'analyse des CGC fait place à l'analyse des chaînes globales de valeur (CGV). Ce changement est perçu par de nombreux acteurs comme un changement principalement sémantique (Gibbon et Ponte, 2005 ; Daviron et Ponte, 2005 in Bair, 2010). Cependant, il faut souligner que contrairement à l'analyse CGC, l'analyse des CGV chez des auteurs comme Sturgeon donne plus de poids « aux coûts de transaction[62] en tant que facteurs déterminant la coordination et la configuration des chaînes de valeur dans les industries globales » (Bair, 2010). Suite à ces travaux, la description de la structure de gouvernance en chaînes pilotées par l'amont ou l'aval laisse la place à plusieurs modèles de gouvernances (Gereffi, Humphrey, & Sturgeon, 2005) avec 5 typologies différentes : Marché, Modulaire, Relationnel, Captif, Hiérarchie. Si ces typologies semblent intéressantes pour expliquer les modes de coordination entre quelques maillons de la chaîne, plusieurs auteurs (Gibbon et Ponte, 2005 ; Bair, 2005 in Bair, 2010; Palpacuer, 2008a) soulignent l'incapacité de ces typologies à décrire la dynamique globale des chaînes et notamment à rendre compte du rôle de la structure de pouvoir dans le maintien de rémunérations inégales au sein des chaînes de valeur. Ces auteurs prônent donc un retour à une plus grande attention au contexte social et institutionnel (Palpacuer, 2008a), comme la financiarisation de l'économie, le rôle joué par les institutions, influençant les relations au sein de la chaîne.

L'approche des chaînes de globales de valeur étudie le contexte institutionnel dans lequel s'inscrit le commerce, et les relations de pouvoir qui permettent à certains agents clés de fixer les règles du

[60] Les filières "pilotées par l'amont" sont celles où les multinationales et les grandes entreprises industrielles intégrées jouent un rôle pivot de contrôle du système de production (depuis leurs fournisseurs en amont jusqu'aux réseaux de distribution en aval). Elles sont intensives en capital et en technologie à l'image de l'automobile, l'informatique, l'aéronautique et les machines industrielles (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, & Pigneur, 2016).

[61] Les filières "pilotées par l'aval" sont celles où les grands distributeurs, les grandes marques, et les grands négociants jouent un rôle pivot de création de réseaux décentralisés de production à partir d'un ensemble de pays producteurs et exportateurs (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, et al., 2016).

[62] Il s'agit ici de la théorie des coûts de transaction développée par Williamson, économiste néo-institutionnaliste ayant travaillé dans les années 1970 sur la gouvernance économique, d'après l'idée de Coase. Williamson a formalisé les conditions dans lesquelles « les coûts de transaction induits par le marché rendaient plus efficient le choix d'une internalisation des échanges au sein de la firme » (Bair, 2010), Suite à cela Powell (sociologie économique) critiquera la dichotomie marché et hiérarchie (la hiérarchie étant l'internalisation des échanges au sein de l'entreprise) de la théorie des coûts de transaction et décrira l'aspect relationnel comme un facteur clé voire constitutifs dans la forme d'organisation en réseaux interentreprises (Bair, 2010). Enfin, Sturgeon fait dialoguer la théorie des coûts de transaction et l'approche sociologique des réseaux d'organisation interentreprises. Sturgeon développe la codification des connaissances (à travers les normes et les standards) comme un facteur clé de la gouvernance dans de chaînes de valeur qui ne sont ni « le marché, ni la hiérarchie, mais pas non plus […], une forme réseau possédant les caractéristiques « relationnelles et ouvertes » » (Bair, 2010). Ces chaînes décrites comme modulaires sont caractérisées « par des degrés plus faibles de dépendance mutuelle et un plus fort recours à des connaissances codifiées plutôt que [des connaissances] tacites » dans le cadre de structure de gouvernance relationnel » (Bair, 2010). Enfin Gereffi développera comme modèle de structure de gouvernance « les réseaux captifs qui se réfèrent à des relations plus asymétriques où les firmes pilotes, ayant investi dans le développement des compétences de leurs fournisseurs, cherchent à les enfermer dans la relation en les rendant « captifs » » (Bair, 2010).

jeu (Raikes, Friis Jensen, & Ponte, 2000). Mettre l'accent sur les nœuds de pouvoir dans la chaîne permet de déterminer les conditions de l'émergence de conditions inéquitables de rémunérations. Or, la sous-rémunération est considérée par Kapp comme un des coûts sociaux de l'entreprise privée (W. Kapp, 1963). L'analyse CGV pourrait être vue comme l'étude des conditions d'émergence d'un coût social, en l'occurrence la sous-rémunération, mais à l'échelle d'une filière ce qui permet de prendre en compte le report des coûts sociaux d'un maillon à l'autre de la chaîne et de prendre en compte le rôle du contexte économique, industriel et institutionnel dans l'apparition de ces coûts.

Il a été vu que l'analyse CGV telle que développée par Gereffi s'est progressivement éloignée de son ancrage initial dans le cadre conceptuel des systèmes-monde. Or l'analyse des systèmes-monde s'attachait à décrire, dans une approche historique, la reconfiguration de la chaîne de valeur afin de distinguer les mécanismes permettant de maintenir des rémunérations non équitables et de les relier à l'organisation de l'économie à l'échelle mondiale. Cette définition des CGV comme un objet en redéfinition constante afin de maintenir la sous-rémunération des travailleurs n'est pas sans rappeler le paragraphe 1.4 du présent chapitre qui décrit comment la redéfinition du périmètre des coûts réels de l'entreprise permettait d'externaliser certains coûts sociaux et environnementaux. Il apparaît donc que l'étude des mécanismes provoquant l'inéquitable répartition de la valeur présente de nombreuses similitudes et liens avec l'étude de l'émergence des coûts sociaux à l'échelle d'une filière.

Finalement, il parait intéressant et cohérent d'avoir recours à l'analyse des CGV dans cette thèse pour étudier les conditions permettant l'émergence d'une rémunération non équitable, mais plus largement pour étudier les conditions méso-économiques permettant l'émergence des coûts sociaux. Les approches au sein de l'analyse CGV étant diverses, ce qui est entendu ici par analyse CGV, c'est d'une part un appui théorique sur la critique du développement économique pensé comme un système en mutation capable de se reconfigurer pour maintenir l'accumulation du capital dans certains maillons et l'exploitation des travailleurs dans d'autres maillons, telle qu'initiée dans les systèmes-monde et telle que développée par Palpacuer et Bair. D'autre part, il s'agit de mobiliser la méthodologie de Gereffi (Gereffi et al., 2005) afin de décrire les CGV à travers 4 dimensions principales de la filière (input-output, géographie, structure de gouvernance, contexte institutionnel), et lorsque cela sera jugé pertinent l'utilisation des différentes typologies de gouvernance des CGV étant entendu qu'il s'agit d'un usage descriptif et devant être soumis à discussion, qui ne reflète pas la complexité de la réalité et ne saurait être utilisé à des fins prédictives sur les conditions d'apparition de telle ou telle forme de gouvernance[63]. Cette analyse, menée en complément de l'évaluation des coûts sociaux, présente le double avantage de permettre d'observer les inégalités de répartitions en termes de coûts et de valeur le long de la chaîne et d'identifier certaines causes systémiques et structurelles des impacts observés (monopole de certains acteurs et pressions sur les prix, appuis institutionnels offerts à certains acteurs, etc.). Il existe aujourd'hui peu d'analyses qui s'intéressent à la fois à la structuration de la chaîne globale de valeur et à l'influence de cette structuration sur les impacts sociaux, environnementaux et économiques, et inversement. Cette préoccupation est émergente, comme l'atteste les récents articles sur la gouvernance des CGV et la notion de responsabilité sociale des entreprises (Bair & Palpacuer, 2015).

[63] Voir la critique Granovetter (Granovetter, 1985), dont les travaux sont caractéristiques de la sociologie économique et remettent en question l'explication de la firme chez Williamson et préconise d'« éviter une approche modélisatrice prédictive, spécifiant les conditions selon lesquelles les relations interpersonnelles produiraient tels ou tels résultats, en faveur d'une approche par l'observation qui cherche à évaluer la manière dont des relations sociales concrètes, affectant l'activité économique, peuvent émerger et évoluer dans des contextes particuliers (Bair, 2010).

Dans cette partie, il a été vu que le contexte de globalisation des interdépendances économiques reliant les économies nationales et structurait une asymétrie entre l'amont et l'aval des filières en termes de répartition de la valeur. Cette organisation des filières donne la capacité aux acteurs économiques de déplacer et de segmenter leurs activités d'un pays à l'autre, permettant l'externalisation des impacts sociaux et environnementaux, et des coûts sociaux associés. Dans ce contexte, il paraît essentiel de pouvoir évaluer les coûts à l'échelle des filières mondialisées, afin de pouvoir être à même d'éviter les transferts des impacts de l'aval vers l'amont, ou d'une région vers une autre et d'analyser l'influence de cette organisation sur l'apparition des coûts sociaux. Pour cela la thèse s'appuie sur l'analyse des chaînes globales de valeur (CGV), à travers un appui théorique sur la critique du développement économique pensé comme un système en mutation capable de se reconfigurer pour maintenir l'accumulation du capital dans certains maillons et l'exploitation des travailleurs dans d'autres maillons, telle qu'initiée dans les systèmes-monde et telle que développée par Palpacuer et Bair. D'autre part, il s'agit de mobiliser la méthodologie de Gereffi (Gereffi et al., 2005) afin de décrire les CGV à travers 4 dimensions principales de la filière (input-output, géographie, structure de gouvernance, contexte institutionnel).

L'application du concept des coûts sociaux à une chaîne de valeur modifie légèrement sa définition en ce qu'elle implique le lien entre production et consommation. La définition de Kapp des coûts sociaux peut donc être légèrement modifiée en : l'« ensemble des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble » générés par l'ensemble du processus, de la conception initiale aux mains du consommateur, permettant d'aboutir à un produit ou un service (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016), dont les acteurs privés « ne sont pas tenus responsables » et qui « auraient pu être évités » (W. Kapp, 1963).

5. Cadre pour l'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement des ressources métalliques

Dans cette dernière partie, le cadre pour évaluer les coûts sociaux de l'épuisement des ressources métalliques est développé afin de faciliter son application. Cette partie a pour but de donner des pistes pour une évaluation des coûts sociaux de l'épuisement au sens de Kapp. En effet, la démarche de l'application de l'analyse des coûts sociaux à un cas pratique est en grande partie exploratoire. Le travail de Kapp est essentiellement analytique et descriptif : s'il a conceptualisé de manière extensive les coûts sociaux et donné des exemples d'applications de ce concept, il n'a pas formulé de méthodologie pour les évaluer. Il existe des exemples d'application de l'analyse des coûts sociaux au sens de Kapp à la production de ressources par d'autres auteurs, parmi lesquels peuvent être cités : une étude sur la commodification de l'eau (Couret Branco & Damaio Henriques, 2012) et une étude sur la gestion des stocks de saumons (S. Berger, 2017). Cependant, il n'existe pas à la connaissance de l'autrice de travail académique s'approchant de la mise au point d'une méthodologie pour une étude systématique des coûts sociaux au sens de Kapp. Il s'agit donc ici de dégager des pistes pour l'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement, appliquée à un cas d'étude au chapitre suivant.

Dans un premier temps, des précisions sont apportées à la définition des 3 types de coûts sociaux de l'épuisement définis par Kapp : les dépenses publiques liées à la substitution de ces ressources, les déséconomies importantes liées à l'exploitation commerciale de ces ressources, et l'augmentation graduelle des coûts réels. Il s'agit entre autres de prendre en compte la spécificité des ressources métalliques. Puis dans un deuxième temps des critères généraux pour l'évaluation monétaire des coûts sociaux sont précisés. Enfin, des pistes sont développées pour l'analyse des causes systémiques des coûts sociaux à travers l'identification de mécanismes générateurs et des chaînes de causalités cumulatives.

5.1. Précisions de la définition des coûts sociaux

Dans ce paragraphe, des précisions sont apportées à la définition des 3 types de coûts sociaux de l'épuisement définis par Kapp : les dépenses publiques liées à la substitution de ces ressources, les déséconomies importantes liées à l'exploitation commerciale de ces ressources, et l'augmentation graduelle des coûts réels. Il s'agit entre autres de prendre en compte la spécificité des ressources métalliques, mais aussi de monter en généralité lorsque la définition de Kapp est trop spécifique aux cas d'étude (exploitation du pétrole et du charbon aux États-Unis dans les années 1950) réalisés par Kapp.

5.1.1. Les dépenses publiques liées à la prévention de l'impact économique de l'épuisement

Kapp étudie les dépenses publiques liées à la substitution des ressources, appelés coûts cachés liés à la substitution des ressources. L'étude de Kapp a pour objet de révéler les investissements nécessaires à l'obtention d'un substitut qui ne sont pas pris en charge par les acteurs économiques privés : « le progrès technique n'est pas automatique et il n'est pas réalisable sans frais » (W. Kapp, 1963). Il évoque l'investissement nécessaire au progrès technique permettant de ne pas être en pénurie.

Pour Kapp ces dépenses sont souvent publiques, puisque « pour tout ce qui a trait aux ressources fondamentales, une société organisée a nécessairement devant elle un horizon plus vaste qu'un individu ou une firme privée » (W. Kapp, 1963). Il s'agit donc de l'ensemble des coûts, souvent portés par la société, que cache l'idée d'un progrès technologique spontané et d'une substitution de technologie ou de matière qui serait entièrement guidée par l'augmentation des prix. En effet, si la substitution se fait au moment où la rentabilité économique de la production de matière est compromise, c'est bien que des investissements ont été faits dans ce sens longtemps au préalable. Ainsi « les recherches courantes sur le dessalement de l'eau de mer, sur la mobilisation de l'énergie solaire, sur le développement de combustibles pour fusées et sur l'application industrielle de l'énergie atomique sont presque exclusivement financées par des sources publiques. […] le résultat des investissements dans la recherche n'est ni automatique ni certain. En outre, on ne peut pas rejeter d'emblée l'idée que la pénurie croissante et les prix montants […] profitent à certains propriétaires privés » (W. Kapp, 1963).

Si l'on généralise cette idée, parmi ces coûts sociaux, peuvent être comptabilisées des dépenses publiques qui ne sont pas directement fléchées comme des dépenses ayant pour vocation de lutter contre l'épuisement d'une ressource, mais qui ont pour conséquence de prendre en charge des solutions à l'épuisement des ressources. Il est proposé de comptabiliser dans les coûts sociaux de l'épuisement d'une ressource l'ensemble des dépenses publiques permettant :

- La substitution : d'une matière par une autre pour une application donnée, d'une application par une autre (dont l'usage reste le même), d'un usage par un autre ;
- Les gains en efficience matérielle le long des chaînes de production ;
- La mise en place du recyclage.

Pour cela, il s'agira de définir le périmètre des dépenses prises en compte comme relevant ou non d'une dépense concernant la matière étudiée : certaines dépenses sont directement fléchées sur une matière spécifiquement, d'autres sont des dépenses publiques d'ordre « général ».

5.1.2. Les déséconomies : pertes de ressources évitables à l'échelle de la chaîne globale de valeur

Il a été vu précédemment qu'une « approche institutionnelle du problème de l'utilisation des ressources révèle l'existence de fortes déséconomies au sens d'un gaspillage évitable sur le plan technique et économique " (Kapp, 1963). Ces déséconomies sont de deux types : a) Mise de fonds évitables qui font double emploi et coûts d'exploitation inutilement élevés et b) Pertes inutiles et irrécupérables de réserves.

Il est proposé dans la thèse, concernant l'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement, de ne pas prendre en compte les mises de fonds évitables qui font double emploi et les coûts d'exploitation inutilement élevés. Tout d'abord, parce que ce coût est pris en charge par des acteurs privés, déjà capturé dans les coûts d'opération et l'amortissement des coûts du capital des producteurs, et que donc, même s'il s'agit d'un « gâchis » techniquement évitable, ces déséconomies participent moins directement à la dynamique de report des coûts sur la société qui est celle des coûts sociaux. Cependant, l'analyse peut souligner, lorsque cela est pertinent ces déséconomies comme facteur participant à l'augmentation des coûts sociaux de l'épuisement. Par exemple les coûts d'exploitation inutilement élevés peuvent être liés à un procédé inefficient et donc à des pertes inutiles de matières.

En revanche, le fait que les pertes de matières provoquées par des facteurs tels que la conception des produits, les freins aux recyclages ou des modes de gestion des filières inefficients contribue directement à augmenter l'exploitation de la ressource et à l'augmentation des coûts sociaux de la production alors que cela pourrait être évité ou au moins diminué par la mise en place d'écoconception et d'une meilleure gestion de la production et du recyclage. Il existe un risque d'épuisement des ressources métalliques, liée aux limites physiques du recyclage et à l'impossibilité d'atteindre le « 0 perte » au sein des chaînes d'approvisionnement. Cependant des leviers d'actions sur ces chaînes de production existent pour limiter les pertes et faciliter le recyclage afin de retarder l'épuisement des ressources. Ceci correspond donc à un coût social tel que William Kapp les définit comme l'« ensemble des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble » générés par « les modes de production » et de consommation, dont les acteurs privés « ne sont pas tenus responsables » et qui « auraient pu être évités » (Kapp, 1963).

Ces déséconomies, soit les « pertes inutiles et irrécupérables de réserves », sont étudiées par Kapp au niveau de l'extraction, essentiellement parce qu'il s'est intéressé à des ressources énergétiques fossiles qui sont directement consommées par leur utilisation. Dans le cas des métaux, elles sont donc à élargir à l'échelle de la chaîne globale de valeur.

Dans le reste de la thèse le terme de « déséconomies » fait donc référence aux « pertes de ressources évitables à l'échelle de la chaîne globale de valeur ».

Une limite doit être soulignée par rapport à l'évaluation des pertes associées à l'épuisement d'une ressource : la thèse ne prendra pas en compte ici les pertes de matières liées à d'autres ressources non-renouvelables que la ressource métallique étudiée. En effet, dans la plupart des procédés d'exploitation des ressources métalliques, les intrants utilisés sont des ressources non renouvelables ou sont fabriqués à partir de ressources non-renouvelables. Or pour évaluer réellement les coûts sociaux associés à la perte de ces matières, il faudrait également évaluer les dépenses publiques liées à la prévention de l'épuisement de ces autres ressources et l'augmentation des coûts sociaux et environnementaux liés à la diminution des ressources nécessaires à la fabrication de ces intrants. Il paraît donc trop ambitieux d'élargir encore le champ d'investigation de la présente thèse en évaluant l'ensemble de ces coûts pour l'ensemble des intrants. Dans le cas d'étude présenté au chapitre suivant, nous nous contenterons donc d'évaluer ces pertes pour le néodyme.

Une méthode déjà existante peut permettre d'évaluer ces pertes le long des filières de production, lorsque les données disponibles sont suffisantes. Il s'agit de la « *Material Flow Accounting* » (MFA). C'est une méthode clef développée pour comptabiliser et analyser des flux de matières à l'échelle d'une filière, et permettre la quantification de l'utilisation des ressources naturelles par les sociétés,(M. Fischer-Kowalski et al., 2011). Cette méthode est internationalement reconnue comme un outil important pour l'évaluation des politiques concernant l'utilisation des ressources (repris par exemple par l'OCDE en 2004, et par l'Union Européenne dans divers guides). Le concept qui sous-tend la MFA est celui du métabolisme industriel (Ayres Engineering, 1989, sect. Industrial Metabolism), similaire au concept de métabolisme social (Marina Fischer-Kowalski, 1997; Martinez-Alier, 2009). Il décrit le phénomène de dépendance de nos sociétés à un approvisionnement en ressources naturelles et en énergie puisés dans l'environnement et de leur restitution sous forme de déchets, d'émissions, de matériaux en usage dispersif et de dépôts délibérés. Ce concept présente donc l'avantage d'intégrer différentes dynamiques, et d'articuler une lecture économique du fonctionnement des sociétés avec une analyse des problématiques environnementales et sociales liées aux flux de matière (M. Fischer-Kowalski et al., 2011).

Une quantification des pertes de matières peut être réalisée sur la base de la méthode MFA. Cependant, cette méthode est citée ici dans une visée programmatique, car comme le montrera le cas d'étude dans le chapitre suivant, les données disponibles n'étaient pas suffisantes pour appliquer cette méthode à l'échelle du périmètre choisie pour la chaîne de valeur. En l'absence de suffisamment de données disponibles, les pertes de matières ont été calculées pour l'étape extractive de la filière, en précisant le concept de « pertes irrécupérables ». En revanche, certains résultats de précédentes études MFA ont été utilisés sur l'aval de la filière (Guyonnet et al., 2015).

Enfin, le concept de déséconomies, correspondant à notre facteur d'épuisement « pertes quantitatives » de ressource est également lié à la diminution de la qualité des ressources secondaires (freins au recyclage : miniaturisation, etc.) comme souligné au début de ce paragraphe. Quand cela est possible il s'agira donc de documenter les déséconomies provoquées par les freins au recyclage dans la chaîne de valeur.

5.1.3. Les coûts liés à la démultiplication des impacts sociaux et environnementaux

Kapp reprend l'idée d'augmentation des coûts de production au fur et à mesure de la diminution de la qualité des ressources et son impact sur les coûts réels de l'exploitation. Il s'agit ici de modifier cette approche, non pour prendre en compte l'augmentation des coûts de production, mais pour prendre en compte l'augmentation des coûts sociaux et environnementaux liés à la diminution progressive de qualité due à l'exploitation de la ressource. En effet, comme pour les déséconomies, il nous semble que l'augmentation des coûts de production, si elle peut être un marqueur de la diminution de la qualité, reste à la charge de l'exploitant et ne correspond pas à la définition des coûts sociaux *stricto sensu*.

Comme vu dans la première partie de ce chapitre, le coût énergétique marginal peut être une source d'inspiration pour la mise en place d'un coût marginal environnemental et social lié à la déplétion de la ressource, comme un des facteurs du coût social de l'épuisement des ressources métalliques. En fonction du métal étudié, il faudra évaluer si une approche similaire peut être utilisée, car cette approche demande une connaissance solide de la corrélation entre la teneur et l'augmentation des coûts sociaux et environnementaux, et une capacité à projeter dans le futur le lien entre ces variables. Or comme cela a été souligné ci-avant, les données détaillées sur les exploitations sont rares (N. Adibi et al., 2017; Gérand et al., 2018), particulièrement pour les petits métaux dont l'exploitation est récente.

En l'absence de données suffisantes pour pouvoir établir des relations sur des bases statistiques, une solution à privilégier serait de proposer des scénarii d'exploitation future, appuyés sur les

connaissances géologiques, les types d'exploitation les plus probables, les rendements les plus courants, etc. Cependant une approche par scénario a le désavantage (par rapport au coût du surplus énergétique marginal) de ne pas rendre possible l'établissement d'un coût marginal moyen calculé sur du très long terme, mais seulement l'augmentation des coûts à venir sur du moyen terme.

Dans tous les cas, pour évaluer l'augmentation des coûts sociaux et environnementaux lié à la diminution de la qualité des ressources, il s'agira de procéder en trois temps.

Tout d'abord il s'agit d'évaluer la tendance de diminution de la qualité de la ressource, soit la diminution de la teneur du (ou des gisements) étudiés. En effet, la diminution de la qualité des ressources secondaires du fait des obstacles croissants au recyclage (comme vu dans les paragraphes 2.5 et 2.6 du chapitre 1) est difficile à quantifier et fera uniquement l'objet dans cette thèse d'une discussion quant aux pertes induites par ces obstacles et à la possibilité de lever les freins au recyclage. En revanche la diminution de la qualité des ressources au niveau des gisements est, elle, plus facilement quantifiable. Pour cela la méthode d'évaluation qui paraît la plus précise et directe est d'évaluer directement l'évolution des teneurs pour la ressource (ou le gisement) considérée. En effet, les méthodologies actuelles d'évaluation de l'épuisement ne se basent pas sur la diminution de la qualité ou de la teneur, mais sur la notion économique de réserve ou d'exergie et ne sont donc pas directement exploitables (voir Tableau 19 pour plus de détails). Seuls les modèles de (Tilton & Skinner, 1987; Yaksic & Tilton, 2009) dont le modèle théorique prend en compte la diminution de la qualité des ressources dans le temps, peuvent servir de point de comparaison entre les données réelles de diminution des teneurs d'exploitation et ce modèle théorique.

Ensuite, il faut identifier les coûts sociaux et environnementaux affectés par la diminution de la teneur et analyser s'il est possible de déterminer une relation entre diminution de la teneur et augmentation des coûts. Pour beaucoup de coûts sociaux, cette relation n'est pas quantifiable et se cantonnera à une description de la contribution de l'épuisement au coût social.

Enfin, les deux premières étapes permettent d'évaluer pour certains coûts, un coût social marginal moyen de la déplétion de la ressource. Pour cela, il faut choisir une méthode d'évaluation monétaire pour les impacts, qui sera discutée au paragraphe suivant.

Tableau 19 : Comparaison des approches pour évaluer les phénomènes d'épuisement. Source : d'après De Bruille, 2014; Henckens, Driessen, & Worrell, 2014; Yellishetty et al., 2012

Approche	Principaux auteurs	Ce qui est calculé	Lien avec notre définition de l'épuisement
Agrégation massique de l'extraction de ressources naturelles	Lindfors et al. 1995	Extraction des ressources primaires	Pas de prise en compte de la diminution de la qualité des ressources
Agrégation et évaluation basée sur réserve et la production annuelle	Guinée and Heijungs, 1995; Guinée 2002	Disponibilité économique de la ressource	
Cumulative supply curve	Tilton & Skinner, 1987; Yaksic & Tilton, 2009	Disponibilité économique de la ressource prenant en compte le coût de production, un modèle de réserve et de diminution de la teneur	Modèles de diminution des teneurs pour certains métaux

Approche	Principaux auteurs	Ce qui est calculé	Lien avec notre définition de l'épuisement
Economic resource scarcity potential (ESP)		Disponibilité géopolitique très similaire à l'évaluation des métaux "critiques" telle que mise au point par l'UE	Pas de prise en compte de la diminution de la qualité des ressources
Agrégation et évaluation basée sur l'exergie ou l'entropie	Bösch et al. 2007; Valero, 2008	Dépense matière et énergie d'un procédé	

Dans ce paragraphe les trois types de coûts sociaux au sens de Kapp ont été modifiés pour prendre en compte des coûts sociaux lié à l'épuisement des ressources métalliques. La redéfinition de ces coûts permet d'aborder 3 types de coûts sociaux : les dépenses publiques liées à la prévention de l'impact économique de l'épuisement, les déséconomies (pertes de ressources évitables à l'échelle de la chaîne globale de valeur), les coûts liés à la démultiplication des impacts sociaux et environnementaux.

Il a été vu dans le paragraphe 3.2.3. du chapitre 1 que l'épuisement des ressources était défini dans la thèse comme « la perte de quantité (perte de matière tout au long de la filière) et de qualité (diminution des teneurs du gisement et difficultés du recyclage) de la ressource au fur et à mesure de son utilisation » ; et comme un démultiplicateur d'impacts environnementaux, sanitaires et sociaux des filières de matières premières minérales d'autre part. Le Tableau 20 synthétise en quoi la redéfinition des coûts sociaux de l'épuisement rend compte de cet épuisement. La colonne sur les coûts de dommages/abattement, sera discutée au paragraphe suivant.

Tableau 20 : Les coûts sociaux au sens de Kapp et le phénomène d'épuisement

Typologie des coûts sociaux	Dommages/Abattement	Facteurs d'épuisement correspondant
Les dépenses publiques liée à la prévention l'épuisement	Abattement	Pertes de quantité et de qualité
Déséconomies	Dommages	Pertes de quantité
Augmentation des coûts sociaux et environnementaux	Dommages/Abattement	Augmentation des impacts sociaux et environnementaux

5.2. Les critères généraux d'évaluation monétaire des coûts sociaux et environnementaux et concept de Kapp

Afin de pouvoir évaluer les « coûts liés à la démultiplication des impacts sociaux et environnementaux », il s'agit de définir une approche d'évaluation monétaire de ces coûts. Ce paragraphe a donc pour but de donner des pistes et de définir des critères généraux pour une évaluation monétaire des coûts sociaux de l'épuisement au sens de Kapp.

Dans un premier temps, une synthèse des principales démarches existantes de monétarisation des impacts sociaux et environnementaux est réalisée. Puis la démarche proposée pour l'évaluation

monétaire des coûts sociaux est explicitée, et les approches d'évaluation monétaires retenues ou écartées par cette démarche sont présentées. Ensuite, le paragraphe revient sur la définition d'un coût « évitable » pour la préciser. Enfin, un résumé des questions à se poser pour l'évaluation monétaire des impacts sociaux et environnementaux est proposé.

5.2.1. Méthodologies utilisées pour évaluer les externalités

Dans ce paragraphe les différentes méthodes utilisées actuellement pour l'évaluation monétaire des externalités sont passées brièvement en revue. En effet, si le cadre conceptuel des externalités n'a pas été retenu pour évaluer les coûts sociaux de l'épuisement, les approches pour évaluer monétairement les externalités sont diverses et certaines approches peuvent être compatibles avec une démarche d'évaluation des coûts sociaux au sens de Kapp.

Les méthodologies utilisées pour évaluer les externalités sont souvent hétérogènes (CGSP, France Stratégue, 2013) utilisant aussi bien des estimations de dépenses réelles (publiques ou privées) engagées pour lutter contre les impacts négatifs, que des estimations tentant d'attribuer une valeur marginale à des biens non-marchands à travers des prix de marché ou à travers des enquêtes sur le consentement à payer des consommateurs. A partir de la classification de Pizzol et de ses collaborateurs établie à partir des différentes méthodes utilisées dans les ACV (Pizzol, Weidema, Brandão, & Osset, 2015), deux principes généraux peuvent être dégagés pour l'évaluation monétaires des externalités : la « détermination du consentement à payer » et la « détermination du coût potentiel de l'activité marginale de réduction ou de remplacement ». Généralement, les publications d'ACV monétarisées utilisent conjointement ces différentes approches d'évaluation des externalités. Il y a cependant des exceptions comme l'approche Eco-cost qui utilise uniquement des coûts d'abattements (Wenhao Chen & Holden, 2018).

Ce paragraphe s'attarde sur la détermination du consentement à payer, la détermination des coûts étant développée ci-après dans la démarche retenue pour la thèse.

La détermination du consentement à payer (CAP) peut se définir ainsi d'après Pizzol : le consentement des individus à payer pour éviter le changement (ou la volonté d'accepter une compensation pour consentir au changement) concernant un « bien non marchand ». Il s'agit de définir « la valeur que les individus sont disposés à payer pour un petit changement [par exemple] d'espérance de vie ou de qualité de la vie. Les individus évaluent les variations de la disponibilité des biens non marchands et les modèles d'évaluation monétaire modélisent cette valeur en termes économiques, afin de la rendre plus explicite et plus significative » (Pizzol et al., 2015). Les valeurs ainsi évaluées correspondent à ce que le rapport MODEXT désigne comme des « externalités intangibles » puisqu'elles « ne correspondent pas à des flux monétaires identifiés et sont évaluées par des moyens détournés » (Gérand et al., 2018).

Dans la mise en application du principe de la détermination du consentement à payer plusieurs approches existent. La classification établie par (Pizzol et al., 2015) est listée ci-dessous. Cependant,

les méthodes « contrainte budgétaire » [64] et « préférences observées »[65] n'ont pas été considérée comme une évaluation des externalités par l'autrice de ces lignes et ont été enlevées des méthodes de CAP :

- Préférences révélées : les préférences des individus sont déduites d'un marché de « substitution », c'est-à-dire un bien de marché dont le prix est indirectement affecté par les variations de disponibilité du bien non marchand. Cette approche utilise différentes méthodes (comportement préventif, frais de déplacement, prix hédoniques)
- Préférences déclarées : les préférences des individus sont établies sur la base des préférences exprimées en réponse à des questions de compromis hypothétiques. Soit par la méthode d'évaluation contingente (MEC) : volonté déclarée de payer ou d'accepter une compensation pour un changement spécifié de la disponibilité du bien. Soit par analyse conjointe par choix : des profils de biens sont présentés au consommateur par paires, les profils des biens sont pensés pour offrir une disponibilité différente et des prix différents pour ce qui est considéré être les attributs[66] du bien non marchand, ce qui permet de déduire la valeur marginale des attributs individuels d'un produit non marchand du choix du consommateur

Les méthodes d'évaluation monétaire de type CAP, qui évaluent des externalités intangibles, sont particulièrement utilisées pour évaluer des entités qui ne peuvent pas être reliées à une valeur d'usage ou dont la valeur ne peut se résumer à la valeur d'usage[67]. En effet, les externalités peuvent prendre en compte des valeurs d'usage. Par exemple, le rapport du MODEXT cite comme étant une externalité négative de la pollution de l'eau, la perte de revenus pour le tourisme associée aux algues vertes (Gérand et al., 2018). Dans ce cas le recours à une méthode de type CAP n'est pas nécessaire pour évaluer l'externalité. Cependant, pour prolonger l'exemple, si la pollution des rivières devient telle qu'elle menace l'ensemble de la biodiversité du littoral, une évaluation des pertes des revenus des pêcheurs pourrait être menée, mais il devient difficile d'affirmer que cette externalité rend compte de l'ensemble de la valeur de la perte de biodiversité associée. C'est pour tenter de prendre

[64] La « contrainte budgétaire » est une méthode pour l'évaluation du bien-être humain : selon les auteurs (Pizzol, Weidema, Brandão, & Osset, 2015) il s'agit de la détermination du consentement à payer pour une « année de vie pondérée par la qualité » dans une situation hypothétique sans externalités. La méthode d'évaluation monétaire considère que la valeur marginale d'une année supplémentaire de vie en bonne santé est déterminée sur la base de la production économique potentielle par habitant et par an. Ici le consentement à payer n'est pas réellement observé, révélé ou déclaré mais plutôt inféré à partir de la production économique potentielle par habitant qui a été perdue, et en partant du principe que la balance comptable (ce qui est gagné doit être dépensé), justifie de considérer comme égale la perte de production et le consentement à payer pour une « année de vie pondérée par la qualité. Cette affirmation est mise en doute par (Pizzol, Weidema, Brandão, & Osset, 2015), et il est considéré ici que la production économique potentielle par habitant et par an peut difficilement être considérée comme une externalité.

[65] Les préférences observées sont déterminées à partir des prix de marché, lorsqu'un marché existe pour le bien considéré (Pizzol, Weidema, Brandão, & Osset, 2015). Or la définition de Pigou est « l'effet de l'action d'un agent économique sur un autre qui s'exerce hors marché » (Pigou, 1932). Par définition ce ne sont pas des externalités. La confusion vient de l'utilisation du terme externalité par des méthodes comme ECOVALUE08, pour donner une évaluation monétaire de l'épuisement des ressources tout en utilisant l'approche par les prix (vue dans la partie 1 du présent chapitre), soit la rente hotellinienne, pour mesurer le facteur épuisement. Cette méthode d'évaluation ne peut pas être considérée comme une externalité.

[66] Un bien ou un service est décomposé en attributs ; par exemple, pour les services récréatifs du littoral girondin, trois attributs peuvent être retenus : « Océan », « Sable » et « Forêt » (Rambaud, 2015)

[67] « Les valeurs d'usage sont celles rencontrées classiquement dans la théorie économique standard (qu'on oppose généralement aux valeurs d'échange). Ainsi, elles correspondent aux bénéfices tirés d'une utilisation réelle d'une ressource donnée. Une valeur d'usage peut reposer sur un bien matériel, sur un service immatériel ou un mixte de ces deux notions. » (Rambaud, 2015)

en compte cette valeur non capturée par la valeur d'usage qu'est né le concept de valeur économique total, qui a été établie par le « Rapport Pearce » en 1989,et qui est un « instrument déterminant » de la notion de développement durable actuelle (Rambaud, 2015). Cette valeur économique totale est la somme des valeurs d'usage et de non-usage. Les valeurs de non-usage seront résumées ici à la valeur d'existence pour simplifier le propos. La valeur d'existence peut être définie comme la « prise en compte d'une entité socio-environnementale ''pour elle-même'' dans un cadre néoclassique » (Rambaud, 2015). Le concept de valeur d'existence reconnaît qu'une partie de l'utilité conférée par les individus à une entité (bien ou service) provient de la valorisation de cette entité uniquement par rapport à son état de conservation. Sa prise en compte passe par l'attribution d'une valeur monétaire à la valeur d'existence pour mettre cette « valeur en lien avec le niveau d'utilité engendré » par cette entité (Rambaud, 2015). La prise en compte de la valeur d'existence depuis le Rapport Pearce dans les travaux de l'ENC constitue « une certaine révolution par rapport à la pensée économique classique habituée aux seules valeurs d'usage » (Rambaud, 2015). Dans le cadre de l'ENC donner une valeur d'existence à une entité sert à empêcher sa dégradation ou sa destruction (Rambaud, 2015). La valeur d'existence vient ainsi corriger l'absence de prise en compte des consentements à payer pour la préservation d'une ressource, car dans le cadre de l'ENC, par définition la valeur totale est la somme des consentements à payer. Donc si des individus sont prêts à payer pour préserver une ressource alors cette valeur doit être prise en compte (Rambaud, 2015).

Les méthodes d'évaluation monétaires de type CAP sont donc particulièrement utilisées pour tenter d'établir des valeurs d'existence.

Deux raisons principales peuvent expliquer le recours fréquent aux méthodes de CAP. La première raison est que le recours à une méthode de type CAP est cohérente avec le cadre conceptuel de l'ENC pour prendre en compte les externalités. En effet dans ce cadre « la dégradation de l'environnement s'explique[nt] par l'absence […] de prix » (Gadrey & Lalucq, 2015). Il s'agit donc d'attribuer une valeur à l'entité à conserver pour éviter l'apparition d'une externalité, et la valeur économique de l'ENC est, par définition, l'ensemble des consentements à payer. Cette approche est donc même plus cohérente avec le cadre de l'ENC que l'évaluation des dépenses liées à la « détermination du coût potentiel de l'activité marginale de réduction ou de remplacement ». La deuxième raison est que l'évaluation du CAP peut pallier l'absence de données sur les coûts de réduction des dommages ou de remplacement, lorsqu'ils sont indisponibles, et surtout lorsque ces coûts ne peuvent être calculés du fait d'une perte définitive ou irréversible (par exemple l'extinction d'une espèce, la perte d'un écosystème rare, des pertes de vies humaines, etc.)

Enfin, les méthodes d'évaluation du CAP sont controversées. Notamment la MEC, qui est particulièrement usitée et qui consiste à mesurer les externalités via des enquêtes sur le consentement à payer pour la préservation de l'entité ou à recevoir un dédommagement. La principale critique concerne le niveau d'information des personnes interrogées sur les enjeux liés au sujet et le rôle du sondeur comme intermédiaire pour délivrer ces informations. Les quatre objections les plus soulevées peuvent être résumées ainsi (Hanemann, 1994 in Rambaud, 2015) :

- De petites modifications dans le questionnaire et/ou la façon de le présenter peuvent entraîner des changements significatifs au niveau des réponses ;
- L'étude peut elle-même créer les valeurs estimées, c'est-à-dire qu'elle peut faussement révéler des valeurs monétaires. Les personnes interrogées « se forcent » à faire émerger des valeurs artificiellement pour aller dans le sens de l'étude ;
- Le degré d'information sur les entités concernées et d'entraînement à ce type d'exercice des personnes interrogées peuvent avoir de réelles conséquences sur l'évaluation ;
- Les réponses ne peuvent être vérifiées, ce qui repose la question de la fiabilité.

5.2.2. DEMARCHE D'EVALUATION MONETAIRE DES COUTS SOCIAUX DANS LE CADRE DE LA THESE

Ce paragraphe a pour objectif de tracer les grandes lignes d'une évaluation monétaire des coûts sociaux cohérente avec le cadre conceptuel défini par Kapp. Le cadre d'analyse développé ici s'inscrit dans le prolongement du développement méthodologique d'analyse des coûts sociaux au sens de Kapp effectué par le Basic, et est différente de l'évaluation des externalités pratiquée actuellement par d'autres acteurs économiques, comme True Price, réalisant des évaluations sur les externalités qui font généralement appel à l'ensemble des méthodes de calcul des externalités, dont le CAP, et qui cherchent à attribuer une valeur économique totale aux biens de consommation (voir Annexe 5 pour plus de détails sur les différences conceptuelles et méthodologiques entre le travail du Basic et de True Price). Ce paragraphe cherche au contraire à mettre en place un cadre d'analyse permettant de valider ou rejeter le recours aux différentes méthodologies de calcul des coûts sociaux au regard des définitions posées précédemment.

Comme cela a été vu dans la partie 3 du présent chapitre, l'identification et l'évaluation des coûts sociaux a pour but dans le travail de Kapp d'interroger les causes, et les effets des systèmes institutionnels sur ces coûts sociaux pour les besoins de la formulation d'une politique minimisant, voire excluant l'apparition de coût sociaux, à l'échelle du cas d'étude (W. Kapp, 1963, pp. 200–205). Cette politique n'ayant pas pour objectif l'internalisation des coûts dans le prix des biens produits, mais la diminution effective des coûts sociaux par différents moyens. De plus, Kapp privilégie une approche préventive quant à la prise en charge des coûts sociaux par rapport à la prise en charge des dommages, ce qu'il souligne notamment sur la question de l'épuisement des ressources naturelles : « comparés aux coûts sociaux potentiels qui peuvent être occasionnés par un épuisement économiquement irréversible, les coûts effectifs nécessaires pour prévenir ces conséquences sociales préjudiciables sont relativement faibles » (W. Kapp, 1963). Enfin, pour Kapp, l'apparition des coûts sociaux est due à leur absence de prise en compte dans les coûts de la production.

Il s'agit donc de privilégier une approche d'évaluation monétaire qui permette la formulation d'une politique de prévention minimisant ou supprimant les coûts sociaux, sans se focaliser sur l'établissement d'un prix des entités sociales ou environnementales impactées. Suivant cet objectif, l'évaluation monétaire des coûts sociaux liés à la production est comprise comme l'ensemble des dépenses réellement engagées, ou qui pourraient être réellement engagées, pour la prise en charge des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble. C'est donc une démarche similaire à l'approche de « détermination du coût potentiel de l'activité marginale d'abattement ou de remplacement » (Pizzol, Smart, & Thomsen, 2014), ainsi définie par Pizzol et ses collaborateurs : ce sont les externalités « liées au coût des mesures (techniques) qui devraient être prises ailleurs dans la société pour atténuer / abattre / réduire / éviter / rétablir les émissions / dommages, soit totalement (réduction totale), soit partiellement (objectif politique) ».

Il est donc proposé ici d'adopter une approche d'évaluation monétaire des coûts sociaux résolument tournée vers les actions à engager pour diminuer les coûts sociaux et environnementaux. Les coûts sociaux évalués monétairement consistent donc dans les dépenses engagées ou à engager pour la prise en charge de dommages et conséquences négatives.

Lorsque les coûts sociaux ne sont pas pris en charge ou pas entièrement pris en charge, ce qui dans les faits est presque toujours le cas, il s'agira d'avoir recours à un scénario réaliste, c'est-à-dire prenant en compte des mesures de prise en charge des coûts sociaux pouvant techniquement être mises en œuvre (sans s'arrêter aux freins politiques, culturels, économiques qui peuvent être discutés dans un deuxième temps). En effet, il serait problématique de ne pas évaluer un coût social

parce que le problème n'est pas pris en charge par les pouvoirs publics ou autres parties prenantes concernées. Les coûts ne seraient alors que le reflet de la politique sociale ou environnementale des pouvoirs publics. Plusieurs scénarii peuvent être envisagés parmi lesquels la prise en charge totale des coûts sociaux (approche soutenabilité forte), et la prise en charge des coûts sociaux selon des objectifs fixés par des politiques ou des normes sociales et environnementales préalablement définies, si de telles politiques ou normes existent sur le dommage étudié. Cette volonté de « fonder l'évaluation sur les normes objectives des minimums sociaux [et environnementaux] et mesurer les coûts sociaux en écarts à ces minimums » (W. Kapp, 1963) est soulignée à plusieurs reprise par Kapp (W. Kapp, 1963). Pour lui cela permet de se départir du risque d'évaluer « les coûts sociaux d'après les propres normes et préférences du chercheur, ce [qui] serait introduire dans l'analyse économique des jugements de valeur hautement subjectifs, arbitraire et problématique » et peut être résolu par la référence à des « normes objectives» (W. Kapp, 1963). Ces normes sont pensées par Kapp comme étant à la fois le produit d'un consensus scientifique et d'une délibération sociale. S'il ne s'agit pas ici d'entrer dans le fond du débat sur les processus sociaux aboutissant à la création des normes, on soulignera que les minima sociaux et les normes relatives à la pollution sont loin de faire consensus universellement, évoluent, et en un mot sont le produit d'arbitrage et de négociation entre différents acteurs. Cette problématique des référentiels utilisés pour la prise en charge des coûts peut être en partie résolue en évaluant plusieurs niveaux de prise en charge.

L'évaluation monétaire ne prend donc pas en compte les externalités intangibles liées aux dommages irréversibles ou pertes définitives, et il s'agit donc d'une sous-estimation de l'ensemble des coûts sociaux provoqués par un modèle de production. L'objectif étant de faire une évaluation monétaire au plus près des dépenses réelles (ou qui pourraient l'être) engendrées par le phénomène des coûts sociaux. Il est proposé d'assumer le caractère incomplet de l'évaluation monétaire. En effet, l'évaluation monétaire des coûts sociaux se fait à minima dans le but de comparer différentes situations générant des coûts. L'important dans l'évaluation monétaire des coûts sociaux au sens de Kapp est donc de s'assurer de la comparabilité des résultats de l'estimation et non d'avoir une estimation la plus complète possible.

Tout d'abord, parce qu'il n'est pas question dans l'approche de Kapp de définir la valeur économique totale des biens de consommation, mais de trouver des dispositifs de prise en charge des coûts sociaux afin de les réduire ou de les supprimer. Comme l'objectif recherché n'est pas d'internaliser les externalités pour s'approcher de la valeur économique totale, mais de trouver des leviers pour diminuer les coûts sociaux, la logique de comparaison de différents modèles de production sur la base de dépenses réelles semble préférable. Par ailleurs, ces leviers n'excluent pas des mesures visant à modifier les prix, mais cela n'est pas une finalité en soi et se fait dans une logique instrumentale (comment modifier le prix ? quel est l'impact réel de la modification du prix ?) et non pour refléter une valeur d'existence évaluée sur la base d'enquêtes. Pour Pizzol et ses collaborateurs l'approche basée sur les coûts ne peut pas permettre d'atteindre un « optimum social », car elle n'est pas basée sur le CAP des individus (ou alors partiellement à travers une approche du CAP politique) (Pizzol et al., 2014). Pour Kapp, l'optimum social n'est pas défini par le système de prix, mais à travers la mise en place de minima sociaux et environnementaux qui fixent des objectifs pour la réduction des coûts sociaux. Autrement dit, pour Kapp les objectifs politiques fixés collectivement et si possible sur des constats scientifiques « objectifs » définissent l'optimum social. Cette divergence n'est pas nouvelle puisque face à l'approche utilitariste (adoptée par l'ECN), une critique habituelle consiste à souligner la difficulté de faire des comparaisons interpersonnelles quantitatives des utilités, et à affirmer que l'optimum social ne peut se résumer à la somme des utilités individuelles.

Ensuite, le caractère incomplet de cette évaluation est pallié par la prise en compte des dommages irréversibles ou pertes définitives, pour elles-mêmes. En effet, l'approche des coûts sociaux au sens

de Kapp n'exclut pas le recours à des analyses quantitatives non monétaires et des analyses qualitatives pour rendre compte des dommages sociaux et environnementaux « intangibles ». Dans cette logique, où il n'est pas recherché d'avoir un indicateur unique pouvant être un révélateur du « vrai prix », il devient peu souhaitable d'estimer monétairement des pertes et dommages qui sont difficilement réductibles à une évaluation monétaire. Ainsi, il s'agit tout simplement de prendre en compte des phénomènes pour eux-mêmes pour rendre compte des pertes importantes pour la société que sont les pertes de vies humaines, la perte définitive d'écosystèmes rares, etc. Ainsi, cela donne une analyse comparant des dépenses publiques liées aux coûts sociaux dans des domaines où ces dépenses publiques sont réellement mobilisées (ou mobilisables) et de faire apparaître les pertes et les dommages irréversibles pour eux-mêmes dans des domaines où ces dépenses ne sont pas mobilisables. Il s'agit finalement d'une évaluation, en accord avec le concept de « faible comparabilité des valeurs » (Martinez-Alier et al., 1998), qui pour Martinez-Alier devrait être un des critères de définition d'une approche d'économie écologique.

Cela pose bien sûr un problème quant à la comparabilité des résultats entre plusieurs analyses de coûts sociaux. En effet, si des pertes et dommages irréversibles sont liés aux différents modèles de production comparés, cela rend les résultats plus difficilement comparables. Cependant, les difficultés liées à la comparaison de telles pertes (comparaison de la perte d'un écosystème pour un modèle de production et de pertes de vies humaines dans un autre modèle de production par exemple) sont réelles et les aplanir au sein d'un indicateur unique ne fait qu'internaliser un arbitrage nécessairement social et politique dans l'évaluation monétaire. Dans l'idéal, il est proposé de favoriser l'établissement de scénarii où ces pertes sont évitées. Si ces pertes et dommages irréversibles ne sont pas évitables dans l'étude menée, alors dans une démarche de soutenabilité forte, il faudrait en conclure que ces modèles ne sont pas soutenables et donc à proscrire. Dans ce cas, les résultats de l'évaluation monétaire et non monétaire doivent faire l'objet d'une discussion.

Enfin, il s'agit de développer ce qui est entendu par « dépenses engagées ou à engager pour la prise en charge de dommages et conséquences négatives ». En effet, de nombreuses dépenses différentes peuvent être prises en compte dans l'approche par les coûts, dont la classification n'est pas unique. Dans la pratique sont distingués : coût de réduction / de remplacement (Pizzol et al., 2014), coûts « défensifs » (dommages, atténuation, remplacement…) / coûts « d'abattement » (qui permettraient d'éviter le dommage) (Ademe, BASIC, AScA, 2017b), coûts directs et indirects (Gérand et al., 2018), etc.

Il est proposé de distinguer ici deux types principaux de coûts : les coûts orientés vers les dommages et les coûts d'abattement. Dans tous les cas évoqués ci-dessous, les coûts peuvent être directs ou indirects[68] (Gérand et al., 2018) et la prise en compte des phénomènes en cascade dépend du choix du périmètre d'étude.

<u>Les coûts orientés vers les dommages :</u>

[68] « Les externalités directes correspondent à des coûts directs supportés par la société. Par exemple, la pollution de l'air à des conséquences directes sur la santé humaine. Les coûts associés (dépenses de santé prises en charge par la sécurité sociale) correspondent à des externalités directes. Les externalités indirectes, elles, sont issues de processus en cascade. Par exemple, la pollution de l'eau par des substances eutrophisantes entraine le surdéveloppement d'algues vertes. Le coût lié au ramassage de ces algues correspond à des externalités directes, tandis que le manque à gagner régional lié à la perte d'activité touristique (du fait de la présence de ces algues) correspond à des externalités indirectes. » (Gérand et al., 2018)

Il s'agit ici de prendre en charge les conséquences d'un phénomène de coût social. Il s'agit donc de cartographier l'ensemble des conséquences directes et indirectes d'un coût social et d'évaluer les dépenses qui y sont liées, ou qui y serait liées si les dépenses étaient réellement effectuées.

Pour reprendre l'approche de Kapp : il s'agit du coût social d'être en dessous des minima sociaux et environnementaux.

Le critère de distinction de ces coûts avec les coûts d'abattement est que les coûts réapparaissent si les dépenses ne sont plus prises en charge.

Comme vu ci-avant plusieurs niveaux de prises en charge de ces coûts peuvent être évalués. A titre d'exemple, il est proposé ici la prise en charge totale (dans la mesure du possible) des conséquences (remédiation) et la prise en charge proposée par Kapp pour ramener les coûts au niveau de minima sociaux et environnementaux fixés par ailleurs (ce qui constitue un type d'atténuation parmi d'autres).

- Remédiation : les coûts à payer pour prendre en charge l'ensemble des impacts. Par exemple pour le changement climatique c'est le coût pour prendre en charge l'ensemble des impacts : conséquences sanitaires, mesures d'adaptation, etc. Les dommages irréversibles (pertes d'écosystèmes, de biodiversité, désertification, etc.), sont pris en compte par une analyse non monétaire ;
- Atténuation : les coûts à payer pour prendre en charge l'ensemble des impacts pour ramener chaque impact au seuil du minimum social.

Cette approche de coûts orientée dommages permet de donner un aperçu des dépenses encourues du fait de l'existence de pertes et conséquences négatives non prises en charge par les acteurs de la production. Son exhaustivité dépend du périmètre choisi et bien sûr des données disponibles. Cependant, selon Pizzol et ses collaborateurs, les approches par les coûts ne peuvent pas prendre en compte les dommages, et les méthodes de type CAP prennent mieux en compte les dommages (Pizzol et al., 2014). Cette affirmation est partiellement vraie puisque, comme vu précédemment, les dommages et pertes ne sont pris en compte dans l'évaluation monétaire qu'à condition qu'ils ne soient pas irréversibles et qu'une dépense puisse remédier ou atténuer le dommage ou la perte. Si aucune dépense ne peut y remédier alors cette perte doit être prise en compte pour elle-même.

<u>Les coûts d'abattement</u> :

Il s'agit ici de prendre en charge les causes d'un phénomène de coût social.

Pour reprendre l'approche de Kapp : il s'agit du coût social de rétablir les minima sociaux de manière structurelle.

Le critère de distinction de ces coûts avec les coûts orientés vers les dommages, c'est que lorsque ce coût est payé l'enjeu à l'origine des coûts est stoppé.

A titre d'exemple, il est proposé ici la prise en charge totale (dans la mesure du possible) des conséquences (remédiation) et la prise en charge proposée par Kapp pour ramener les coûts au niveau de minima sociaux et environnementaux fixés par ailleurs (ce qui constitue un type d'atténuation parmi d'autres).

- Remédiation : les coûts à payer pour faire face à l'enjeu (par exemple pour le changement climatique c'est le coût de la transition énergétique vers une société sans énergie fossile) ;
- Atténuation : les coûts à payer pour prendre en charge une partie de l'enjeu en accord avec des objectifs politiques précédemment établis. Par exemple pour le changement climatique,

il s'agit des dépenses liées aux respects des objectifs nationaux et internationaux en termes de réduction des gaz à effet de serre.

Enfin, il est à noter que ce qui permet de comparer différents modèles de production à travers différents scénarii évaluant les coûts sociaux, n'est pas nécessairement la somme des coûts de dommages et des coûts d'abattement. En effet, pour illustrer le propos, si l'on imagine un modèle de production dont les coûts d'abattement sont élevés et les coûts orientés dommages élevés, mais dont les coûts sociaux peuvent être ramenés à 0 après le paiement des coûts d'abattement, celui-ci peut être préférable à un modèle de production dont les coûts sociaux sont moindres, mais pour lequel il n'existe pas de solution pour les ramener à 0. Pour prendre en compte la différence de nature des coûts d'abattement et des coûts orientés dommages, il s'agit de bien identifier la nature du coût payé et de bien définir les scénarii de prise en charge des coûts. Ainsi, on privilégiera des scénarii de moyen ou long terme qui évaluent les conséquences des actions de prise en charge des dommages et d'abattement.

5.2.3. Coût social, coût évitable

Le concept tel que défini par Kapp est imprécis. Il n'existe pas de proposition pour définir ce que veut dire « aurait pu être évité ». Dans la thèse le caractère « évitable » des coûts sociaux est compris dans le sens de pertes et dommages techniquement évitables soit par la substitution d'un produit par un autre, par la mise en place d'un procédé différent (de production, de gestion des déchets, de transport), par le déplacement des installations de production, par la mise en place de conditions de travail différentes, etc. Pour définir le périmètre des coûts sociaux, il ne s'agit donc pas de voir si le problème est « économiquement » évitable puisque c'est justement l'attribution de la valeur et l'allocation des ressources par le système économique qui est questionnée ici. L'idée est donc de se poser la question de savoir s'il est possible d'éviter un dommage dans l'absolu, d'évaluer le coût nécessaire pour éviter ce dommage, et seulement ensuite de discuter de la possibilité de prise en charge de ces coûts. Toute autre définition du caractère évitable d'un coût social consisterait à intégrer dans la définition du coût la rationalité actuelle du système économique et conclurait à l'efficience de l'allocation des ressources.

Après avoir ainsi défini le caractère évitable des coûts sociaux, un certain nombre de questions demeurent, liées au périmètre de l'étude. En effet la question de savoir si un coût est évitable ou non sera nécessairement liée à la définition de l'objet d'étude. Par exemple : réfléchit-on à « produit constant » ? Si un coût social peut être évité par la substitution d'un produit de consommation par un autre, se pose la question de savoir si le produit substituant a les mêmes propriétés que le précédent, car il est rare que des produits différents puissent avoir exactement la même fonction. Se pose également la question de savoir si ce nouveau produit génère d'autre coûts sociaux, non identifiés dans l'étude du premier. Plus généralement, il n'est pas rare que chercher des leviers pour réduire les coûts conduise à revoir la définition du périmètre d'étude. Il s'agit donc de prendre en compte cette question de l'évitement des coûts dans la définition du périmètre de recherche.

5.2.4. Conformité de la démarche avec les critères de Kallis, Gómez-Baggethun, et Zografos

Parmi les différentes positions au sein de l'économie écologique concernant l'évaluation monétaire des impacts sociaux et environnementaux, Kallis, Gómez-Baggethun, et Zografos ont proposé une approche pragmatique pour évaluer la pertinence d'avoir recours à une évaluation monétaire dans la recherche d'une plus grande soutenabilité (Kallis, Gómez-Baggethun, & Zografos, 2013). Ils listent ainsi une série de questions à se poser pour envisager d'avoir recours à l'évaluation monétaire :

1. Est-ce que le recours à l'évaluation améliore les conditions environnementales concernées ?
2. Est-ce que cela réduit les inégalités et rééquilibre le rapport de force ?
3. Est-ce qu'il est probable que l'évaluation supprime d'autres langages d'évaluation et des institutions articulant des valeurs ?
4. Est-ce que cela sert des processus d'appropriation par des propriétaires privés d'espaces préalablement dévolus à l'usage collectif (communs) ?

Les réponses étant censées remettre en question l'évaluation monétaire étant : 1 (Non), 2 (Non), 3 (Oui), and 4 (Oui).

Il est difficile de répondre aux questions de ce guide a priori, puisque les conséquences concrètes d'une évaluation dépendent essentiellement de l'utilisation qui en est faite. Cependant, on peut souligner pour les questions 1 et 2, que l'approche des coûts sociaux proposée est pensée pour la réduction effective des pertes et conséquences négatives de la production et rejette les mécanismes de compensation. Pour la question 3, il peut être souligné que l'évaluation monétaire se cantonne à aux dépenses qui peuvent être mises en œuvre pour prendre en réduire ou supprimer les coûts sociaux et qu'en cela elle n'a pas pour finalité de remplacer d'autre système de prise en compte de la valeur. Enfin, il n'est pas possible de répondre à la dernière question sur la base des critères généraux définis ici, c'est donc une question à se poser sur la base des cas d'étude appliquant cette approche des coûts sociaux.

Il a donc été vu dans ce paragraphe que deux approches principales étaient utilisées pour l'évaluation monétaire des externalités : la « détermination du consentement à payer » et la « détermination du coût potentiel de l'activité marginale de réduction ou de remplacement ». L'approche d'évaluation monétaire pour la prise en compte des coûts sociaux et environnementaux qui est proposée dans la thèse a pour objectif de permettre la formulation d'une politique de prévention minimisant ou supprimant les coûts sociaux, sans se focaliser sur l'établissement d'un prix des entités sociales ou environnementales impactées. Suivant cet objectif, l'évaluation monétaire des coûts sociaux liés à la production est comprise comme l'ensemble des dépenses réellement engagées, ou qui pourraient être réellement engagées, pour la prise en charge des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble. C'est donc une démarche similaire aux approches par les coûts, parfois utilisées pour évaluer les externalités. Il est proposé de comparer différents modèles de production à travers l'établissement de scénarii de prise en charge des coûts sociaux : la prise en charge totale des coûts sociaux (approche soutenabilité forte), et la prise en charge des coûts sociaux selon des objectifs fixés par des politiques ou des normes sociales et environnementales préalablement définies, si de telles politiques ou normes existent sur le dommage étudié. La comparaison de ces différents scénarii se fait à travers l'évaluation de deux types de coûts sociaux : les coûts orientés vers les dommages (les dépenses liées à l'ensemble des conséquences directes et indirectes d'un coût social, et qui ne permettent pas de supprimer définitivement la cause du coût social) et les coûts d'abattement (les dépenses liées à la suppression ou l'atténuation des causes d'un phénomène de coût social). L'évaluation monétaire ne prend donc pas en compte les externalités intangibles liées aux dommages irréversibles ou pertes définitives. Ces dommages et pertes irréversibles seront pris en compte à travers une analyse quantitative ou qualitative, mais pas à travers une démarche de monétarisation. Si dans l'approche des externalités il est considéré qu'une approche basée sur les coûts ne peut pas permettre d'atteindre un « optimum social », car elle n'est pas basée sur le consentement à payer des individus, dans une évaluation des coûts sociaux au sens de Kapp,

l'optimum social n'est pas défini par le système de prix, mais à travers la mise en place de minima sociaux et environnementaux qui fixent des objectifs pour la réduction des coûts sociaux.

5.3. L'identification des chaînes de causalité circulaire cumulative amplifiant la génération de coûts sociaux

Dans ce paragraphe, il s'agit d'identifier des pistes méthodologiques pour mettre en lien l'évaluation des coûts sociaux et environnementaux avec l'organisation de la chaîne globale de valeur afin de mettre en évidence les interactions entre différents niveaux d'analyse et les éventuelles chaînes de causalité circulaire cumulative.

Pour mettre en lien l'analyse de la CGV et des coûts sociaux, il s'agit d'abord de problématiser l'analyse de la CGV en fonction des coûts sociaux étudiés.

Pour rappel, en 2005, Gereffi, Humphrey et Sturgeon ont consolidé l'approche des « filières globales » en développant le concept de CGV. L'analyse CGV telle que définie par Gereffi (Gereffi, Humphrey, Kaplinsky, & Sturgeon*, 2001) repose sur l'étude de quatre aspects principaux : l'ancrage géographique des différents maillons de la chaîne, l'étude de la structure intrants-produits (ou input-output), le cadre institutionnel ou la dimension socio-institutionnel (Vercher-Chaptal & Palpacuer, 2013), et le mode de gouvernance. La méthodologie mise en place par (Kaplinsky & Morris, 2001) pour réaliser une analyse de la CGV préconise de commencer l'analyse par la définition d'un « point d'entrée » qui peut être un acteur ou une thématique (Kaplinsky & Morris, 2001), et qui permet de remonter les liens de la chaîne afin de définir le périmètre de l'analyse de la chaîne de valeur étudié. Dans notre cas il s'agit de définir le point d'entrée de l'analyse CGV en fonction de la question de recherche : comment évaluer les coûts liés à l'épuisement physique des ressources métalliques dans une approche de soutenabilité forte ? Comment définir ces coûts, et évaluer leur prise en charge ? Le point d'entrée est donc ici le rôle de l'organisation de la CGV dans les dynamiques d'épuisement de la ressource. Il s'agira donc de déterminer sur quels facteurs de l'épuisement (diminution de la qualité/de la quantité de la ressource et augmentation des impacts sociaux et environnementaux liée à l'épuisement) les acteurs de la chaîne étudiée jouent un rôle.

Le point de départ des entretiens à mener pour analyser les quatre aspects principaux de la chaîne et leur lien avec l'épuisement des ressources sera à préciser en fonction d'une première revue de la bibliographie permettant de cartographier les acteurs et leur potentielle contribution à/ou prise en charge des dynamiques d'épuisement.

A partir des entretiens menés et de la recherche bibliographique des points clefs de l'organisation de la CGV sont dégagés en lien avec la question de recherche.

Ensuite, l'évaluation des coûts sociaux liés à l'épuisement de la ressource étudiée est menée (dépenses publiques, déséconomies, augmentation des autres coûts sociaux) sur la base des entretiens et d'une recherche bibliographique.

Enfin, il s'agit de mettre en lumière les interactions entre CGV et coûts sociaux, en identifiant les points clefs de l'organisation de la CGV qui viendraient renforcer ou prévenir les coûts sociaux de l'épuisement. A travers l'étude des quatre caractéristiques principales de la CGV (l'ancrage géographique des différents maillons de la chaîne, l'étude de la structure intrants-produits, le cadre institutionnel), on tente ainsi de dégager des mécanismes générateurs de coûts sociaux, qui participeraient à instituer des boucles de renforcement des coûts sociaux, ou autrement dit des CCC. Sebastian Berger souligne que l'étude des CCC, « se concentre donc sur tous les facteurs pertinents et refuse de travailler avec des modèles analytiquement fermés. Bien entendu, les facteurs pertinents ne peuvent être déterminés que de manière empirique dans une situation donnée » (S. Berger, 2017). La détermination empirique passe donc ici par la détermination des facteurs clefs de

l'épuisement à travers les entretiens menés dans le cadre de l'analyse des CGV et par l'étude des données et de la littérature sur les dommages et pertes liées à la production de la ressource considérée.

Finalement, les résultats de l'analyse de ces interactions prennent la forme d'une cartographie des interactions entre les facteurs clefs de l'organisation de la CGV et des coûts sociaux de l'épuisement. Cette cartographie prend la forme d'une simple schématisation des interactions, qui permet d'éclairer la discussion sur les leviers et les freins en place pour la mise en place d'actions pour la réduction des coûts sociaux. Comme cela a été fait dans ce chapitre sur l'exemple du cas d'étude de l'exploitation pétrolière de Kapp (Figure 25). Cette schématisation reste donc relative à un cas d'étude donné, à une géographie donnée, et à un moment donné et ne permet pas *a priori* d'établir un modèle d'équilibre général.

Les différentes étapes proposées pour mettre en lien l'évaluation des coûts sociaux et environnementaux avec l'organisation de la chaîne globale de valeur et identifier les éventuelles chaînes de causalité circulaire cumulative sont donc :

1. Déterminer un point d'entrée pour l'analyse de la CGV étudiée en fonction de la question de recherche, ici la contribution de l'organisation de la chaîne aux dynamiques d'épuisement ;
2. Cartographier les acteurs de la chaîne et choisir les entretiens à mener ;
3. Identifier les points clefs de l'organisation en lien avec la question de recherche ;
4. Evaluer les coûts sociaux en lien avec l'épuisement (dépenses publiques, déséconomies, augmentation des autres coûts sociaux)
5. Cartographier les interactions entre CGV et coûts sociaux, en identifiant les points clefs de l'organisation de la CGV qui viendraient renforcer ou prévenir les coûts sociaux de l'épuisement.

Dans cette dernière partie, un cadre pour évaluer les coûts sociaux de l'épuisement des ressources métalliques au sens de Kapp a été développé afin de faciliter son application. Ce cadre n'a pas pour but de fournir une méthodologie complète, mais plutôt de donner des pistes pour une évaluation des coûts sociaux de l'épuisement au sens de Kapp. En effet, la démarche de l'application du travail de Kapp d'analyse des coûts sociaux à un cas pratique est en grande partie exploratoire, puisque ses travaux et les travaux des auteurs actuels mobilisant le concept de coût social ne fournissent pas à la connaissance de l'autrice de méthodologie pour les évaluer.

Tout d'abord, la typologie des coûts sociaux de l'épuisement au sens de Kapp a été légèrement modifiée pour prendre en compte des coûts sociaux lié à l'épuisement des ressources métalliques. La redéfinition de ces coûts permet d'aborder 3 types de coûts sociaux : les dépenses publiques liées à la prévention de l'impact économique de l'épuisement, les déséconomies (pertes de ressources évitables à l'échelle de la chaîne globale de valeur), les coûts liés à la démultiplication des impacts sociaux et environnementaux.

Ensuite, des critères généraux pour l'évaluation monétaire des coûts sociaux ont été précisés. L'approche d'évaluation monétaire pour la prise en compte des coûts sociaux et environnementaux qui est proposée dans la thèse a pour objectif de permettre la formulation d'une politique de prévention minimisant ou supprimant les coûts sociaux, sans se focaliser sur l'établissement d'un prix des entités sociales ou environnementales impactées. Suivant cet objectif, l'évaluation monétaire des coûts sociaux liés à la production est comprise comme l'ensemble des dépenses réellement engagées, ou qui pourraient être réellement engagées, pour la prise en charge des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son

ensemble. Il est proposé de comparer différents modèles de production à travers l'établissement de scénarii de prise en charge des coûts sociaux : la prise en charge totale des coûts sociaux (approche soutenabilité forte), et la prise en charge des coûts sociaux selon des objectifs fixés par des politiques ou des normes sociales et environnementales préalablement définies (approche de Kapp). La comparaison de ces différents scénarii se fait à travers l'évaluation de deux types de coûts sociaux : les coûts orientés vers les dommages (les dépenses liées à l'ensemble des conséquences directes et indirectes d'un coût social, et qui ne permettent pas de supprimer définitivement la cause du coût social) et les coûts d'abattement (les dépenses liées à la suppression ou l'atténuation des causes d'un phénomène de coût social). L'évaluation monétaire ne prend donc pas en compte les externalités intangibles liées aux dommages irréversibles ou pertes définitives. Ces dommages et pertes irréversibles seront pris en compte à travers une analyse quantitative ou qualitative, mais pas à travers une démarche de monétarisation. Si dans l'approche des externalités il est considéré qu'une approche basée sur les coûts ne peut pas permettre d'atteindre un « optimum social », car elle n'est pas basée sur le consentement à payer des individus, dans une évaluation des coûts sociaux au sens de Kapp, l'optimum social n'est pas défini par le système de prix, mais à travers la mise en place de minima sociaux et environnementaux qui fixent des objectifs pour la réduction des coûts sociaux.

Enfin, des pistes ont été développées pour l'analyse des causes systémiques liés à ces coûts sociaux. Cette analyse passe par la mise en lien de l'évaluation des coûts sociaux et environnementaux avec l'organisation de la chaîne globale de valeur afin de mettre en évidence les interactions entre différents niveaux d'analyse et d'identifier d'éventuelles chaînes de causalité circulaire cumulative. Pour cela les différentes étapes proposées sont :

1. Déterminer un point d'entrée pour l'analyse de la CGV étudiée en fonction de la question de recherche, ici la contribution de l'organisation de la chaîne aux dynamiques d'épuisement ;
2. Cartographier les acteurs de la chaîne et choisir les entretiens à mener ;
3. Identifier les points clefs de l'organisation en lien avec la question de recherche ;
4. Evaluer les coûts sociaux en lien avec l'épuisement (dépenses publiques, déséconomies, augmentation des autres coûts sociaux)
5. Cartographier les interactions entre CGV et coûts sociaux, en identifiant les points clefs de l'organisation de la CGV qui viendraient renforcer ou prévenir les coûts sociaux de l'épuisement.

Conclusion du chapitre 2

L'épuisement a été défini dans le chapitre 1 comme deux phénomènes conjoints, continus et irréversibles que sont les pertes de quantité et de qualité de la ressource, et comme un démultiplicateur d'impacts environnementaux, sanitaires et sociaux des filières de matières premières minérales d'autre part. Le chapitre 1 se concluait sur le constat du peu d'évaluations quantitatives et qualitatives sur lesquelles s'appuyer pour étayer ou rejeter l'importance des dommages liés à l'épuisement des ressources métalliques et aux coûts pour la société de ces activités économiques. Or, la revue effectuée dans la première partie de ce chapitre renforce ce constat sur le manque d'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement. En effet, les approches existantes d'évaluation monétaire des coûts liés à l'épuisement ne prennent pas en compte le lien entre l'épuisement et l'augmentation des impacts sociaux et environnementaux. Cette absence de prise en comptes des coûts liés aux impacts sociaux et environnementaux est un angle mort : dans un cadre de comptabilisation des coûts où n'apparaissent pas les coûts associés aux impacts

sociaux et environnementaux, le report des coûts réels de la production peut se faire sur plusieurs plans : d'un acteur à un autre, dans le temps, dans l'espace. Dans ce contexte, la recherche d'une diminution des coûts n'est pas nécessairement un moteur de progrès technologique, mais peut être un des facteurs explicatifs des transferts de coûts vers les sphères sociale et biophysique. Face à ces considérations, dans une perspective de soutenabilité forte, la question prioritaire n'est plus de savoir pour combien de temps les ressources seront disponibles à un coût économique raisonnable, mais quels coûts, au sens de pertes sociales et environnementales irréversibles, la société est prête à supporter pour exploiter des ressources dont les effets de l'épuisements physiques sont déjà présents. La question de recherche peut donc être ainsi formulée : comment évaluer les coûts liés à l'épuisement physique des ressources métalliques dans une approche de soutenabilité forte ? Comment définir ces coûts, et évaluer leur prise en charge ?

Pour répondre à cette question, ce chapitre s'est intéressé à l'approche des externalités qui étudie cette question du report des coûts sur la société et l'environnement par des acteurs économiques. Cependant, l'approche des externalités ancrée dans l'économie environnementale, mais également largement utilisée par les économistes écologiques, ne prend pas non plus en compte le lien entre déplétion (ou épuisement physique) et augmentation des impacts sociaux et environnementaux. Et surtout, malgré la diversité des approches utilisées pour évaluer les externalités et l'utilisation répandue de cette approche, les difficultés soulevées dans le premier chapitre concernant la prise en compte des irréversibilités et de la substituabilité des ressources restent vraies sur la question de la dégradation des ressources naturelles. C'est pourquoi, un autre cadre conceptuel est proposé pour définir une approche d'évaluation des coûts sociaux et environnementaux de l'épuisement.

Ce chapitre a donc proposé un cadre pour l'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement des ressources qui puisse prendre en compte la question de l'interaction entre sphère économique, sociale et biophysique.

Ce cadre s'appuie sur l'étude de Kapp des coûts sociaux de l'entreprise privée (W. Kapp, 1963), qui définit un coût social comme l'« ensemble des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble » générés par « les modes de production » dont les acteurs privés « ne sont pas tenus responsables » et qui « auraient pu être évités » (W. Kapp, 1963). Son approche est intégrée et transdisciplinaire et s'attache à étudier les causes et les principales solutions au problème des coûts sociaux en faisant le lien entre des considérations économiques et la prise en compte d'autres savoirs, notamment issus des sciences naturelles, comme les phénomènes physiques d'épuisement. Pour cela, il fait appel au concept de causalité circulaire cumulative (CCC), qui met en lumière des interactions qui viendraient renforcer des coûts sociaux déjà existants, et les mécanismes institutionnels à l'origine de ce renforcement.

Le cadre développé pour l'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement des ressources métalliques au sens de Kapp n'a pas pour but de fournir une méthodologie complète, mais plutôt de donner des pistes pour une évaluation des coûts sociaux de l'épuisement au sens de Kapp. En effet, la démarche de l'application du travail de Kapp d'analyse des coûts sociaux à un cas pratique est en grande partie exploratoire, puisque ses travaux et les travaux des auteurs actuels mobilisant le concept de coût social ne fournissent pas à la connaissance de l'autrice de méthodologie pour les évaluer.

Pour prendre en compte le contexte actuel de globalisation reliant les économies nationales et donnant la capacité aux acteurs économiques de transférer des impacts sociaux et environnementaux, d'un bout à l'autre de la filière, il a été jugé nécessaire d'étendre l'objet d'étude initial de Kapp (les entreprises privées) pour prendre en compte l'organisation des filières mondialisées. Pour cela la thèse s'appuie sur l'analyse des chaînes globales de valeur (CGV), telle que développée par Palpacuer et Bair. D'autre part, il s'agit de mobiliser la méthodologie de Gereffi

(Gereffi et al., 2005) afin de décrire les CGV à travers 4 dimensions principales (input-output, géographie, structure de gouvernance, contexte institutionnel).

L'analyse du problème de l'épuisement menée par Kapp a permis de formuler 3 types principaux de coûts sociaux liés à l'épuisement : les dépenses publiques liées à la prévention de l'impact économique de l'épuisement, les déséconomies (pertes de ressources évitables à l'échelle de la chaîne globale de valeur), les coûts liés à la démultiplication des impacts sociaux et environnementaux.

L'approche d'évaluation monétaire pour la prise en compte des coûts sociaux et environnementaux qui est proposée dans la thèse a pour objectif de permettre la formulation d'une politique de prévention minimisant ou supprimant les coûts sociaux, sans se focaliser sur l'établissement d'un prix des entités sociales ou environnementales impactées. Suivant cet objectif, l'évaluation monétaire des coûts sociaux liés à la production est comprise comme l'ensemble des dépenses réellement engagées, ou qui pourraient être réellement engagées, pour la prise en charge des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble. Il est proposé de comparer différents modèles de production à travers l'établissement de scénarii de prise en charge des coûts sociaux : la prise en charge totale des coûts sociaux (approche soutenabilité forte), et la prise en charge des coûts sociaux selon des objectifs fixés par des politiques ou des normes sociales et environnementales préalablement définies (approche de Kapp). La comparaison de ces différents scénarii se fait à travers l'évaluation de deux types de coûts sociaux : les coûts orientés vers les dommages (les dépenses liées à l'ensemble des conséquences directes et indirectes d'un coût social, et qui ne permettent pas de supprimer définitivement la cause du coût social) et les coûts d'abattement (les dépenses liées à la suppression ou l'atténuation des causes d'un phénomène de coût social). L'évaluation monétaire ne prend donc pas en compte les externalités intangibles liées aux dommages irréversibles ou pertes définitives. Ces dommages et pertes irréversibles seront pris en compte à travers une analyse quantitative ou qualitative, mais pas à travers une démarche de monétarisation. Si dans l'approche des externalités il est considéré qu'une approche basée sur les coûts ne peut pas permettre d'atteindre un « optimum social », car elle n'est pas basée sur le consentement à payer des individus, dans une évaluation des coûts sociaux au sens de Kapp, l'optimum social n'est pas défini par le système de prix, mais à travers la mise en place de minima sociaux et environnementaux qui fixent des objectifs pour la réduction des coûts sociaux.

Enfin, des pistes ont été développées pour l'analyse des causes systémiques liés à ces coûts sociaux. Cette analyse passe par la mise en lien de l'évaluation des coûts sociaux et environnementaux avec l'organisation de la chaîne globale de valeur afin de mettre en évidence les interactions entre différents niveaux d'analyse et d'identifier d'éventuelles chaînes de causalité circulaire cumulative. Pour cela les différentes étapes proposées sont :

1. Déterminer un point d'entrée pour l'analyse de la CGV étudiée en fonction de la question de recherche, ici la contribution de l'organisation de la chaîne aux dynamiques d'épuisement ;
2. Cartographier les acteurs de la chaîne et choisir les entretiens à mener ;
3. Identifier les points clefs de l'organisation en lien avec la question de recherche ;
4. Evaluer les coûts sociaux en lien avec l'épuisement (dépenses publiques, déséconomies, augmentation des autres coûts sociaux) ;
5. Cartographier les interactions entre CGV et coûts sociaux, en identifiant les points clefs de l'organisation de la CGV qui viendraient renforcer ou prévenir les coûts sociaux de l'épuisement.

L’approche des coûts sociaux de l’épuisement des ressources métalliques ainsi définie constitue donc une approche intégrée qui permet de penser à l’échelle d’une chaîne globale de valeur, les interactions entre les sphères économiques, biophysique et sociale, dans l’objectif de permettre la formulation d’une politique de prévention minimisant ou supprimant les coûts sociaux.

PARTIE 2 : CAS D'ÉTUDE, APPLICATION DE L'APPROCHE D'ÉVALUATION DES COUTS SOCIAUX DE L'ÉPUISEMENT

CHAPITRE 3 : CARACTÉRISATION DES COUTS SOCIAUX LIÉS À L'ÉPUISEMENT DANS LA CHAINE DE VALEUR DU NÉODYME UTILISÉ DANS LES AIMANTS ND-FE-B

Introduction du chapitre 3

Le chapitre 3 vise à appliquer la méthodologie d'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement qui a été proposée au chapitre 2 au cas d'étude du néodyme. Il s'agit de démontrer la faisabilité de l'application d'une telle méthodologie, de montrer son intérêt et d'en souligner les limites.

Il a été choisi de s'intéresser à l'étude des coûts sociaux et environnementaux liés à l'épuisement en centrant l'analyse sur la chaîne de valeur d'un métal. D'une part, l'étude d'un métal au sein d'une chaîne de valeur permet, en ce qui concerne la question de l'épuisement, de s'intéresser à la fois aux effets de la complexification des ressources secondaires, et à la baisse des teneurs des gisements. D'autre part, l'intérêt d'une approche par substance est qu'elle permet de mettre en lumière les coûts sociaux spécifiques à l'amont de la chaîne (c'est à dire au secteur minier et métallurgique) tout en faisant le lien avec ses déterminants dans l'organisation de la chaîne de valeur en aval. Cela permet d'identifier les transferts d'épuisement de ressources et de coûts sociaux et environnementaux de l'aval vers l'amont de la chaîne, venant ainsi questionner la notion de dématérialisation.

Il est proposé d'étudier les coûts sociaux reliés à l'épuisement pour le néodyme dans la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B. Le néodyme est un métal appartenant aux terres rares, une famille de 17 éléments, dont les propriétés physiques et chimiques particulières les rendent indispensables dans de nombreuses applications technologiques. Ils sont très fortement paramagnétiques, ce qui a permis de les utiliser dans une nouvelle génération d'aimants : les aimants permanents. L'intérêt de ces aimants permanents est que le volume et la masse de matériaux nécessaires pour une performance magnétique équivalente sont bien inférieurs à ceux des aimants des technologies précédentes. Ils permettent ainsi des gains de masse ou une miniaturisation significative des produits finis (génératrices d'éoliennes, micromoteurs électriques dans l'automobile, défense, microordinateurs, etc.) (BRGM, 2015). Le néodyme, utilisé dans les aimants permanents à base d'alliages néodyme-fer-bore (Nd-Fe-B), est souvent cité comme une ressource nécessaire à la transition énergétique (Alonso et al., 2012; Banque mondiale, 2017; de Koning et al., 2018), notamment pour la fabrication de génératrices d'éoliennes et de moteurs de véhicules tout électriques et hybrides. Ce cas d'étude sur les coûts sociaux liés à l'épuisement du néodyme apparaît comme particulièrement intéressant, puisque ce sont les impacts globaux provoqués par l'exploitation des ressources non-renouvelables qui ont conduit au développement de technologies de production énergétiques basées sur l'utilisation des sources énergétiques renouvelables. L'étude permettra donc de pointer le paradoxe entre une utilisation du néodyme pour lutter contre l'épuisement des ressources fossiles et le changement climatique, et les nouveaux impacts et phénomènes d'épuisement induits par l'exploitation de cette ressource. Cependant, aucune comparaison ne sera faite avec la production des énergies fossiles puisque l'objectif de la présente étude n'est pas de remettre en question la pertinence de la transition énergétique, mais bien de documenter les effets de l'épuisement afin de se prémunir des coûts sociaux qu'ils peuvent engendrer. De plus, étudier le néodyme permet de montrer en quoi la définition de l'épuisement proposée au chapitre 1 met en lumière cette problématique différemment du concept économique de réserve[69]. En effet, l'épuisement des réserves de terres rares n'est pas perçu comme un danger

[69] C'est-à-dire la part des ressources connues et considérées comme économiquement exploitables à ce jour (voir chapitre 2 pour plus de précision sur cette définition). Ce terme est utilisé habituellement en Europe et aux Etats-Unis par les organisations en charge de définir les politiques publiques en termes de ressources

imminent avec une production mondiale annuelle en 2016 qui était estimée à 129 000 tonnes d'oxydes de terres rares et des réserves estimées à 120 millions de tonnes (Ober, 2018). Bien que ce ratio se réduise si les réserves du néodyme seul sont considérées, les terres rares ne font pas partie des ressources qui ont les plus petites réserves, comparées à des métaux tels que l'antimoine (ratio de 10 entre les réserves estimées et la production annuelle), le cuivre (ratio de 40 entre les réserves estimées et la production annuelle), l'argent (ratio de 20 entre les réserves estimées et la production annuelle) (Ober, 2018). Cependant, la perte de la ressource liée à la quasi absence de recyclage dans les produits en fin de vie (Guyonnet et al., 2015; Planchon et al., 2015), et les pertes liées au processus de production (Eriksson & Olsson, 2011) sont nombreuses. Ces pertes illustrent parfaitement les difficultés liées à la production de masse à bas coût de matières premières, et celles qui sont liées à la complexification des ressources secondaires, augmentant la pression sur la production primaire et ses impacts.

Ce chapitre 3 présente dans un premier temps les différents enjeux organisationnels de la chaîne de valeur du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B liés à l'épuisement. Cela permet de préciser le périmètre de la recherche, ainsi que de traduire la question de recherche en formulant les points d'intérêt investigués dans la filière. Dans un deuxième temps, une estimation à minima des coûts sociaux de l'épuisement est réalisée. Pour mettre en lien la question des coûts sociaux et de l'épuisement, une analyse générale des enjeux sociaux et environnementaux de la chaîne est proposée, et leurs liens avec les problématiques d'épuisement sont discutés. Après cette analyse qualitative, au vu de l'influence plus ou moins directe de l'épuisement sur les différents enjeux et des données disponibles, il est proposé de se concentrer sur la quantification des coûts sociaux associés aux déchets miniers. Pour cela, il est nécessaire d'évaluer l'ampleur des phénomènes d'épuisement physique, et la thèse propose donc un modèle de diminution de la teneur de la mine de Baiyun Ebo et de son influence sur l'augmentation des déchets. L'étude montrera l'importance des coûts sociaux liés à l'épuisement du néodyme et proposera différents scénarii de gestion de ces coûts. Une comparaison sera faite avec le néodyme recyclé dans la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B, afin d'étudier le recyclage comme levier possible de réduction des coûts sociaux de l'épuisement du néodyme.

Dans un troisième temps, l'identification de mécanismes générateurs passe par l'analyse du lien entre les caractéristiques de la chaîne globale de valeur et de l'émergence des coûts sociaux étudiés, et l'identification de phénomènes d'épuisement au sein de la chaîne. Enfin, les résultats sont discutés par rapport à la question de la réduction et de la possible prise en charge de ces coûts sociaux. En effet, comme vu précédemment, toute évaluation de coûts sociaux (*sensu* Kapp) nécessite une discussion sur la prise en charge de ces coûts qui peut être réglementaire, normative, portant sur l'organisation de l'entreprise et de la chaîne de valeur, et ne se concentrant pas sur la question de l'incorporation du coût dans le prix du marché.

Pour ce faire, l'étude s'appuie à la fois sur des sources issues de la littérature scientifique et sur une série de 27 entretiens menés au cours de l'année 2016 avec des acteurs de la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B. Ces entretiens font l'objet d'une synthèse anonymisée présentée en Annexe. Les entretiens ont été menés principalement sur l'amont de la chaîne de valeur, pour laquelle les informations sont le moins disponibles, auprès des acteurs (pouvoirs publics, industriels) et parties prenantes externes (ONG, académiques) de la chaîne du néodyme, depuis les mines de terres rares chinoises jusqu'au fabricants d'aimants Nd-Fe-B chinois et japonais. Les entretiens ont été menés en Chine et au Japon de juin à août 2016.

(comme vu au chapitre 2)

1. La chaîne de valeur du néodyme utilisé dans les aimants Nd-Fe-B

Cette première partie a pour objectif de présenter une analyse des caractéristiques clefs de la chaîne globale de valeur du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B, qui sont susceptibles d'influencer les dynamiques d'épuisement et de création de coûts sociaux au sein de la chaîne.

Les éléments utilisés du cadre d'analyse CGV sont tout d'abord rappelés. L'analyse s'attache ensuite à synthétiser le contexte historique et économique général dans lequel s'insère la chaîne de valeur du néodyme, soit la mise en place d'une production de masse à bas coûts de terres rares en Chine à partir des années 1980. Enfin, la structure intrants-produits de la chaîne de valeur (les principales étapes du procédé de fabrication des aimants) et les principaux acteurs de la chaîne sont présentés, ainsi que leur ancrage géographique. Cette présentation permet de définir le périmètre de la chaîne couvert par les entretiens réalisés par l'autrice. Enfin, des éclairages sur la gouvernance de la chaîne sont apportés sur la base des entretiens.

1.1. Cadre de l'analyse, les chaînes globales de valeurs

Le chapitre 2 a présenté les différents cadres d'analyse des chaînes globales de valeurs (CGV) et la pertinence de l'utilisation de ce type d'analyse dans l'objectif d'étudier les coûts sociaux liés à l'extraction des ressources. Cette première partie a pour objectif de présenter une analyse des caractéristiques clefs de la chaîne globale de valeur du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B susceptibles d'influencer les dynamiques d'épuisement et de création de coûts sociaux au sein de la chaîne. L'objectif n'est donc pas de réaliser une analyse CGV exhaustive du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B, mais de dégager les aspects clefs permettant de comprendre la dynamique d'épuisement au sein de la CGV. Pour rappel, en 2005, Gereffi, Humphrey et Sturgeon ont consolidé l'approche des « filières globales » en développant le concept de CGV (Gereffi et al., 2005).

Pour rappel, l'analyse CGV telle que définie par Gereffi (Gereffi et al., 2001) repose sur l'étude de quatre aspects principaux : l'ancrage géographique des différents maillons de la chaîne, l'étude de la structure intrants-produits (ou *input-output*), le cadre institutionnel ou la dimension socio-institutionnelle (Vercher-Chaptal & Palpacuer, 2013), et le mode de gouvernance. Il est précisé ici quels sont les différents aspects abordés dans l'étude de cas et quels aspects sont mis de côté.

L'étude de la structure input-output comprend généralement : la description de la chaîne comme « l'ensemble du processus d'entrée-sortie depuis la conception jusqu'à la consommation permettant de mettre un produit ou un service de la conception initiale entre les mains du consommateur » (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016). Parmi ces étapes sont souvent pris en compte : la recherche et la conception, les intrants, la production, la distribution et le marketing, les ventes et, dans certains cas, le recyclage des produits après utilisation (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016). Dans notre cas d'étude, seuls les intrants et la production (1.3), les ventes (1.2.1) d'aimants Nd-Fe-B seront décrits. Au paragraphe 1.4 est traitée la représentation des différents maillons de la chaîne, comme préconisé par (Gereffi & Fernandez-Stark, 2016) sous forme d'un ensemble de boîtes reliées par des flèches indiquant les flux de biens et services entre ces acteurs.

Deuxièmement, l'ancrage géographique qui explique comment l'industrie est dispersée à l'échelle mondiale, et dans quels pays sont menées les différentes activités liées à la structure input-output (Gereffi, 1995), est explicité tout au long de la description de la chaîne de valeur.

Troisièmement, la structure de gouvernance décrivant les relations de pouvoir et d'autorité entre les différents acteurs de la chaîne, et déterminant l'allocation des ressources et les flux dans la chaîne (Gereffi, 1995), est discutée dans le paragraphe 1.4.

Quatrièmement, le cadre institutionnel de la filière qui « identifie comment les politiques mises en place à l'échelle locale, nationale et internationale détermine le processus de mondialisation dans la chaîne » (Gereffi, 1995), est discuté sur la base de la bibliographie dans le paragraphe 1.2 et sur la base des entretiens dans le paragraphe 1.4.

Les différents aspects de la CGV du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B sont donc abordés de manière imbriquée.

1.2.Les évolutions organisationnelles historiques de la production des terres rares

Ce paragraphe présente le contexte dans lequel s'insère la chaîne de valeur du néodyme en réalisant une synthèse des principales caractéristiques influençant la production mondiale des terres rares. Tout d'abord, le métal (le néodyme) et le composant étudié (les aimants Nd-Fe-B) sont présentés, ainsi que leurs liens avec la production des terres rares et les principaux usages des aimants. Ensuite, il est montré à travers l'histoire de la mise en place de la délocalisation de l'industrie européenne et la mise en place de la stratégie industrielle chinoise, que la production des terres rares s'est caractérisée par la recherche d'une production de masse et de bas coûts. Enfin, l'étude de la « crise » des terres rares et des difficultés de l'industrie chinoise pour produire des aimants à haute valeur ajoutée souligne les facteurs qui ont tendance à verrouiller les caractéristiques de la chaîne.

1.2.1. La consommation d'aimants permanents

Les enjeux de la chaîne de valeur du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B sont liés aux enjeux de la production des terres rares. En effet, le néodyme est un métal appartenant aux terres rares, une famille de 17 éléments, dont les propriétés physiques et chimiques particulières les rendent indispensables dans de nombreuses applications technologiques. L'augmentation de la consommation des terres rares a connu une accélération à la fin des années 1990 comme le montre la Figure 26 (d'après Mancheri & Marukawa, 2016). Cette augmentation de la consommation est attribuable d'après le BRGM au « développement des aimants permanents Nd-Fe-B, [et] des ampoules fluo-compactes» (BRGM, 2015, p. 86).

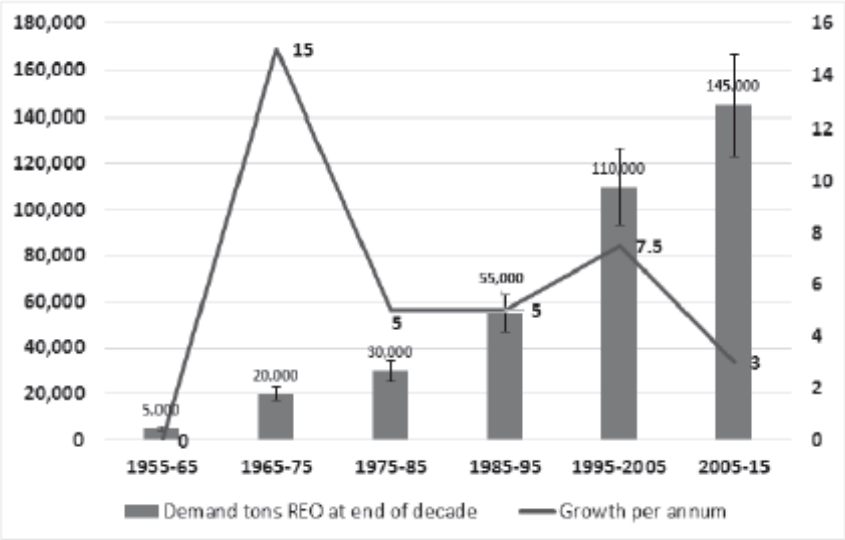


Figure 26 : La demande mondiale des terres rares sur les 5 dernières décennies. Source : Kingsnorth, 2015 in Mancheri & Marukawa, 2016

Les aimants permanents constituent une famille d'aimants dont le volume et la masse nécessaires pour une performance magnétique donnée sont bien inférieurs à celui des aimants de technologies plus anciennes. Ils permettent ainsi des gains de masse ou une miniaturisation significative (génératrices d'éoliennes, micromoteurs électriques dans l'automobile, défense, microordinateurs, etc.) (BRGM, 2015). Il est à noter que tous les aimants permanents ne contiennent pas de terres rares. En effet, même si en termes de valeur les aimants permanents à base de terres rares représentent les deux tiers du marché aujourd'hui, l'autre classe d'aimants permanents, appelés ferrites durs, représente encore la plus grande part en masse d'aimants produits chaque année (Kooroshy, Tiess,

Tukker, & Walton, 2015, p. 21-22). Deux types d'alliages impliquant des terres rares permettent de fabriquer des aimants permanents (Lucas, Lucas, Mercier, Rollat, & Davenport, 2014) : les alliages samarium-cobalt, le samarium faisant parti de la famille des terres rares ; et les alliages néodyme-fer-bore (Nd-Fe-B), le néodyme faisant parti de la famille des terres rares (voir Annexe 1 pour la liste des terres rares).

Les aimants permanents à base de terres rares constituent l'application la plus consommatrice de terres rares dans le monde, représentant environ 20% de la masse d'oxydes de terres rares utilisée parmi toutes les applications dans le monde, entre 2008 et 2012 (IMCOA et Roskill in BRGM, 2015; Su, 2009; Walters & Lusty, 2011). C'est également la première application en termes de valeur avec environ 38% des parts de marché des différentes applications de terres rares dans le monde en 2008 (Walters & Lusty, 2011). En Chine, en 2013, environ 41% des terres rares étaient consommées dans les aimants permanents, dont 98% de ces aimants étaient des aimants Nd-Fe-B (Wenjuan Chen et al., 2018). Suite à la montée des prix en 2010-2011, les industriels ont cherché à remplacer les aimants Nd-Fe-B dans certaines applications afin d'en réduire le coût et y sont parvenus dans certaines applications (BRGM, 2015, p. 92-93). Cependant, l'usage du néodyme, et en particulier dans les aimants (BRGM, 2015, p. 91), est toujours vu comme un poste dirigeant la croissance de la consommation des terres rares. Ainsi, d'ici 2020 l'utilisation du néodyme connaitrait une croissance 7% par an (Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014).

Les aimants néodyme-fer-bore (Nd-Fe-B) dominent le marché avec le prix le plus faible et des performances remarquables. Les aimants Nd-Fe-B contiennent en moyenne entre 20% (Guyonnet et al., 2015) et 30% en masse de néodyme (Lucas et al., 2014), 65 à 69% de fer, 1% de Bore (Prassas, 2018). Il est à noter que ces aimants néodyme-fer-bore contiennent d'autres terres rares telles que le praséodyme (7 à 8%), le dysprosium (environ 1%), le terbium, le gadolinium, mais aussi d'autres additifs comme le niobium ou l'aluminium (moins de 1% en moyenne) pour affiner leurs caractéristiques (Prassas, 2018). Le dysprosium est un additif important, car il améliore la résistance à la démagnétisation et par conséquent permet à l'aimant d'être utilisé à des températures plus élevées. La proportion habituelle de dysprosium se situe autour de 1% en masse, même si elle peut aller jusqu'à 11% pour les applications à haute température telles que des moteurs ou des turbines électriques (Kooroshy et al., 2015; Prassas, 2018). En raison du prix élevé du dysprosium, son ajout peut doubler le prix des aimants (Kooroshy et al., 2015).

1.2.2. Principaux usages des aimants Nd-Fe-B

Le rapport de l'Union européenne de 2014 estime ainsi la demande en oxyde de néodyme (Nd_2O_3) à 34 000 tonnes environ en 2020 (Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014). Une autre source (Pipame, 2013) envisageait une demande en oxyde de néodyme de 40 000 t (estimation basse) à 54 000 t (estimation haute) en 2020. Les écarts dans les prévisions de la consommation future du néodyme sont donc importants, et un regard sur les prévisions qui ont été réalisées dans le passé conseille la prudence dans l'utilisation de ces chiffres de consommation future. La croissance de la consommation serait tirée par le développement de l'éolien off-shore, mais aussi par la consommation d'appareils électriques et électroniques (BRGM, 2015, p. 91). Le rapport du BRGM sur les terres rares souligne ainsi qu'il est très probable que les véhicules électriques et hybrides se développent, mais qu'il est difficile de prévoir le rythme de ce développement ainsi que la part des technologies aux aimants Nd-Fe-B par rapport à des technologies concurrentes dans ce secteur. L'expansion du secteur des éoliennes offshore est encore plus difficile à prévoir, car elle dépend essentiellement de décisions politiques(BRGM, 2015, p. 92). Les principaux usages des terres rares sont exposés dans la Figure 27.

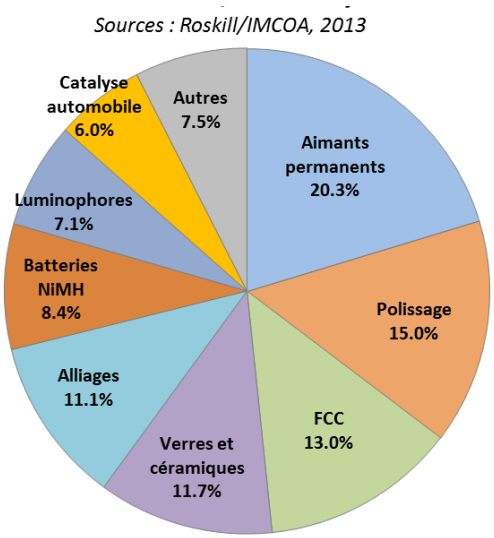


Figure 27 : Répartition des usages des terres rares en 2012 (t OTR). Source : BRGM, 2015, p. 51

Concernant le néodyme, la consommation mondiale est évaluée par Constantinides à 29 242 tonnes d'oxyde de néodyme (Nd_2O_3) dans les aimants en 2010 (Constantinides, 2012) et à 19 925 tonnes d'oxyde de néodyme pour toutes les applications en 2012 par le BRGM (BRGM, 2015, p. 75)[70]. Cette consommation mondiale correspond aux usages suivants (Figure 28) : 89% pour les aimants permanents Nd-Fe-B, 5% pour les céramiques (comme pigment violet et comme dopant dans la composition isolante de certains condensateurs), puis 2% pour les alliages métallurgiques (mischmétal par exemple) et 4% pour d'autres usages (dont poudres de polissage, luminophores, lasers, etc.).

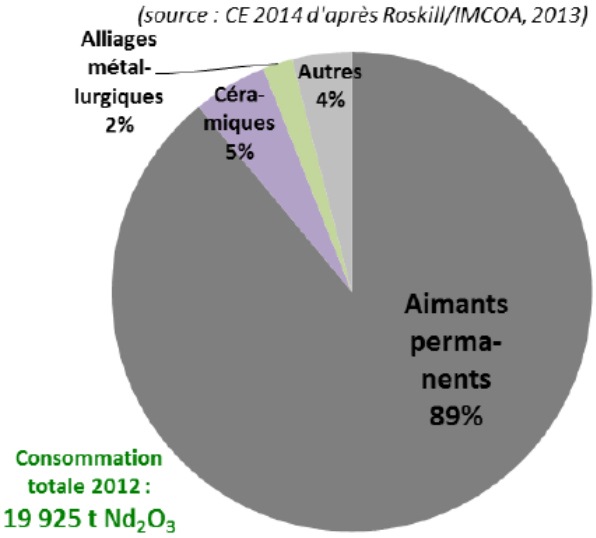


Figure 28 : Répartition des usages du néodyme en 2012 au niveau mondial. Source : BRGM, 2015

[70] Cet écart significatif pourrait être expliqué par plusieurs facteurs. Comme vu dans le paragraphe sur la crise des terres rares, la demande a diminué à la suite de l'augmentation des prix en 2010-2011. Ceci a conduit à des changements d'usage, mais également au report de la consommation des industriels en 2012 sur les stocks préventifs effectués pendant la hausse des prix. Cela traduit donc également la difficulté à estimer la consommation mondiale réelle.

La répartition des usages du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B selon les différentes applications ne fait l'objet que de peu d'études et les données sont soumises à de nombreuses incertitudes[71]. Celles présentées dans cette synthèse bibliographique devront faire l'objet d'une qualification en termes d'incertitudes. En effet, la plupart des données d'utilisation (en masse dans chaque secteur) de ces aimants ne sont pas publiques et doivent être reconstituées à partir de dires d'experts et parfois de rapports d'entreprise en fonction de la part de marché du produit, de la masse et de la composition de l'aimant. Or ces données sont difficiles à obtenir, souvent parcellaires et évoluent rapidement (BRGM, 2015; Guyonnet et al., 2015). De plus, les données d'import relatives au néodyme, sont estimées à partir des données du commerce mondial des produits de terres rares bruts rapportées à des importations individuelles de TR en désagrégeant les flux totaux d'OTR selon la méthodologie décrite par Goonan (Goonan, 2011 in Guyonnet et al., 2015).

Tableau 21 : La répartition massique du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B pour différentes applications dans le monde en 2010. Source : Constantinides, 2012

Total en tonnes de néodyme (converti à partir de l'oxyde de néodyme : 0,85 oxNd=Nd)	***24 856***
Pourcentage de l'application	
Moteurs industriels généraux	25,5%
Disques durs, CD, DVD	13,1%
Vélos électriques	9,1%
Transducteurs, haut-parleurs	8,5%
Divers: jauges, freins, relais et commutateurs, inspection de tuyaux, transport en lévitation, reprographie, réfrigération, etc.	8%
Non-identifiés	6,5%
Séparation magnétique	5%
IRM	4%
Entraînement/couplage magnétique (pompes, mélangeurs, etc.)	4%
Capteurs (vitesse roue pour freinage ABS, etc.)	3%
Embrayages à hystérésis	3%
Générateurs	3%
Systèmes de stockage d'énergie	2%
Générateurs d'éolienne	2%
Ventilateurs et compresseurs de climatiseurs	2%
Moteur de véhicules hybrides et électriques	1%

D'après une étude de marché réalisée par Constantinides pour Arnold Magnetic Technologies (Constantinides, 2012), l'utilisation principale au niveau mondial des aimants Nd-Fe-B en 2010 serait

[71] Il n'existe pas de données précises sur la consommation française de terres rares et encore moins du néodyme utilisé dans les aimants néodyme-fer-bore. Le rapport du BRGM de 2015 résumait ainsi la situation : « On constate que les échanges extérieurs de la France [en terres rares] sont systématiquement déficitaires tant en masse qu'en valeur […Concernant] les aimants permanents métalliques [le déficit était de] 40,2 M€ […] en 2014 » (BRGM, 2015, p. 187). « Pour estimer la consommation française apparente de terres rares, il conviendrait, en sus des données d'import-export, de connaitre les données de production (production de l'usine Solvay/Rhodia de La Rochelle, en particulier), non publiées, mais aussi sa consommation : l'usine importe des composés non-séparés et en ressort des composés davantage séparés et transformés. » (BRGM, 2015, p. 189).

les moteurs industriels pour plus d'un quart des usages (Tableau 21), puis dans les disques durs et têtes de lecture des lecteurs CD et DVD avec 13% des usages. La mobilité « verte » atteindrait 10% des usages dont 9 % pour les vélos électriques et seulement 1% pour les voitures électriques et hybrides. Il faut cependant souligner qu'en 2010 le marché des véhicules électriques était à peine naissant. En Europe, les ventes de véhicules électriques représentaient à peine quelques centaines de véhicules en 2010, passées à plus de 90 000 véhicules en 2014 (Tietge, Mock, Lutsey, & Campestrini, 2016). Pour les énergies vertes, les éoliennes ne représentaient en 2010 que 2% des usages des aimants Nd-Fe-B.

Une étude utilisant la méthode « *Material Flow Accounting* » pour les aimants Nd-Fe-B permet de préciser leurs usages au niveau européen (Guyonnet et al., 2015). La « *Material Flow Accounting* » (MFA) est une méthode clef développée pour comptabiliser et analyser des flux de matières à l'échelle d'une filière, et permettre la quantification de l'utilisation des ressources naturelles par les sociétés (M. Fischer-Kowalski et al., 2011). Cette méthode a permis d'estimer comment se répartissait le néodyme entrant dans différents secteurs européens en 2010. Les principales applications du néodyme prises en compte dans le cadre de cet article (Guyonnet et al., 2015) sont illustrées dans le Tableau 22. Il est à noter que des secteurs d'utilisation qui apparaissent comme importants dans l'étude de Constantinides ne sont pas pris en compte dans l'étude. Notamment les applications industrielles telles que les moteurs industriels généraux (25,5%) et la séparation magnétique (5%).

Tableau 22 : Principales applications utilisant des aimants Nd-Fe-B, en gras les applications principales en Europe. Source : Guyonnet et al., 2015

Applications utilisant des aimants permanents Nd-Fe-B
Véhicules électriques et non électriques
Disques durs
Téléphones portables
Ordinateurs portables et ordinateurs de bureau
Éoliennes
Machines IRM
Réfrigérateurs
Machines à laver
Climatiseurs
Appareils photo
Casques et écouteurs
Lecteur CD
Fax, imprimantes, scanner
Rasoirs et épilateurs électriques

Cela permet de souligner que l'utilisation des aimants Nd-Fe-B en Europe (Tableau 23) dans le secteur automobile non électrique dominait largement avec 60% des usages en masse (Tableau 23), suivi du secteur électronique avec 22% (ordinateurs, imprimantes et scanners, disques durs et appareils photo), et du secteur éolien avec 12% des usages en masse. L'utilisation dans les véhicules électriques est faible, représentant seulement 2% des usages. Si l'utilisation du néodyme dans les secteurs dits « verts » (14% pour éoliennes et voitures électriques) ne semble pas négligeable, il convient de noter que l'utilisation prédominante des aimants Nd-Fe-B restait en 2010 très majoritairement les véhicules conventionnels, soit un secteur polluant.

Plusieurs facteurs permettent d'expliquer les divergences de statistiques concernant la part du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B utilisée dans les éoliennes en Europe et dans le monde. Tout d'abord, le Tableau 22 montre que les moteurs industriels généraux considérés comme l'application la plus consommatrice au niveau mondial en 2010 par Constantinides ne sont pas pris en compte dans l'étude européenne. Ensuite, l'utilisation d'éoliennes contenant des aimants Nd-Fe-B semble se faire principalement en Europe (offshore) et en Chine (privilégiant cette technologie). De plus, l'année 2010 est une année exceptionnelle pour l'éolien, étant « une année record pour le marché européen de l'énergie éolienne offshore » (Kaldellis & Kapsali, 2013). Enfin, l'utilisation dans les transports électriques témoignait d'une utilisation très forte dans les vélos électriques au niveau mondial (9%), non visible dans les pays européens. Or, si cette consommation a progressé partout dans le monde depuis 2010, le premier pays consommateur de vélos électriques reste de très loin la Chine avec un pourcentage des ventes mondiales de vélos électriques de 95% en 2011 passé à 92% en 2015 (Fishman & Cherry, 2016).

Enfin, un secteur d'utilisation important des aimants Nd-Fe-B sur lequel il n'y a pas de données de consommation est le secteur militaire. En effet, la plupart des industries françaises des secteurs de l'aéronautique, du spatial et de la défense utilise des aimants permanents de hautes performances (BRGM, 2015, p. 176-177).

Tableau 23 : La répartition du néodyme entrant dans les différents secteurs européens en 2010. Source : Planchon et al., 2015

La répartition du néodyme est donnée pour les aimants incorporés dans les applications en Europe (deuxième colonne) et pour les aimants importés déjà incorporés dans des produits (troisième colonne), et le total des aimants européens en utilisation (quatrième colonne)

	Aimants incorporés dans les applications en Europe	**Aimants importés dans des produits**	**Total des utilisations**
Total en tonnes de néodyme	***872***	***354***	***1226***
Pourcentage du secteur d'utilisation			
Véhicules non électriques	80%	12%	60%
Eoliennes	13%	8%	12%
Ordinateurs portables		24%	7%
Ordinateurs de bureau	5%	5%	5%
Imprimantes et scanners		16%	5%
Autres	2%	7%	3%
Disques durs		10%	3%
Véhicules électriques		8%	2%
Appareils photos		6%	2%
Réfrigérateurs		4%	1%

L'utilisation des aimants Nd-Fe-B dans les véhicules électriques et dans les éoliennes est détaillée ci-après. La présentation de l'utilisation dans le secteur automobile est faite également pour les véhicules non-électriques afin d'analyser les imbrications de ces deux secteurs.

i. Utilisation des aimants Nd-Fe-B dans les éoliennes

Concernant les éoliennes, 9% de la puissance nouvellement installée (37 642 MW) dans le monde utilisait des aimants Nd-Fe-B en 2010 (Buchert, 2011). Ainsi, la part de marché des éoliennes utilisant des aimants Nd-Fe-B reste minoritaire aujourd'hui. Les éoliennes utilisant des aimants permanents Nd-Fe-B correspondent principalement à la part de marché des éoliennes sans multiplicateur à générateurs synchrones avec aimant permanent (DD PMSG). Or, au niveau mondial, les éoliennes DD qui utilisent des générateurs synchrones à excitation électrique et non des aimants permanents restent majoritaires, comme c'est le cas des éoliennes Enercon, et des éoliennes à engrenages avec générateurs à induction à double alimentation (Dodd, 2018). De même en Europe, d'après le *Joint Research Centre* (JRC) de l'UE, 23% des éoliennes utilisaient des PMSG en 2015 (Dodd, 2018). La masse d'aimants utilisée par MW installé pour les éoliennes utilisant des aimants Nd-Fe-B varie entre 0,23 t/MW (Bo-Ping, 2016), 0,4 t /MW (Oakdene Hollins, 2010) , 0,5t/MW (Entretien 16, 2016) et 0,6 t/MW (Oakdene Hollins, 2010) pour les estimations les plus larges. En retenant un chiffre de 0,4t/MW ces installations représentaient 1355 tonnes d'aimants Nd-Fe-B en 2010 (calculs de l'autrice). Cette quantité correspond à peu près à la même estimation que celle avancée par Constantinides avec 1500 tonnes d'aimants Nd-Fe-B utilisées dans le secteur des éoliennes au niveau mondial pour 2010 (calculs de l'autrice d'après Constantinides, 2012). Soit 2% des usages des aimants Nd-Fe-B en 2010 (Tableau 21). Cependant, plusieurs auteurs estiment que la puissance nouvellement installée d'éoliennes va augmenter ainsi que la part des éoliennes utilisant des aimants Nd-Fe-B (Bo-Ping, 2016; Buchert, 2011; Oakdene Hollins, 2010). Cela tient principalement aux politiques chinoises et européennes. Pour l'Europe, les avantages techniques, notamment en offshore, sont mis en avant pour justifier cette croissance : l'intérêt d'utiliser des DD PMSG serait une conception d'éoliennes plus légères et plus compactes, ce qui est un avantage dans des sites de vents faibles et sur les sites offshore où la taille est un facteur clé (Dodd, 2018). L'UE prévoit que le marché évoluera vers une intensification du déploiement en mer et sur des sites onshore où la vitesse du vent est faible, et estime que la part de marché des éoliennes utilisant des générateurs PMSG pourrait atteindre 41% en 2020 et 72% en 2030 (Dodd, 2018). En effet, il faut noter que les déploiements d'éoliennes offshore se faisaient principalement dans le nord de l'Europe, avec 90% des parcs éoliens offshore mondiaux dans les eaux européennes en 2012 (Kaldellis & Kapsali, 2013). Pour la Chine, il s'agit de développer son secteur éolien et pour cela il est stratégique d'utiliser leurs ressources propres en terres rares. La Chine utilise donc une part beaucoup plus élevée de technologies utilisant des terres rares que le reste du Monde. Ainsi en 2015, la puissance nouvellement installée dans le secteur éolien en Chine représentait 48,4% de la puissance mondiale. De plus, 45% de ces nouvelles installations en Chine (Constantinides, 2012) utilisent des aimants Nd-Fe-B. Finalement, l'utilisation des aimants Nd-Fe-B dans l'éolien en 2015 en Chine représentait environ 3 160 tonnes d'aimants frittés Nd-Fe-B (Bo-Ping, 2016) soit plus de 2 fois la demande mondiale pour 2010.

Les acteurs principaux parmi les fabricants d'éoliennes utilisant des aimants Nd-Fe-B en Europe sont les entreprises européennes Siemens (entreprise dominant le marché de l'éolien offshore) et Vestas, ainsi que l'entreprise américaine General Electric, avec sa filiale française Alstom (Dodd, 2018). En 2015, Alstom débutait la production d'éoliennes offshore utilisant des aimants Nd-Fe-B pour l'installation de 240 éoliennes dans 3 parcs offshore en France (BRGM, 2015, p. 176). Cependant, après le pic de prix de 2011, la plupart des entreprises a eu tendance à ne plus concevoir des modèles DD PMSG pour les éoliennes terrestres (Dodd, 2018), et à produire des modèles utilisant moins de terres rares lourdes (les plus coûteuses). Ainsi, Siemens déposait un brevet en 2014 pour la production d'aimants avec seulement 1% de dysprosium. L'entreprise allemande Enercon a été la première à concevoir des technologies n'utilisant pas d'aimants Nd-Fe-B, mais une technologie de générateur synchrone à excitation électrique, à base d'électroaimants et un bobinage en cuivre (BRGM, 2015, p. 176). Ce n'est pas le cas des entreprises chinoises, qui continuent à proposer des technologies utilisant des aimants Nd-Fe-B pour les éoliennes terrestres, comme Goldwin (Dodd, 2018).

ii. Utilisation des aimants Nd-Fe-B dans l'automobile conventionelle et électrique

Dans les véhicules électriques ou hybrides, le générateur peut contenir des aimants Nd-Fe-B, et la masse de ces aimants varie selon les modèles. Pour exemple, la BMW i3 utilise 1kg d' aimants dans le générateur, et la Nissan Leaf utiliserait 2kg d'aimants (Widmer, Martin, & Kimiabeigi, 2015). Comme tous les véhicules, les véhicules électriques contiennent de nombreux autres aimants (pour les moteurs électriques miniaturisés, les capteurs etc.), dont la masse vient s'ajouter à celle du moteur. Cette masse supplémentaire d'aimants Nd-Fe-B peut être estimée à environ 250 grammes, comme dans un véhicule non électrique (Roskill 2011 in Guyonnet et al., 2015). En nombre de voitures électriques à batterie[72] (en anglais *Battery Electric Vehicles*, BEV) vendues, la France constitue le plus grand marché en 2013 avec 22,8% des achats de voitures électriques de l'Europe, suivie de la Norvège (hors UE) avec 20,5%, et de l'Allemagne avec 16,7%, puis les Pays-Bas et le Royaume-Uni (Y. Zhou et al., 2015). En revanche, pour la part de véhicules BEV vendue sur l'ensemble des voitures particulières, la Norvège dépasse de loin les résultats de l'Union Européenne avec plus de 5% des ventes de voitures particulières en 2013 (Y. Zhou et al., 2015) et 1,9% de la flotte totale en électrique (Tietge et al., 2016), suivie des Pays-Bas avec un peu plus d'1%. Entre 1% et 0,34% (moyenne européenne) pour la part de BEV sur l'ensemble des voitures particulières, on trouve par ordre décroissant : la Suède, la France, la Suisse (hors UE). Les ventes de véhicules hybrides[73] sont devenues courantes avec le lancement de la Toyota Prius en 1997 (Widmer et al., 2015), ce qui a rendu commun l'usage d'aimants avec des terres rares, notamment des aimants Nd-Fe-B dans les moteurs d'automobiles à traction (Widmer et al., 2015). Dans l'UE, les véhicules électriques hybrides[74], à l'exception des *Plug-in Hybrid Electric* Vehicles (PHEV), représentaient 1,4% de toutes les ventes de voitures neuves en 2014, 3,7% aux Pays-Bas et 2,3% en France où la vente de ces véhicules est plus élevée que dans le reste de l'UE (Mock, 2015)

Le secteur automobile non-électrique reste en Europe l'industrie la plus consommatrice d'aimants Nd-Fe-B comme vu dans le 1.2.1. Et cette tendance tend à se renforcer puisque l'industrie automobile présente une dépendance croissante à l'électronique pour les fonctions du véhicule (Machacek & Fold, 2018). Selon (Dicken, 2011 in Machacek & Fold, 2018), l'électronique représentait en 2011 plus de 30% de la valeur d'un véhicule. L'électronique est utilisée notamment pour les systèmes de commandes gérant l'injection de carburant et le freinage, mais aussi pour d'autres fonctions telles que la climatisation. A ce jour, les aimants Nd-Fe-B offrent les meilleures performances pour ces systèmes de contrôle (Machacek & Fold, 2018).

Pour la vente de véhicules classiques, c'est-à-dire non électriques, les consommateurs européens achètent très majoritairement des modèles européens, ce qui est moins le cas pour les voitures électriques. Ainsi, en 2015, les trois acteurs majeurs de ce secteur en Europe, soit les constructeurs automobiles avec la plus grande part des ventes de voitures en Europe étaient : l'allemand Volkswagen avec 27% des ventes, puis le français PSA (Peugeot Société Anonyme) avec 14% des ventes, suivi de près par le constructeur français Renault (11%) (Konrad & Stagl, 2018). Ensuite, le groupe américain Ford (10%) se positionnait en 4ème position avec ses sites de production en Europe (à Cologne en Allemagne) (Konrad & Stagl, 2018). Comme le montre le Tableau 23, une part

[72] Les véhicules BEV, parfois appelés véhicules 100% électriques, sont des véhicules électriques dont la source d'énergie est constituée uniquement de batteries et dont le dispositif de propulsion est constitué uniquement d'un moteur électrique (Chau & Li, 2013).

[73] Les véhicules hybrides regroupent l'ensemble des véhicules dont la source d'énergie est à la fois une batterie et du carburant liquide et dont les dispositifs de propulsion sont à la fois un moteur et un moteur électrique (Chau & Li, 2013). Cela rassemble deux types de véhicules. Les *hybrid-electric vehicle* (HEV) où une petite batterie est placée à bord et se recharge lorsque le véhicule freine pour réutilisation le moteur électrique. Et les *Plug-in Hybrid Electric* Vehicles (PHEV) qui ont une batterie plus grande. Le véhicule doit être chargé pour pouvoir fonctionner sans essence. Lorsque la batterie est épuisée, le véhicule fonctionne comme le HEV, stockant l'énergie de freinage dans la batterie et assistant le moteur à essence.

[74] Les PHEV sont dotées des deux moteurs (un électrique et un moteur classique) et d'une batterie rechargeable par enfichage. Les autres voitures hybrides se rechargent pendant le trajet.

importante des aimants Nd-Fe-B utilisés dans les véhicules européens sont intégrés dans les produits sur le sol européen.

Les acteurs principaux des marchés hybrides et électriques en Europe ne sont pas des constructeurs européens, mais certaines étapes de la production peuvent se situer en Europe. Ainsi, les usines en France de constructeurs automobiles de marques étrangères, comme Toyota et Mitsubishi, ainsi que leurs équipementiers et sous-traitants, participent à l'importation des aimants permanents pour des véhicules (BRGM, 2015, p. 176-177).

L'acteur majoritaire en Europe dans le marché des voitures hybrides est Toyota. Toyota domine largement le marché avec 60% des nouvelles voitures hybrides vendues en Europe en 2014 et 50% en 2009. Ce qui constitue déjà une diversification par rapport à 2001 où Toyota faisait 95% des ventes (Mock, 2015). En 2014, les PHEV nouvellement mises sur le marché dans l'UE, et comptant pour plus de 3% des parts de marché, étaient selon Mock (Mock, 2015) : Toyota Auris HEV (29%), Toyota Yaris HEV (25%), Mitsubishi Outlander PHEV (9%), Toyota Prius et Prius Alpha existant en PHEV et HEV (6%), Lexus CT (5%), Lexus IS 300 (4%) et Peugeot 3008 HEV (3%). Le seul constructeur européen ayant au moins 3% des ventes en 2014 était donc Peugeot. Tous ces modèles sont dotés d'aimants Nd-Fe-B pour le fonctionnement du moteur électrique.

Pour les voitures électriques BEV, l'acteur principal sur le marché européen est l'alliance Renault-Nissan. Les trois modèles les plus vendus en Europe (UE-28 et l'Islande, la Norvège et la Suisse) de 2013 à 2017 sont la Nissan Leaf, Renault ZOE[75] (la plus vendue en Allemagne et en France), Tesla Model S[76] (Tsakalidis & Thiel, 2018). Sur ces trois modèles, le seul utilisant des aimants Nd-Fe-B pour le moteur est la Nissan Leaf (Widmer et al., 2015). C'est donc Nissan l'acteur le plus important en Europe en termes de consommation d'aimants Nd-Fe-B dans les BEV. Les 6 modèles électriques les plus vendus en Europe en 2013 utilisent des aimants Nd-Fe-B (voir Tableau 24). Il est cependant à noter que si Nissan semble incontestablement l'acteur majeur de la commercialisation des voitures électriques utilisant des moteurs à aimants Nd-Fe-B en Europe, les acteurs se plaçant de la 4ème à la 10ème place ont beaucoup varié entre 2010 et 2017 (Tsakalidis & Thiel, 2018).

[75] La Renault ZOE, la Renault Fluence et les Kangoo électriques, c'est-à-dire les voitures électriques du constructeur Renault, utilisent un moteur à rotor bobiné sur le rotor, des enroulements en cuivre sont utilisés pour créer un champ magnétique. Ce moteur a été mis au point avec l'entreprise allemande Continental (Widmer, Martin, & Kimiabeigi, 2015).

[76] Tesla avait évité l'utilisation d'aimants permanents pour les moteurs des modèles S et X, optant pour un moteur à induction en cuivre ayant le désavantage d'être plus lourd. Mais, l'entreprise aurait apparement renoncé à cette particularité pour le modèle 3 qui sera doté d'aimants permanents.

Tableau 24 : Nombre de nouvelles voitures électriques (BEV) enregistrées en Europe (UE-28 et l'Islande, la Norvège et la Suisse) en 2013

	Modèle	***Aimants Nd-Fe-B***	***Source***	***Nombre de nouvelles voitures enregistrées en Europe***	***Source***
BEV	Nissan Leaf	Oui	(Widmer et al., 2015)	10 894	Tsakalidis & Thiel, 2018
	Renault ZOE	Non	(Widmer et al., 2015)	8 833	Tsakalidis & Thiel, 2018
	Tesla Model S	Non	(Widmer et al., 2015)	3 975	Tsakalidis & Thiel, 2018
	Smart Fortwo ED	Oui	(Itani, 2017)	3 351	Tsakalidis & Thiel, 2018
	BMW i3	Oui	(Widmer et al., 2015)	998	Tsakalidis & Thiel, 2018
	Volkswagen e-Up!	Oui		940	Tsakalidis & Thiel, 2018
	Mitsubishi i-MiEV	Oui	(Mitsubishi, 2011)	887	Tsakalidis & Thiel, 2018
	Citroën C-Zero	Oui	(Citroën, 2018),	825	Tsakalidis & Thiel, 2018
	Peugeot Ion	Oui	(Peugeot, 2018).	695	Tsakalidis & Thiel, 2018

La Chine a progressivement mis en place des restrictions à l'exportation pour l'industrie des terres rares afin d'encourager une production aval à forte valeur ajoutée en Chine. Cette descente de la chaîne de valeur vers l'aval s'est accélérée à partir des années 2000. Suivant cette logique, certains constructeurs automobiles actifs dans la production de véhicules électriques et hybrides ont installé des activités de R & D et la production de moteurs de traction de véhicules électriques en Chine depuis 2011 : Toyota, Nissan, Honda et GM (Constantinides, 2012). Cela confirme les informations données par le Tableau 23, à savoir que la totalité des aimants Nd-Fe-B utilisée pour les générateurs des véhicules électriques et hybrides est importée déjà incorporée dans les moteurs.

En termes de lien entre les acteurs, les constructeurs automobiles ne semblent pas traiter directement avec les fabricants d'aimants. Sauf exception, leurs fournisseurs de premier rang sont les équipementiers européens : Bosch, Valeo, Delphi, Continental (Machacek & Fold, 2018). La gouvernance des chaînes globales de valeur habituellement décrite comme hiérarchique dans le secteur automobile, peut être qualifiée de modulaire[77] pour ce qui est du lien entre les équipementiers et les fabricants d'aimants (Machacek & Fold, 2018). Cependant, cela dépend du type de produits : plus l'aimant est lié à une technologie importante, plus les équipementiers travaillent de manière resserrée avec les fabricants d'aimants. C'est par exemple le cas pour les aimants utilisés dans le système de contrôle pour l'injection de carburant, dans lequel la conception

[77] Dans l'analyse CGV, la gouvernance modulaire est définie par Gereffi comme étant "la capacité de codifier les spécifications de produits complexes". La gouvernance modulaire se caractérise par une relation distendue entre fournisseur et acheteur, une conception indépendante des produits et l'existence de normes techniques qui standardisent les spécifications relatives aux composants, aux produits et aux processus. Cette standardisation élimine par conséquent la nécessité pour l'acheteur de surveiller et de contrôler les processus de production (Gereffi et al., 2005).

des aimants joue un rôle crucial dans le système. Ce système est soumis à la réglementation en termes d'objectif d'émissions (Machacek & Fold, 2018)

Cette thèse se concentre sur l'utilisation du néodyme dans les aimants permanents Nd-Fe-B, principale utilisation des terres rares et utilisation très majoritaire du néodyme. Ces aimants ont pour usage majoritaire les moteurs industriels généraux, suivi du secteur automobile conventionnel et du secteur électronique. Ces aimants sont souvent identifiés comme une ressource nécessaire à la transition énergétique (Alonso et al., 2012; Banque mondiale, 2017; de Koning et al., 2018). Cependant, la part de ces aimants utilisée pour la fabrication de génératrices d'éoliennes et de moteurs de véhicules tout électriques et hybrides reste minoritaire, de l'ordre de 12 à 15%. Dans le secteur automobile, les aimants sont utilisés de manière bien plus importante pour les équipements électroniques. La part des aimants utilisée dans l'éolien et les transports électriques serait amenée à croître du fait du développement de l'éolien offshore en Europe, mais surtout du fait de la croissance déjà importante de ces aimants dans l'éolien et les vélos électriques en Chine. Dans un futur proche, le marché lié à la croissance verte constituerait donc une part non négligeable de la demande en aimants Nd-Fe-B. Que ce soit pour la production des terres rares où pour le développement de technologies « vertes » utilisant ces terres rares, la Chine joue donc un rôle clef. Si ces applications sont amenées à croître dans le but apparent de lutter contre l'épuisement des ressources fossiles, il est pertinent de s'intéresser aux nouveaux impacts et phénomènes d'épuisement induits par l'exploitation du néodyme pour la fabrication d'aimants Nd-F-B.

1.2.3. La délocalisation de l'industrie des terres rares européenne et des États-Unis : une délocalisation économique et environnementale

La découverte du néodyme a eu lieu en 1886[78] (Gupta & Krishnamurthy, 2005, p. 1-6). Elle a été réalisée par Carl Auer von Welsbach, un chimiste autrichien qui sépara le praséodyme du néodyme, jusque-là considérés comme un seul élément : le didymium[79]. Cette découverte fut confirmée par A. Bettendorf en 1890 (Gupta & Krishnamurthy, 2005, p. 1-6). Puis en 1927, le gisement de Baiyun Ebo, actuellement le gisement de terres rares le plus exploité au monde, fut découvert *dans la province chinoise de Mongolie intérieure* (J.-C. Victor, Bueb, & Fouesnant, 2015). En 1941, l'ensemble des éléments constituant les terres rares avait été découvert. Cependant, le procédé de séparation n'était pas assez efficient pour utiliser ces éléments à l'échelle industrielle.

[78] Certains auteurs datent cette découverte de 1885 (BRGM, 2015)

[79] Le didymium, du grec *didymos* signifiant jumeau, a été isolé par Mosander en 1842 qui l'a nommé ainsi car accompagnant le lanthane, et a été considéré comme un élément jusqu'en 1886, date de sa séparation en praséodyme (grec *prasios,* vert tendre, et *didymos,* jumeau) et néodyme (grec *neos,* nouveau, et *didymos,* jumeau)

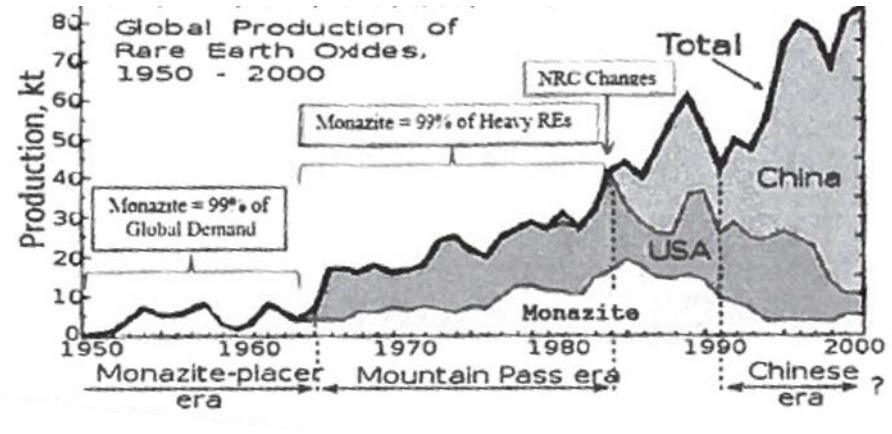


Figure 29 : Production mondiale d'oxydes de terres rares de 1950 à 2000. Source : Lima & Filho, 2015, p. 38

Jusqu'au milieu des années 1960, la production de terres rares se basait essentiellement sur l'exploitation minière du titane, du zircon, du minerai de fer ou des phosphates, le minerai phosphaté de terres rares de type monazite (Th-U-REE-P) étant un sous-produit de ces minerais (Lima & Filho, 2015, p. 38). Les usages des terres rares étaient encore très limités, correspondant principalement au ferrocérium des pierres à briquet (BRGM, 2015, p. 3). En France l'usine de La Rochelle, appartenant aujourd'hui à Solvay[80], produisait jusque dans les années 1960 ce ferrocerium pour les pierres à briquet. De même, le site de Serquigny en Basse-Normandie a produit des pierres à briquet à partir de monazite jusqu'en 1946, date à laquelle Pechiney devenu l'actionnaire majoritaire, a déplacé les activités de traitement de la monazite en Alsace sur le site de Thann. Les activités de production de la monazite à Thann se sont maintenues jusqu'en 1957-58 (ASN, 2009; Robin des Bois, 2005).

Des progrès énormes ont été réalisés dans les procédés d'obtention de terres rares métalliques et dans l'identification de nouvelles propriétés et applications commerciales (Gupta & Krishnamurthy, 2005, p. 1-6) dans les années 1960. Cela a permis d'établir que les terres rares avaient entre elles des caractéristiques chimiques très similaires, en particulier les lanthanides (éléments de numéro atomique 58 à 71) (Gupta & Krishnamurthy, 2005, p. 8), dont le néodyme fait partie (voir Annexe 1). Puis, à la fin des années 1960 furent créés les premiers aimants permanents à base de samarium (de la famille des terres rares) et de cobalt. Les aimants permanents sont des aimants composés de « matériaux magnétiques « durs », c'est-à-dire de matériaux qui, une fois aimantés, conservent à la température d'utilisation leur aimantation » (Breton, Lechevallier, Tenaud, & Morel, 2009). Leurs applications seront présentées au paragraphe 1.2.1.

En 1965 (voir Figure 29) commença l'exploitation minière ayant pour cible les terres rares avec la mine de Moutain Pass aux États-Unis. Les États-Unis restèrent le premier pays producteur jusqu'au milieu des années 1990 (Gardner, 2012; Lima & Filho, 2015, p. 38; Molycorp, 2011). En France, sur le site d'Aubervilliers de 1954 à 1964, Pechiney met au point dans ses laboratoires pilotes la technique de séparation des terres rares par les résines échangeuses d'ions et par l'extraction liquide-liquide. Entre 1965 et 1970, l'usine de La Rochelle diversifie ses activités de séparation des terres rares en produisant de l'europium et l'yttrium (Robin des Bois, 2005). Elle fut l'une des plus importantes usines de séparation des terres rares au monde dans les années 1970[81] et pouvait traiter jusqu'à 15

[80] Le site sera repris en 1962 par Péchiney, puis intégrée au groupe Rhône-Poulenc en 1972. En 1999, le propriétaire du site devient Rhodia, à l'époque une filiale de Rhône –Poulenc. Rhodia est rachetée par le groupe chimique belge Solvay en 2011.

[81] En 1975, le site de La Rochelle exploité par Rhône-Poulenc représente 50% du marché mondial de l'yttrium et de l'europium, 80% du lanthane et du praséodyme (Robin des Bois, 2005)

000 tonnes de concentré de terres rares par an (BRGM, 2015, p. 129), concentré importé depuis l'étranger.

Dans les années 1970, divers usages technologiques ont commencé à apparaître (europium pour les écrans cathodiques couleur, lasers, etc.), puis se sont diversifiés et étendus (BRGM, 2015, p. 3). Puis, en 1984 les aimants néodyme-fer-bore (Nd-Fe-B) sont mis au point, avec une énergie magnétique environ 2,5 fois plus puissante que celle des aimants samarium-cobalt et des coûts moins élevés (Wernick, 1995 in Gupta & Krishnamurthy, 2005). De plus, le fer et le néodyme, ses deux principaux composants, sont des matériaux relativement disponibles d'un point de vue géologique : environ 5% en masse de la croûte terrestre pour le fer et le Nd est la 3ème terre rare la plus abondante dans la croûte terrestre, environ cinq fois plus abondante que le samarium (Haynes, 2016). Ces différentes caractéristiques de prix, de puissance magnétique et de disponibilité ont conduit les aimants Nd-Fe-B à prendre rapidement le pas sur les aimants samarium-cobalt, qui sont restés dominants uniquement pour les applications à haute température.

Concomitamment à ces avancées technologiques des années 1980, la Chine a commencé l'exploitation à l'échelle industrielle des terres rares (J.-C. Victor et al., 2015) avec les réformes économiques entamées par Deng Xiaoping[82]. Des conseillers américains qui travaillaient auparavant à Mountain Pass ont été embauchés en Chine pour développer le savoir-faire local (Molycorp, 2011). Avec le programme 863 (State High-Tech Development Plan) lancé en 1986 (Christmann, 2015) la Chine a établi une stratégie économique de long terme en trois phases (J.-C. Victor et al., 2015) :

1. Asphyxie des autres producteurs en vendant un minerai à bas prix durant des années, tout en profitant de l'apport de devises étrangères
2. Stratégie de descente de la chaine de valeur en développant en Chine les industries de transformation, notamment en imposant des taxes à l'exportation sur la matière première incitant les entreprises à s'installer sur le territoire
3. Imposition de quotas ayant un triple avantage : préserver la ressource pour le marché intérieur, la préserver sur la durée, faire monter les prix et permettre de lutter contre les impacts sociaux et environnementaux (J.-C. Victor et al., 2015)

En parallèle du début de la production chinoise, la *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (NRC) et l'*International Atomic Energy Agency* (IAEA) ont mis en place dans les années 1980 une régulation qui a classé les minerais de terres rares phosphatés comme matière radioactive (10 CFR 40.4 : « *Source Material means: (1) Uranium or thorium[…] (2) ores which contain by weight one-twentieth of one percent (0.05%) or more of: (i) Uranium, (ii) thorium or […]* »). Cette règlementation visait à soumettre ces produits à des déclarations, des dispositions spécifiques de stockage, de transport, des mesures d'assainissement, et concernait aussi bien les sous-produits d'autres exploitations que le minerai exploité à Mountain Pass, bien que des dispositions spécifiques aient été prises par les États-Unis pour exempter les produits de cette mine du respect de cette règlementation (NRC: 10 CFR 40.13 in Lima & Filho, 2015, Chapitre 3). Les raffineries ont donc commencé à ne plus accepter ce type de minerai (Lima & Filho, 2015, p. 38). Cela a créé un effet indésirable sur les mines qui pourvoyaient ces raffineries : ne sachant que faire de leurs résidus miniers qu'elles n'arrivaient plus à vendre comme sous-produits, elles ont commencé à les stocker avec les stériles miniers ou à les accumuler dans des parcs à résidus. Cette disposition a également contribué à renforcer le monopole chinois, dont les raffineries ont continué à accepter des matières radioactives (Lima & Filho, 2015, p. 38-39).

[82] Deng Xiaoping ou Teng Hiao-Ping ou Teng Hsiao-Ping a été le secrétaire général du Parti communiste chinois de 1956 à 1967 et plus tard le numéro un de la République populaire de Chine de 1978 à 1992.

Ce renforcement de la production chinoise couplé à la réglementation classant la monazite et les déchets de traitement de la monazite comme matière radioactive a provoqué une diminution de la production dans les autres pays producteurs, notamment aux États-Unis (voir Figure 29).

Dans les années 1990 et 2000, cette tendance à la concentration avec, d'une part la stratégie chinoise de développement de l'industrie des terres rares, et d'autre part la propension des pays européens et des États-Unis à exporter les problématiques de pollution, s'est confirmée.

Ainsi, en 1995, dans l'état de l'Indiana, Magnequench, le leader mondial dans la fabrication d'aimants permanents, est vendu par General Motors à deux compagnies chinoises liées étroitement au gouvernement (Beijing San Huan New Material s High-Tech Inc. et China National Non-Ferrous Metals Import & Export Corporation). Les nouveaux propriétaires de Magnequench commencèrent à reproduire les installations américaines en Chine (Lima & Filho, 2015, p. 39), puis fermèrent l'usine américaine en 2002. D'après James C. Kennedy (Lima & Filho, 2015, p. 53) ce rachat aurait été négocié par le gouvernement chinois en échange de l'autorisation de l'ouverture d'une ligne de production automobile de General Motors à Shanghai. Ce rachat a été crucial pour faire passer la Chine d'un rôle de pourvoyeur de minerai à la maitrise de la production de métaux, alliages, aimants et composants à valeur ajoutée (Lima & Filho, 2015, p. 40). Notamment, cela aurait assuré à la Chine la maîtrise de la séparation des terres rares (Pitron & Turquier, 2013), et la propriété intellectuelle de technologies utilisées largement dans les systèmes d'armement de l'OTAN et des États-Unis (Lima & Filho, 2015, p. 53). James C. Kennedy (Lima & Filho, 2015, p. 40 et 53), dénonce l'aveuglement des États-Unis, qui au nom du principe de libre marché n'aurait pas pris garde à cette époque[83] à sauvergarder ce secteur stratégique.

Cependant, outre cette politique de rachat, la politique chinoise d'investissement dans le domaine de la recherche et du développement joue également un rôle prépondérant dans la formation d'un monopole chinois dans la production des terres rares. Ainsi, en 1997, dans la lignée du programme 863, le programme du gouvernement chinois 973 (*National Basic Research Program*) est initié afin de prendre un avantage technologique et stratégique dans divers domaines scientifiques et en particulier dans le développement de l'industrie des minéraux de terres rares. La politique industrielle de la Chine inclut des investissements directs et indirects, un soutien aux entreprises liées aux terres rares, le développement de la recherche à grande échelle, et des acquisitions ciblées (Lima & Filho, 2015, p. 39). Grâce aux prix bas des terres rares en Chine, combinés aux taxes à l'exportation, les entreprises non chinoises consommatrices de terres rares avaient tout intérêt à s'installer ou à investir en Chine. Ainsi, en 2012 des « entreprises des États-Unis, d'Allemagne, de France, du Canada et du Japon ont investi un total de 6,1 milliards de yuans chinois dans l'industrie des terres rares en Chine, en créant 38 entreprises à propriétaire unique à l'étranger et en joint-venture» (Information Office of the State Council The People's Republic of China, 2012). Même si ces entreprises produisent principalement pour l'exportation, cela a permis à la Chine de remonter la chaîne de valeur en aval et d'acquérir des savoir-faire.

Enfin, en réponse à l'enjeu environnemental, la délocalisation se poursuit. En effet, en France, les opérations de traitement de la monazite dans l'usine de la Rochelle ont été arrêtées le 15 août 1994 (ASN, 2009), le groupe Rhône-Poulenc (alors gestionnaire du site) ayant considéré qu'il n'existait pas de solution pour prendre en charge le thorium résiduel[84] (BRGM, 2015, p. 129). L'usine a été complètement restructurée (Inventaire général du patrimoine culturel de la Région Poitou-

[83] Cependant, les Etats-Unis changeront plus tard de stratégie en devenant plus interventionistes dans la stratégie industrielle. Notamment le Cnooc, une société pétrolière chinoise contrôlée par le gouvernement, a essayé d'acheter la mine de Mountain Pass en 2005 via Unocal, qui possédait alors Molycorp. Mais le Congrès a soulevé des objections qui ont bloqué la transaction (Bradsher, 2010a).

[84] Le thorium n'ayant pas d'utilisation économique significative dans l'industrie nucléaire, il se serait agi de prendre en charge des coûts importants de dispositifs de stockage adapté. La bibliographie n'a pas permis de dégager à ce jour une estimation du coût de cette mise en conformité et de la possibilité ou non de l'assumer par les industriels.

Charentes, 1996). Elle reçoit depuis lors des concentrés déjà « débarrassés d'une grande partie des radionucléides à l'issue d'un traitement en Chine » (ASN, 2009), c'est-à-dire que la gestion des nuisances environnementales a été délocalisée vers la Chine. La problématique demeure néanmoins sur le sol français avec une production de déchets contaminés aux radionucléides qui aura duré plus de 60 ans (ASN, 2009). En effet, comme l'indique un rapport de l'autorité de sûreté nucléaire, la monazite a été « exploitée par Rhône Poulenc à La Rochelle, mais aussi de façon industrielle sur trois autres sites : à Serquigny, dans l'Eure […], à Thann, dans le Haut-Rhin et à Pargny-sur-Saulx, dans la Marne » (ASN, 2009). C'est également la raison évoquée pour l'abandon des mines australiennes (BRGM, 2015, p. 100). En 2002, la mine de Molycorp en Californie, Mountain Pass, qui faisait jusque-là l'objet d'une exemption à la loi américaine sur les déchets radioactifs (Lima & Filho, 2015, p. 39) va fermer suite à une importante fuite dans un pipeline qui acheminait des résidus miniers radioactifs. En effet, les eaux usées étaient canalisées vers le lac Ivanpah Dry, dans le désert de Mohave, à environ 22 kilomètres de là et la rupture a été provoquée par l'enlèvement des dépôts dans le pipeline. Cet accident a engendré un retard dans le renouvellement du permis minier, ce qui, associé à une concurrence chinoise à faibles coûts, a provoqué la fermeture de la mine (Gardner, 2012). C'est également cette année-là que les installations de Magnequench encore situées aux États-Unis ont fermé (Lima & Filho, 2015, p. 39).

La production de terres rares était donc passée d'environ 40 000 tonnes d'OTR produites annuellement dans le monde en 1985 avec une production chinoise faible, à plus de 80 000 tonnes d'OTR produites exclusivement par la Chine en 2000 (Figure 29).

Ainsi, la non-conformité des entreprises européennes et américaines aux règlementations environnementales et sanitaires liées à l'exploitation des terres rares, ainsi que la stratégie chinoise (bas coûts, taxes à l'exportation « prohibitives » (Lima & Filho, 2015, p. 53), rachat et soutien aux entreprises nationales), ont eu pour conséquence que la plupart des mines, usines de raffinages et usines métallurgiques dans le monde ont fermé ou se sont relocalisées en Chine. Ce processus a permis l'émergence d'un monopole quasi exclusif de la Chine, notamment en termes de propriété intellectuelle (Lima & Filho, 2015, p. 40). Seule une petite partie de la chaîne de valeur et de la propriété intellectuelle demeure au Japon (BRGM, 2015; Lima & Filho, 2015, p. 40).

La structuration de la production des terres rares est donc historiquement liée à la recherche du plus bas coût de production associée à une production massive, et à une stratégie d'évitement face à la prise en charge des coûts sociaux et environnementaux de la production.

1.2.4. La « crise » des terres rares et la difficile relance de cette industrie aux États-Unis et en Europe

Le monopole de la Chine sur la production des terres rares construit depuis les années 1980, a mis en place les conditions d'une envolée des prix qui a eu lieu en 2010-2011, qualifiée de « crise » des terres rares par certains industriels et organismes publics (Delamarche, 2017; Faujas, 2011; Hetzel & Bataille, 2016). Ainsi, la politique chinoise de restriction des exportations sur les terres rares a atteint un sommet en 2010 lorsque les quotas chinois sont passés d'une autorisation d'exportation de 50 145 tonnes d'oxydes de terres rares (OTR) en 2009 à 30 258 tonnes en 2010 (voir Figure 30).

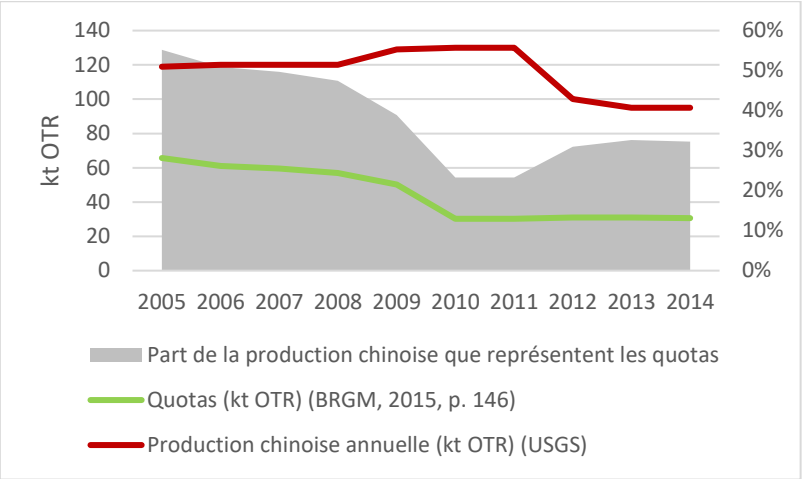


Figure 30 : Quotas à l'exportation en Chine et leur part dans la production chinoise d'OTR entre 2013 et 2014. Source : autrice

Cette réduction des quotas avait, selon le gouvernement chinois, pour but de mieux protéger l'environnement et de préserver la ressource. De plus, la Chine avait mis en place des taxes à l'exportation, comprises entre 0 et 25 % selon les éléments et les composés, passés en 2011 à 15 à 25 % (BRGM, 2015, p. 146). Le néodyme était soumis à une taxe d'exportation de 25% sur le néodyme métal et de 15% sur les produits moins affinés (Lima & Filho, 2015, p. 31 d'après MetalPages 2014). D'après le BRGM, « ces contraintes, à un moment où la demande mondiale en terres rares s'accroissait […] avaient conduit à de vives tensions sur le marché et à une envolée des prix » en 2010-2011 (BRGM, 2015, p. 14). En effet, en 2010, la demande avait apparemment dépassé l'offre chinoise, A. Mancheri estimant la demande mondiale hors Chine en 2010 à 48 000 tonnes OTR, dépassant les 30 258 tonnes officiellement exportées par la Chine (Lima & Filho, 2015, p. 31).

Mais cette tension sur l'approvisionnement n'a probablement été qu'apparente. En effet, la situation réelle a même été évaluée comme excédentaire par certains acteurs (Roskill, 2015) en prenant en compte la production chinoise illégale, estimée entre 15 % et plus de 40 % de la production chinoise totale (BRGM, 2015, p. 126). Il est très probable que la montée en flèche des prix en 2010-2011 ait été déclenchée moins par l'augmentation de la demande que par l' « anticipation d'une poursuite de cette augmentation, plus particulièrement pour les aimants permanents […] et les luminophores » (BRGM, 2015, p. 156) et par les craintes suscitées par l'incident diplomatique de septembre 2010 entre la Chine et le Japon (incident des îles Senkaku). Cet incident avait conduit la Chine à ne pas effectuer les livraisons de terres rares au Japon. Cet embargo (non reconnu comme tel par la Chine) a donné une impulsion supplémentaire à la montée des prix des terres rares qui se faisait déjà sentir depuis plusieurs mois. Les craintes sur les approvisionnements ont conduit les industriels et les négociants à faire des achats préventifs (stockage), ce qui a encore accéléré la montée des prix, avec un effet de bulle spéculative (BRGM, 2015, p. 12). Cette analyse prêtant à la crise des terres rares un caractère essentiellement spéculatif, est confirmée par les travaux de Mancheri (Lima & Filho, 2015). En effet, pour lui, le commerce mondial des terres rares a atteint un pic en 2004 (voir Figure 31), avant de diminuer entre 2007 et 2009, ce qui s'explique notamment par la baisse de la demande des « pays avancés » durant la crise financière mondiale qui avait sévèrement touché des consommateurs majeurs de terres rares comme les États-Unis, l'Europe et le Japon (Lima & Filho, 2015, p. 25). Si une légère reprise est effectivement observable en 2010[85] (voir

[85] L'importante augmentation des volumes d'échange entre 1999 et 2000 sur la Figure 6 ne correspond pas à la réalité, mais est dû au fait que la chine ne reportait pas à UN COMTRADE les masses exportées correspondant au code HS-2846 avant 2000.

les barres sur la Figure 31), elle ne correspond pas à l'augmentation sans précédent de la valeur des échanges (voir la ligne sur la Figure 31) qui revêt donc un caractère spéculatif.

Figure 31 : Volume brut (somme des imports et exports en milliers de tonnes à gauche) et valeur (en millions de dollars à droite) du commerce de terres rares entre 1990 et 2013 pour tous les pays rapporteurs de UN Comtrade. Source : Lima & Filho, 2015, p. 25

Cette envolée des prix et la prise de conscience par les pays de l'OCDE de leur dépendance vis-à-vis de la Chine pour ces substances ont favorisé la remise en production de producteurs tels que Molycorp aux États-Unis ou Lynas en Australie (BRGM, 2015, p. 14). Ainsi, la reprise de l'exploitation de Mountain Pass aux États-Unis s'est faite très rapidement suite à l'altercation entre la Chine et le Japon sur la livraison des terres rares : annoncée en avril 2010, la société est entrée en bourse et Mountain Pass a rouvert en décembre 2010 (Jamasmie, 2015). En 2011, des investissements supplémentaires ont eu lieu pour moderniser les installations (Molycorp, 2011) et en 2012, le redémarrage effectif de la production minière sur le site de Mountain Pass était effectué. Cette même année Molycorp acquiert pour un peu plus d'un milliard de dollars l'entreprise de transformation canadienne Neo Material Technologies, issue d'une fusion entre l'entreprise chinoise Magnequench et l'entreprise canadienne AMR Technologies en 2005, tentant ainsi de maitriser les étapes aval de la chaîne de valeur notamment concernant la fabrication des aimants Nd-Fe-B.

Cette dépense fédérale a été critiquée par le *Government Accountability Office* des États-Unis [86], qui a déclaré que même si la mine de Mountain Pass avait rouvert, les États-Unis avaient déjà perdu une grande partie de leurs compétences techniques pour la transformation des terres rares (Bradsher, 2010a). Roskill Consulting Group, société de conseil qui produit de l'information sur le marché des terres rares, pointait également une opération qui serait profitable d'un point de vue financier sur le court terme, essentiellement grâce au prix anormalement élevé des terres rares (Bradsher, 2010a), mettant en doute la viabilité du projet.

Et en effet, les prix étaient devenus tellement élevés en 2011, dans un contexte de morosité économique persistant, que les consommateurs ont cherché tous les moyens de réduire leur consommation, par économie sur les quantités, substitution et retour à des technologies moins performantes. Ainsi, les États-Unis auraient réduit leurs importations de métaux et de composés de terres rares, « passés de 190 millions de dollars en 2014 à 150 millions de dollars (estimés) en 2015»

[86] Le Government Accountability Office des Etats-Unis est un organisme indépendant et non partisan qui travaille pour le Congrès. Il enquête sur la manière dont le gouvernement fédéral dépense l'argent des contribuables.

(USGS in Dutta et al., 2016). La demande a d'autant plus baissé qu'elle s'est assortie d'un report de la consommation sur les stocks préventifs constitués lors de la montée des prix. Cette baisse de la demande, assortie aux exportations chinoise en contrebande (estimée à 40 000 tonnes en 2014) et donc à une offre plus abondante que prévu, a conduit à un « éclatement » de la bulle et à une chute quasi-continue des prix entre mi-2011 et novembre 2015 (BRGM, 2015, p. 12-13). Ainsi en juillet 2011, le néodyme était à 468 USD/kg FOB Chine (prix au moment du chargement sur le navire, pas de frais de transports maritimes comptabilisés ni assurance, ni douanes ni livraison) et au premier semestre 2015 il était à 86 USD/kg FOB Chine (Metal Pages).

L'écroulement des prix a bien entendu mis en difficulté financière les nouveaux producteurs (BRGM, 2015, p. 12). En 2015, Molycorp avait une dette de 1,7 milliard de dollars, et la société perdait rapidement de la valeur (Jamasmie, 2015). La compagnie a annoncé en août que les opérations sur le site de Mountain Pass allaient être suspendues à partir d'octobre, attribuant cet arrêt à la chute des prix des terres rares (Molycorp, 2015).

Entre-temps, l'Union Européenne, les États-Unis, et le Japon ont eu gain de cause auprès de l'organisation mondiale du commerce (OMC) en mars 2014 (BRGM, 2015), concernant la levée des quotas chinois. En effet, il n'existait pas de preuve que les quotas aient eu les effets que le gouvernement chinois a déclaré rechercher (protection de la ressource et de l'environnement), car pour cela, il aurait fallu répercuter la baisse des quotas à l'exportation sur une baisse de la production, ce qui n'a pas été le cas. La production a continué d'augmenter et c'est cette constatation qui a fait perdre le cas à la Chine (Lima & Filho, 2015, p. 33). La Chine a ainsi supprimé ses quotas en janvier 2015 et ses taxes à l'exportation en mai 2015 (Wenjuan Chen et al., 2018). La régulation chinoise passe désormais par la délivrance de Licences d'Exportation à un nombre limité de compagnies et par des redevances nationales sur la production de concentrés de terres rares en fonction de la valeur du concentré (Metal-Pages, avril 2015)[87].

La crise des terres rares est donc moins un révélateur d'une tension entre l'offre et la demande, avec une production chinoise de terres rares qui est très importante et s'est révélée ces dernières années en surproduction par rapport à la consommation, que des craintes de la part des industries et pays consommateurs de l'utilisation du monopole chinois comme levier de négociation sur des sujets d'ordre géopolitique. La crise des terres rares et les difficultés de relance de projets miniers dans d'autres pays du monde ont en revanche révélé le verrouillage du monopole chinois. En effet, d'une part, le marché des terres rares est volatile et la production chinoise de masse et à bas coûts est quasiment la seule à pouvoir se maintenir lorsque le prix des terres rares est bas. Ce sont donc les raisons mêmes ayant amené l'industrie des terres rares à délocaliser en Chine qui rendent difficile la relance de cette industrie dans le reste du monde. D'autre part, la descente de la chaîne de valeur chinoise et l'abandon de l'industrie des terres rares dans le reste du monde a également créé un verrou technologique, surtout lié à l'absence de savoir-faire, quant à la capacité de traitement des terres rares.

1.2.5. Une descente de la chaîne de valeur chinoise plus quantitative que qualitative

D'après le BRGM, l'augmentation de la consommation des terres rares dans les années 2000 est due principalement au « développement rapide de la production chinoise puis de son industrie de transformation, dans le sillage de la très forte croissance économique de la Chine dans la décennie 2000 » (BRGM, 2015, p. 86). En effet, le Tableau 25 montre la part grandissante de la demande chinoise dans la demande mondiale. La demande mondiale hors Chine de terres rares ayant plutôt

[87] Taxes calculées sur la valeur de vente de la substance (non sur le tonnage). Pour les terres rares légères, les taxes s'élèvent à : 11,5% en Mongolie intérieure, 9,5% dans la province du Sichuan et 7,5% dans la province de Shandong. Ce qui présente un renforcement du contrôle central, les taxes locales étant supprimées. Cette mise en place des taxes au niveau des producteurs n'a pas encore été répercutée sur les prix.

stagné entre 2005 et 2010 (excepté une baisse en 2009), cela va dans le sens d'une augmentation liée à la demande chinoise.

Tableau 25 : Demande en oxydes de terres rares (OTR) mondiale entre 2005 et 2014, demande hors Chine (HC) et part chinoise de la demande mondiale

Année	Demande mondiale (t OTR)	Source pour demande mondiale	Demande HC (t OTR)	Source pour la demande HC	Part de la demande chinoise	Source pour la part de demande chinoise
2005	s.d.		46 000	(Lima & Filho, 2015, p. 31 d'après Chinese Ministry of Commerce and Kingsnorth)	50%	
2006	110 000	(Kingsnorth, 2013)	50 000		55%	(Kingsnorth, 2013)
2007	s.d.		50 000			
2008	124 000	(Kingsnorth, 2013)	50 000		56%	(Kingsnorth, 2013)
2009	s.d.		25 000			
2010	123 000	(Kingsnorth, 2013)	48 000		60%	(Kingsnorth, 2013)
2011	s.d.		35 000		66%	(Kingsnorth, 2013)
2012	113 250	(Roskill, 2015)	39 500		64%	(Kingsnorth, 2013)
2013	s.d.		37 500		68%	(Kingsnorth, 2013)
2014	118 777	(Roskill, 2015)	44 000			

Il faut cependant souligner que ce pourcentage n'est pas indicatif de la répartition de la consommation finale. Dire que « la Chine, le Japon et l'Asie du nord, qui concentrent l'essentiel de la production des aimants permanents » (BRGM, 2015, p. 86), « tirent » la consommation de terres rares seraient une conclusion rapide, car une partie de cette demande sera ensuite exportée à travers les produits manufacturés dans le monde entier. Cette répartition est donc davantage « une illustration de la position de la Chine comme 'usine du Monde' » (BRGM, 2015, p. 86). En effet, cette distinction entre consommation des matières premières pour la demande finale et consommation pour l'industrie manufacturière est importante pour notre étude en ce qu'elle permet d'identifier qui tire la consommation et donc où sont les rapports de pouvoir dans la chaîne. Pour ce faire, le concept de matériaux incorporés a été développé au sein de la recherche MFA. S'il n'existe pas d'étude spécifique sur le néodyme, une étude des matériaux incorporés fait état d'une tendance générale entre 1995 et 2005 à la substitution de l'exploitation domestique de matières premières dans les pays industriels par une importation depuis d'autres régions du monde (Bruckner, Giljum, Lutz, & Wiebe, 2012). Cette importation de matières premières dans les pays industriels se fait notamment à travers la demande de produits manufacturés chinois. 22% de la consommation chinoise, toutes matières premières confondues (minerais et les minéraux industriels, minerais métalliques, combustibles fossiles, biomasse), serait ainsi réexportée dans les pays industriels dans les produits manufacturés (Bruckner et al., 2012, p. 574).

Cette augmentation de la part chinoise dans la consommation mondiale de terres rares témoigne donc d'un succès relatif de la Chine dans la descente de la chaîne de valeur des terres rares. En effet, comme évoqué au premier paragraphe, la Chine a pour stratégie industrielle de descendre la chaîne de valeur des terres rares depuis son plan quinquennal de 1986. Ainsi le 12ème plan quinquennal (2011–2015) fait référence à la nécessité de diriger les investissements directs étrangers dans les

industries de haute technologie en aval de la production de terres rares, notamment dans les industries productrices d'aimants permanents (MIIT, 2012 in Wübbeke, 2013).

Cependant, selon Chen Yanhai, chef du département des matières premières au ministère chinois de l'industrie et des technologies de l'information (MIIT), la Chine reste plutôt faible dans la recherche sur les matériaux liés aux terres rares (Gao, 2011 in Wübbeke, 2013).

De même, une étude menée par Su Wenqing, ancien directeur de la Société des terres rares de la Chine, faisait état en 2009 de l'insatisfaction quant à la capacité d'innovation du secteur des terres rares (Su, 2009). Ainsi, selon cette étude, « bien que 64% des brevets nationaux chinois déposés entre 1998 et 2002 soient liés aux terres rares, leur contenu technologique reste faible (Su, 2009). Les brevets étrangers enregistrés en Chine, principalement par le Japon et les États-Unis, représentent 34% des brevets chinois et sont les plus sophistiqués (Su, 2009). Les brevets relatifs aux technologies de base appartiennent à des entreprises japonaises. Les redevances élevées de ces brevets ont empêché la concurrence chinoise d'accéder aux marchés de haute qualité tels que la production de pointe d'aimants Nd-Fe-B.» (Wübbeke, 2013). En 2008, la part de la Chine dans la production mondiale de ces aimants dépassait 76% en masse (Su, 2009). Le Japon d'un côté, et l'Europe et les États-Unis de l'autre, représentaient respectivement 21% et 2% (Su, 2009) de la production massique d'aimants. La part de la Chine continue de s'accroître : en 2012 la Chine fabriquait 80% des aimants contenant des terres rares, le Japon 17% et l'Europe 3% (Constantinides, 2012), cette application représentant près de 53% de la valeur totale du marché des terres rares (BRGM, 2015). En 2008, cependant, en termes de valeur, les ventes totales d'aimants Nd-Fe-B chinois ne représentaient que 58% du total mondial, contre 36% pour le Japon et 4% pour l'Europe et les États-Unis. Ainsi, le prix unitaire moyen des aimants était de 43 USD/ kg pour la Chine, de 96 USD/ kg pour le Japon et de 112 USD / kg pour l'Europe et les États-Unis (Su, 2009). Cette tendance pourrait changer dans les années à venir, les fabricants d'aimants chinois ayant récemment augmenté leurs investissements dans la production d'aimants Nd-Fe-B à haute performance (Research and Markets, 2018).

La Chine a donc bien un quasi-monopole de la production des terres rares. Ce monopole a été construit grâce à la stratégie chinoise, à un « coût du travail bas et à des standards environnementaux moins exigeants » (J. Chen, Zhu, Liu, Chen, & Yang, 2018). Cette situation place l'industrie chinoise des terres rares dans le dilemme du « verrou bas de gamme » ou *low-end locking dilemma,* (J. Chen et al., 2018) : les mines de terres rares chinoises peuvent maintenir leur production à des coûts bien inférieurs à ceux d'autres pays, mais des coûts élevés pourraient permettre à d'autre pays de produire des terres rares. Ce sont bien sur ces étapes que la Chine a un avantage compétitif incontestable : « 88% des exportations de terres rares chinoises se fait en tant que matières premières contrairement au Japon ou à l'Allemagne qui ont une plus grande part de produits finaux dans leurs exportations (59% et 39% respectivement) » (J. Chen et al., 2018).

Enfin, il est à noter que le contrôle des prix des terres rares par la Chine n'est pas absolu. Ainsi, Chen et ses collaborateurs soulignent-ils que le marché mondial des terres rares implique « de nombreux petits producteurs et exportateurs divers chinois, qui ont un désavantage à la table des négociations face à des gros importateurs d'autres pays. Ce qui […] n'apporte pas un pouvoir d'établissement des prix à la Chine » (J. Chen et al., 2018). La persistance d'exploitations illégales et de contrebande malgré les tentatives de réglementation (Mancheri & Marukawa, 2016) participe également à étayer les doutes sur le contrôle du prix des terres rares par la Chine et à remettre en question la thèse selon laquelle la chute du prix des terres rares était intentionnelle afin d'éviter la concurrence sur la production des matières premières.

Il a donc été vu dans ce paragraphe que la thèse s'intéressait aux coûts sociaux liés à la production du néodyme utilisé dans les aimants Nd-Fe-B et que la production de ces aimants était déterminée par la production des terres rares. La production des terres rares se caractérise par une production chinoise avec une importante capacité de production (production de masse), un coût faible (attribué

notamment à une exigence plus faible en matière de gestion des déchets, également aux effets d'échelle), et un quasi-monopole notamment en termes de technologie de transformation. Cette structuration de la filière semble verrouillée autant pour la concurrence internationale qui ne peut pas rivaliser avec les bas coûts de production chinois, que pour les entreprises chinoises qui font face à des difficultés à se positionner sur des produits à haute valeur ajoutée.

1.3. Les principales étapes et acteurs de la chaîne de valeur du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B

Ce paragraphe vise à présenter la structure intrants-produits et les acteurs de la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B. Il s'agit ici de s'intéresser à l'amont de la chaîne (de la mine à la fabrication des aimants) et à l'extrême aval (le recyclage). Les étapes et acteurs liés à l'utilisation de ces aimants ne sont pas pris en compte. En effet, l'amont des chaînes de valeur fait l'objet de moins d'analyse de chaînes globales de valeur et les acteurs de ces filières sont mal connus. Il s'agit donc de mieux comprendre le fonctionnement de cette partie de la chaîne de valeur afin de pouvoir identifier quelles caractéristiques de la chaîne seraient en lien avec la dynamique d'épuisement des ressources et des coûts sociaux associés.

Les principales étapes du procédé de la mine à la fabrication des aimants, les principaux acteurs de l'amont de la chaîne ainsi que leur ancrage géographique sont donc présentés.

1.3.1. Les principales étapes de la chaîne de valeur du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B

Les principales étapes industrielles permettant d'obtenir des aimants Nd-Fe-B sont synthétisées dans ce paragraphe. Il a été choisi de distinguer 4 étapes principales (voir Figure 32) : une première étape minière et minéralurgique depuis l'extraction du minerai jusqu'à l'obtention du concentré minier, une deuxième étape de traitement chimique du concentré et de séparation jusqu'à obtention des oxydes de terres rares (OTR) individuelles, une troisième étape d'affinage permettant d'obtenir des terres rares (TR) métalliques individuelles ou en alliage, et enfin la fabrication des aimants frittés Nd-Fe-B.

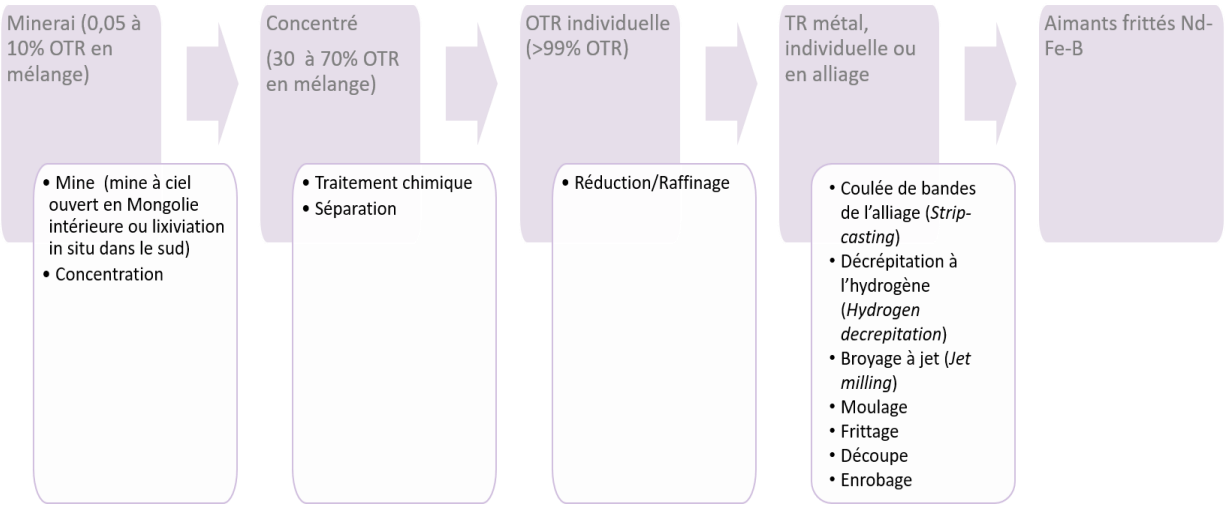


Figure 32 : Principales étapes de la fabrication des aimants frittés Nd-Fe-B depuis les mines de terres rares jusqu'aux aimants. Source : autrice

i. Étape minière et minéralurgique

La Chine réalisait environ 87% de la production minière mondiale en 2014 (Jewell & Kimball, 2015). Les ressources en oxydes de terres rares chinoises étaient estimées à 48 millions de tonnes en 2005 (Gupta & Krishnamurthy, 2005, p. 83). Pour la première étape d'extraction minière et de concentration, deux méthodes principales d'exploitation des minerais de terres rares seront distinguées : l'exploitation à ciel ouvert du gisement de Baiyun Ebo[88] en Mongolie intérieure dans le nord de la Chine et l'exploitation par lixiviation *in situ* dans le sud de la Chine.

Il y a quatre ceintures de minéralisation principales en Chine.

La première ceinture de minéralisation en Mongolie intérieure est une formation de dolomie ferrugineuse métamorphisée contenant un mélange de bastnaésite et de monazite (voir Annexe 2 pour les détails sur les minéraux) (Gupta & Krishnamurthy, 2005, p. 83). Le gisement de Baiyun Ebo fait partie de cette ceinture, il est situé à 135 kilomètres au nord-ouest de Baotou dans la province autonome de Mongolie intérieure et contient également du niobium et du fer. C'est l'exploitation de terres rares la plus importante au monde, l'extraction de ce gisement représentant environ 60% de la production chinoise (BRGM, 2015, p. 160). Cette mine est exploitée à ciel ouvert. Il s'agit également d'une des plus grandes mines de fer chinoises (Gupta & Krishnamurthy, 2005, p. 84; Okuno, 2006) et d'une potentielle mine de niobium (Gupta & Krishnamurthy, 2005 ; Navarro and Zhao, 2014). A ce titre l'exploitation des terres rares est conditionnée par l'exigence de rentabilité de l'exploitation du fer avec. Les terres rares peuvent donc être qualifiées de sous-produit de l'exploitation du fer à Baiyun Ebo[89]. Il y a près de 6 voies de concentration différentes utilisées pour le procédé (Navarro and Zhao, 2014) ; c'est donc une voie classique, moyenne qui est présentée ici. Le minerai est concassé et broyé sur place, puis expédié à 150 kilomètres au sud de la mine pour être concentré. La concentration se fait par séparation magnétique couplée à une première flottation assurant la séparation entre minéraux ferrifères et terres rares, séparation gravitaire et déschlammage[90], suivi d'une deuxième flottation (BRGM, 2015, p. 134; Capilla & Delgado, 2014; Jordens, Cheng, & Waters, 2013), voire récemment d'une troisième flottation (Ma, Li, Zhang, Wang, & Li, 2016). Le site a une capacité de production de concentrés, contenant en moyenne de 50 à 60 % d'oxydes de terres rares (même s'il existe toujours des concentrés à 30%) de 235 000 tonnes/an (Roskill, 2012 in BRGM, 2015; Qi, 2018).

La deuxième ceinture en bordure des provinces de Fujian, Jiangxi, Guangdong, Guangxi, Hunan est constituée par des argiles ioniques. Ce gisement est unique au monde, car il a un taux important de

---

[88] Baiyun Ebo étant une transcription du chinois pour désigner le district minier de *Baiyun* (en pinyin : Báiyún Kuàngqū/白云矿区), on peut trouver plusieurs orthographes dans la littérature pour désigner ce gisement : *Baiyun* Obo, Bayan Obo, *Baiyun'ebo*, *Baiyun'ebo*, etc.

[89] Rappel de ce qu'est un sous-produit (Gupta & Krishnamurthy, 2005) : « Malgré l'importance des ressources mondiales identifiées de terres rares, leur production et leur offre ont été fortement influencées par la nature de la minéralisation des terres rares. La production minière commerciale de terres rares n'est possible dans la plupart des cas qu'en tant que co-produit ou sous-produit d'une autre valeur minérale. La raison en est que la concentration de terres rares dans ses réserves est si faible que l'extraction de terres rares à elle seule n'est pas rentable, car la valeur marchande actuelle des terres rares ne peut pas supporter entièrement les coûts des activités d'exploitation minière […]. Lorsque la terre rare est extraite en tant que co-produit, la valeur marchande du produit principal supporte le coût d'extraction de la terre rare, et la récupération des terres rares rend la récupération du produit principal plus économiquement attrayante. Il existe un partage des coûts d'extraction et de production entre un coproduit et un produit principal, ce dernier supportant une part importante du coût total. Lorsque les terres rares sont récupérées en tant que sous-produit, la situation est la même que celle de la récupération en tant que co-produit, à ceci près que la récupération et la vente de sous-produits en terres rares ne sont pas une condition nécessaire pour effectuer l'exploitation et la vente du produit principal économiquement viable ». La distinction entre sous-produit et co-produit varie cependant d'un auteur à l'autre (Nassar et al., 2015)

[90] Action de retirer la fraction la plus fine des minéraux broyés.

terres rares lourdes (voir Annexe 2), éléments les plus rares et les plus chers de la famille des terres rares. Du fait de leur nature particulière les argiles ioniques chinoises ne subissent pas d'étape minéralurgique et sont directement traitées par hydrométallurgie. Le traitement se fait principalement par lixiviation *in situ* (BRGM, 2015) : une solution de sulfate d'ammonium est injectée par forage dans le gisement. La solution se charge en terres rares et est récupérée par d'autres forages qui drainent la solution. La solution est ensuite traitée par du carbonate d'ammonium, puis de l'acide oxalique qui précipite sous forme d'oxalates contenant les terres rares. Les oxalates sont calcinés et produisent un concentré pouvant contenir jusqu'à 90 % d'OTR.

Les modes d'exploitation de la troisième et de la quatrième ceinture ne sont pas étudiés ici. La troisième ceinture est la ceinture himalayenne Mianning-Dechang, à l'ouest du Sichuan, sud-ouest de la Chine. Elle contient des réserves totales de plus de 3 millions de tonnes de terres rares légères, dont un gisement géant (Maoniuping), un grand (Dalucao) et un certain nombre de petits et moyens gisements (Muluozhai, Lizhuang). C'est un complexe filonien de carbonatites dans une syénite alcaline (Hou et al., 2009). Enfin, la quatrième ceinture est un placer de plage au sud-est de la Chine.

ii. Étape de traitement chimique et de séparation

L'obtention d'oxydes de terres rares séparées à partir de concentrés se déroule en deux phases principales.

D'abord, le concentré subi un traitement chimique qui consiste soit en une attaque acide, soit en une attaque basique (BRGM, 2015). Cette étape permet d'obtenir des chlorures de terres rares ou des carbonates de terres rares, contenant environ 90% d'oxydes de terres rares. Pour cette étape à Baiyun Ebo les deux méthodes les plus utilisées depuis les années 1980 sont la décomposition du concentré de bastnaésite par grillage avec de l'acide sulfurique concentré ou à l'hydroxyde de sodium solide (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Qi, 2018, p. 78). La première méthode est la plus utilisée, la deuxième méthode est utilisée sur les concentrés à forte teneur en OTR. La Figure 33 illustre la décomposition du concentré par grillage intensifié[91] avec de l'acide sulfurique.

[91] Le grillage est qualifié d'intensif car la température de grillage est plus élevée (400 à 500°C) que celle utilisée dans les années 1970 (250 à 300°C) sur des concentrés qui ne contenaient que 20 à 35% de terres rares (Qi, 2018).

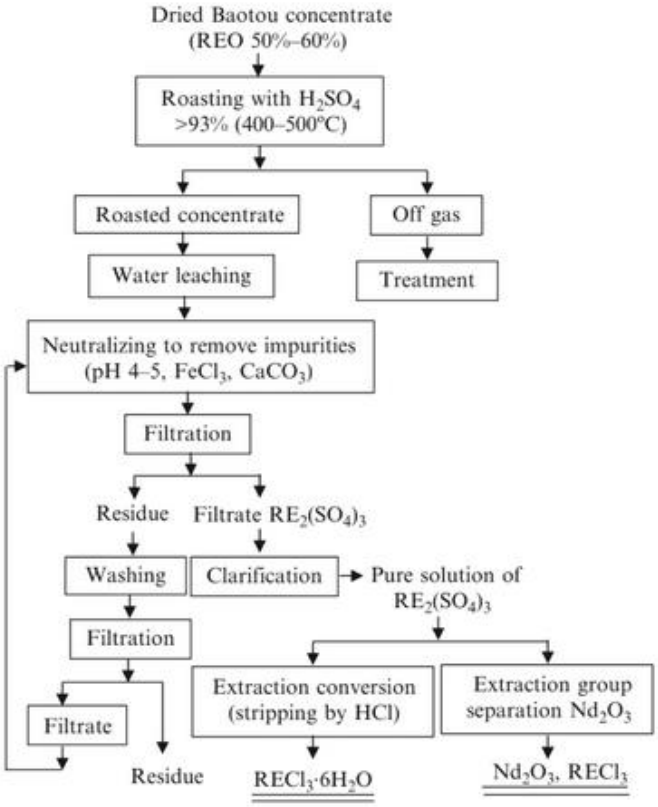


Figure 33 : Schéma de procédé de la décomposition par grillage intensifié du concentré de Baiyun Ebo par l'acide sulfurique. Source : Qi, 2018, fig. 1.48

Au niveau du gisement de Baiyun Ebo, en 2011 la capacité de production de ces carbonates et chlorures de terres rares était de 21 200 tonnes par an (Roskill, 2012 in BRGM, 2015).

La technique la plus utilisée pour séparer les terres rares contenues dans les carbonates et les chlorures est l'extraction par solvant (extraction liquide-liquide), excepté pour l'europium (Qi, 2018, p. 187). Le choix de cette technique repose sur son efficacité, mais aussi sur son caractère économique par rapport à d'autres techniques. Cependant, cela reste l'étape la plus coûteuse : le procédé de séparation et de purification des terres rares requiert beaucoup d'énergie et d'intrants ce qui contribue à environ 70% du coût d'exploitation des terres rares (Gibson et Parkinson, 2011 in Capilla & Delgado, 2014). Cette technique repose sur la distribution différentielle des Terres Rares entre les phases aqueuse et organique. La solution aqueuse contenant les terres rares est tout d'abord mélangée à une phase organique contenant un agent de solvatation organique qui forme des complexes avec les ions de terres rares. Les ions sont ensuite extraits de la phase en la mettant en contact avec une solution aqueuse dans laquelle les ions ont une solubilité supérieure. En ajustant les débits, les terres rares peuvent être concentrées 10 à 100 fois au cours d'une telle étape du processus, étape qui est ensuite répétée jusqu'à ce que la pureté requise soit atteinte (Royen & Fortkamp, 2016). A Baotou, la capacité de production de ces oxydes de terres rares séparées était en 2011 de 60 0000 tonnes/an et devait passer à 73 500 tonnes (BRGM, 2015, p. 160).

iii. Étape d'affinage permettant d'obtenir des terres rares (TR) métalliques individuelles ou en alliage

Les oxydes de terres rares subissent une réduction chimique ou électrochimique (Gupta & Krishnamurthy, 2005). Cette réduction se fait pour les terres rares lourdes à « haute température par le calcium, le lithium, le magnésium ou le baryum. Au cours de cette séparation, l'adjonction de bore, de fer ou de cobalt aux métaux isolés permet d'obtenir directement des alliages, utilisés pour

la fabrication d'aimants permanents par exemple » BRGM, 2015). L'affinage des métaux se fait ensuite par fusion sous vide poussé (*pyrovacuum treatment*) (Gupta & Krishnamurthy, 2005). Les techniques diffèrent selon les producteurs, mais les procédés exacts ne sont souvent pas divulgués (BRGM, 2015). Pour la production de Baiyun Ebo, la capacité de production du néodyme métal est de 8 000 tonnes par an en 2011, et de 4 000 tonnes pour les poudres d'alliage destinées à la production des aimants Nd-Fe-B (Roskill, 2012 in BRGM, 2015).

iv. Fabrication des aimants Nd-Fe-B

Il existe 3 types différents d'aimant Nd-Fe-B en fonction de leur méthode de production. Les premiers sont les aimants frittés produits à partir de poudres microcristallines (demande d'environ 70 000 tonnes par an), les deuxièmes sont les aimants liés, produits en utilisant une résine pour lier les poudres nanocristallines microcristallines (demande d'environ 10 000 tonnes par an) et les troisièmes sont les aimants formés par déformation à chaud en utilisant des poudres nanocristallines (environ 1000 tonnes par an) (Kooroshy et al., 2015, p. 22). La production d'aimants liés rend l'aimant plus polyvalent en forme et taille, et celui-ci peut ensuite être utilisé dans des applications plus petites et sous des formes plus diverses que les aimants frittés. Cependant, les aimants liés ont une densité d'énergie magnétique moindre qui les rend moins attractifs dans les grandes applications (Eriksson & Olsson, 2011). Certaines applications présentent les deux types d'aimants, par exemple les aimants contenus dans l'électronique mixte (les téléphones mobiles, brosses à dents électriques, les rasoirs, les perceuses, etc.) sont souvent très petits (jusqu'à 0,5g dans un smartphone et beaucoup moins dans les petits mobiles) et se présentent sous la forme d'aimants frittés ou d'aimants liés (Kooroshy et al., 2015, p. 51). Toutes les applications de grandes tailles, notamment les éoliennes et les moteurs de voitures électriques et hybrides (mais aussi les IRM, les moteurs industriels) utilisent des aimants frittés (Entretien 20 et 22, 2016).

Seule la fabrication des aimants frittés, la plus courante, est présentée en détail sur la Figure 32. Les aimants frittés sont fabriqués à partir de lingots de métal qui subissent une décrépitation à l'hydrogène (*hydrogen decrepitation* en anglais), puis un broyage (*jet milling* en anglais), pour former une poudre métallique fine de granulométrie inférieure à dix microns. La poudre est ensuite alignée magnétiquement par un champ magnétique et comprimée dans un récipient (c'est l'étape de moulage), puis frittée dans un four de frittage (*sintering* en anglais), où la poudre fond et devient un aimant solide (Kuhrt, 1995 in Eriksson & Olsson, 2011). Les aimants sont alors sous forme de blocs, et pour obtenir la forme souhaitée pour une application donnée, les aimants sont découpés et polis. Les aimants étant fragiles et vulnérables à la corrosion, un revêtement est ensuite appliqué : c'est l'étape d'enrobage (*coating* en anglais). Enfin l'aimant est magnétisé et testé.

v. Recyclage des aimants Nd-Fe-B en fin de vie

L'approvisionnement mondial en terres rares, et donc en néodyme, reste très largement dominé par l'extraction, puisque le recyclage des terres rares était estimé inférieur à 1% en 2011 (Graedel, Allwood, Birat, Buchert, Hagelüken, Reck, Sibley, Sonnemann, et al., 2011). Ainsi, les produits en fin de vie en Europe sont dilués dans dans la filière de l'acier ou finissent en décharge, avec 676 tonnes de néodyme perdu en 2010 (Guyonnet et al., 2015).

L'étude de cas se concentre sur la production chinoise de terres rares, représentant la majeure partie de la production mondiale. De plus, l'étude de la chaîne de valeur ne prendra en considération que la production d'aimants Nd-Fe-B frittés, et non la fabrication d'aimants liés. De fait, il s'agit du type d'aimant Nd-Fe-B le plus courant. De plus, ces aimants ayant une haute performance par rapport aux aimants liés, ils sont plus utilisés dans les applications les plus importantes en termes de masse comme l'automobile et les éoliennes (Eriksson & Olsson, 2011). Or, il a été vu dans ce chapitre que les applications permettant de contribuer à la réduction de la production mondiale des gaz à effet de serre comme les voitures électriques et les éoliennes constituaient un point d'intérêt particulier

pour la thèse, afin d'étudier la potentialité de transfert des impacts du changement climatique vers d'autres impacts.

1.3.2. Définition du périmètre considéré en termes d'étapes

L'analyse se concentre sur les étapes les plus impactées par la question de l'épuisement. Ainsi, l'évaluation des coûts sociaux se concentre particulièrement sur l'extrême amont : les 4 étapes de la production des aimants frittés représentés sur la Figure 32 : étape minière et minéralurgique, étape de traitement jusqu'à obtention des oxydes de terres rares (OTR) individuelles, étape d'affinage permettant d'obtenir des terres rares (TR) métalliques individuelles ou en alliage, et enfin fabrication des aimants frittés Nd-Fe-B. Et sur l'extrême aval, c'est-à-dire la gestion des aimants en fin de vie. Ce périmètre fait donc l'impasse sur les étapes de transports, de stockage des aimants, d'incorporation dans les applications, et d'utilisation. Le choix de ces étapes est dû principalement à la volonté d'étudier l'impact des dynamiques d'épuisement sur les enjeux sociaux et environnementaux de la chaîne de valeur du néodyme. Pour rappel (paragraphe 3.2.3. du chapitre 1) l'épuisement des ressources est défini dans la thèse comme « la perte de quantité (perte de matière tout au long de la filière) et de qualité (diminution des teneurs du gisement et difficultés du recyclage) de la ressource au fur et à mesure de son utilisation ». Or, d'une part, les pertes de matières en néodyme ont lieu principalement lors des 4 étapes de la production des aimants frittés représentés sur la Figure 32 et dans la gestion des déchets en fin de vie (quasi-absence de recyclage). Et d'autre part, en ce qui concerne la diminution de la qualité de la ressource : la diminution des teneurs n'a pas d'impacts au-delà de l'étape de concentration du minerai, et la complexification des ressources secondaires impacte la gestion des aimants en fin de vie.

1.3.3. Les principaux acteurs de la chaîne de valeur du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B et leur ancrage géographique

Ce paragraphe présente une synthèse bibliographique des acteurs impliqués dans la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B depuis les mines de terres rares chinoises jusqu'à la fabrication et le recyclage des aimants. Cette synthèse permet d'étayer le choix des entretiens réalisés en 2016. Et les apports des entretiens en termes de compréhension de la chaine de valeurs présentés dans le paragraphe 1.4 permettront de mettre en perspective cette description, ainsi que d'établir les liens entre ces acteurs.

i. Les producteurs miniers et métallurgiques de terres rares

Dans ce paragraphe, sont évoqués les acteurs de la production des terres rares lors des étapes minière, de traitement chimique, de séparation et d'affinage (les trois premières étapes de la Figure 32). La production des terres rares est concentrée en Chine (87% de la production minière mondiale en 2014 comme cela a déjà été souligné) (Jewell & Kimball, 2015) et c'est pourquoi ce paragraphe se concentrera sur les acteurs chinois de la production de terres rares. Cette production a subi une restructuration importante depuis 2014 qui se poursuit encore actuellement. En effet, la Chine souhaite avoir un meilleur contrôle sur la gestion de ses ressources naturelles. En janvier 2014, le MIIT a lancé un programme de consolidation du secteur des terres rares avec la formation de 6 consortiums formés par des entreprises d'état (*state owned enterprises*, SoE) chargés de produire et de traiter les terres rares (BRGM, 2015, p. 160). Ces 6 consortiums regroupent les différents acteurs (mines, fonderies, séparation, et parfois industries aval) des terres rares par région (voir Tableau 26). En 2015, d'après le MIIT ces 6 consortiums regroupaient environ 75% des mines et presque 60% des activités de fonderie et de séparation du pays (BRGM, 2015). Le regroupement le plus rapide a été celui de China Northern Rare Earth Group, l'exploitant du gisement de Baiyun Ebo, dont les activités étaient déjà historiquement les plus concentrées. L'extraction de ce gisement représente environ 60% de la production chinoise, faisant de China Northern Rare Earth Group Hi-Tech Co., Ltd le premier acteur à l'échelle mondiale (BRGM, 2015, p. 160). Le processus ne semble pas actuellement entièrement terminé puisqu'il subsiste encore des problèmes d'exploitations privées illégales dans le sud de la Chine (MIIT, 2019). Ce programme a pour ambition de mettre en place un modèle d'« unification en 5 points », à savoir "planification unifiée, extraction unifiée, tarification unifiée, approvisionnement unifié et distribution unifiée".

Tableau 26 : Récapitulatif simplifié des restructurations en cours des entreprises du secteur des Terres Rares en Chine. Source : BRGM, 2015; MIIT, 2019; Prassas, 2018

Nouveaux consortiums	Groupe parent	Provinces d'implantation
China Northern Rare Earth Group	Précédemment (Inner Mongolia Baotou Steel Rare-Earth Hi-Tech Co Ltd), Filiale de Baotou Iron and Steel Group (Baogang rare Earth, Baotou Qianyuan Dacheng Rare Earth Alloy Co., Ltd. Etc,	Mongolie intérieure, Gansu
Chinalco Rare Earth & Metals Co Ltd	Chalco	Guangxi, Jiangsu, Sichuan, Shandong
China Southern Rare Earth Group Co., Ltd.	Ganzhou Rare Earth, Jiangxi Copper Group, Jiangxi Rare Earth And Rare Metals Tungsten Group	Jiangxi, Sichuan
Guangdong Rare Earth Industry Group Co., Ltd.	Guangdong Rising Nonferrous Metals Group Co Ltd	Guangdong
China Minmetals Rare Earth Co., Ltd.	China Minmetals Corporation	Guangdong, Jiangxi, Hunan, Yunnan, Fujian, Guangxi
Xiamen Tungsten Co., Ltd (XTC)		Fujian

La Figure 34 fait état de la configuration de la production avant la création des 6 consortiums. Le paragraphe 1.4 apporte des éclairages sur la configuration de la chaîne de valeur des aimants depuis la création des consortiums.

Principales étapes	Exploitation minière et concentration	Extraction des composés de TR	Séparation des TR	Fabrication des alliages magnétiques	Aimants Nd-Fe-B
Principaux acteurs par région	**Chine** Bayan Obo (bastn./monaz.) SE Chine (argiles ioniques) Sichuan (bastnaésite) Etc. **Etats-Unis** Molycorp **Australie** Lynas **Inde** Indian Rare Earth **Russie** Solikamsk (loparite)	**Chine** Baotou rare earth Mianning Fanxing Mianning Beida Etc. **Etats-Unis** Molycorp **Australie** Lynas **Inde** Indian Rare Earth	**Chine** Baotou rare earth Molycorp Liyang Rhodia Mianning founder China RE holding >100 petites sociétés **Etats-Unis** Molycorp **Europe** Solvay/Rhodia Silmet Treibacher **Japon** Shin Etsu Mitsui Mining & Smelting Quelques autres sociétés	**Chine** Baotou rare earth Molycorp (Neo) Jingxi Magnetism Ningbo Yunsheng Shanghai Roco Ganzhou Qiangdong Grirem Advanced Material 50-100 petites sociétés **Europe** Less Common Metals Vacuumschmelze **Japon** Shin Etsu Santoku Showa Denko Hitachi Metals Chuden Rare Earth **Vietnam** Santoku Shin Etsu	**Chine** Beijing Zhongka San Huan Advanced Technol.& Materials Ningbo Yunsheng Jingxi Magnetism Shanghai Roco Shanxi Huiqiang Magnets Hengdan Group Magnetics Ningbo Zhao Bao Molycorp (Neo) >50 petites sociétés **Japon** Shin Etsu Santoku Hitachi Metal Daido Electronics TDK-Hitachi Metal JV **Thaïlande** Molycorp (Neo) **Etats-Unis** Arnold Magnetics **Europe**
Etat du produit	**Concentré à 30%-70% d'OTR**	**Chlorures ou carbonates de terres rares à 90% OTR**	**Terres rares individuelles (> ou= 99%OTR)**	**Obtention des alliages pour aimants Nd-Fe-B**	**Aimants néodyme-fer-bore**

Figure 34 : La chaine de valeur des Terres Rares de l'extraction à la fabrication d'aimants permanents, avec les principales sociétés impliquées en 2012. Source : BRGM, 2015, fig. 55

ii. Les fabricants d'aimants Nd-Fe-B

En 1998, 90% de la production mondiale d'aimants permanents avait lieu aux États-Unis, en Europe et au Japon. Le Japon fabriquait environ 70 à 80 % des aimants frittés. En 1996, la production chinoise était d'environ 2 600 tonnes. En 2006, elle était passée à 39 000 tonnes, en 2010, à 82 600 tonnes (dont 78 000 tonnes d'aimants Nd-Fe-B frittés et 4 000 tonnes d'aimants Nd-Fe-B liés) (BRGM, 2015, p. 169-171). En 2015, la production chinoise avait atteint plus de 130 000 tonnes d'après Beijing Zhong Ke San Huan (Bo-Ping, 2016). Soit une croissance annuelle pour les aimants frittés d'environ 12% par an de 2005 à 2015, contre 4,5% par an pour le Japon et – 0,8% par an pour l'Europe (Bo-Ping, 2016).

Cette croissance a concentré la production mondiale à 88% en Chine pour les aimants frittés Nd-Fe-B en 2015, avec 126 300 tonnes d'aimants (Bo-Ping, 2016), le Japon étant à 11%. Et 75% de la production d'aimants liés avec 4000 tonnes d'aimants produits (Bo-Ping, 2016) et le Japon 10%.

La Figure 35 montre que malgré l'augmentation fulgurante de la production chinoise l'écart se creuse moins vite d'un point de vue de la valeur des échanges entre la Chine et le Japon.

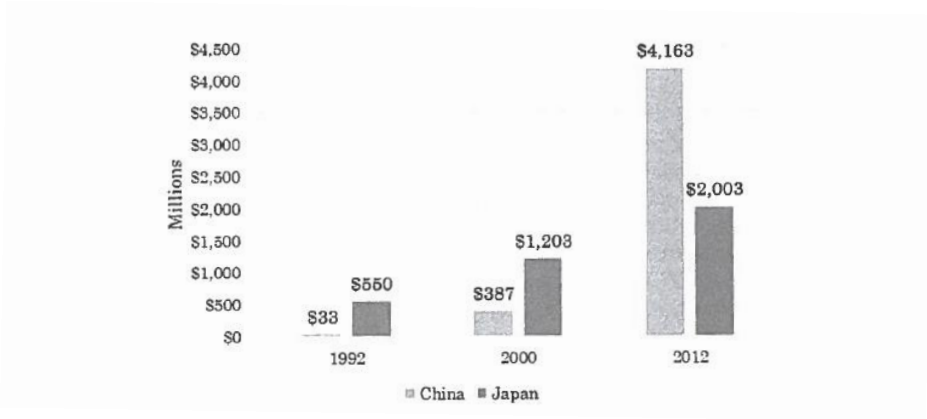


Figure 35 : Comparaison en valeur des exports chinois et japonais d'aimants électromagnétiques et permanents ainsi que des films d'aimants en néodyme, d'autre alliages à base de néodyme et des ferroalliages contenant des terres rares. Source : Lima & Filho, 2015, p. 28

D'après Beijing Zhong Ke San Huan (Bo-Ping, 2016), il y aurait plus de 170 sites de production d'aimants frittés Nd-Fe-B en Chine avec une capacité totale excédant 300 000 tonnes par an. Les capacités de production excédant 3000 tonnes par an représenteraient environ 10% des sites de production (soit 5 producteurs d'après le Tableau 27) , les capacités entre 1000 et 3000 tonnes par an représenterait 30% des producteurs et les petits producteurs avec une capacité de 500 à 1000 tonnes par an représenterait 60% de la production chinoise (Bo-Ping, 2016).

Les fabricants d'aimants en Chine sont donc nombreux et de taille variée. Les sites de production sont « surtout concentrés à Beijing, Ningbo [et dans la province] du Shanxi » (BRGM, 2015, p. 169-171). Les principaux fabricants d'aimants chinois en 2012 selon le BRGM sont regroupés dans le Tableau 27. La plupart des fabricants chinois d'aimants Nd-Fe-B ont leur production localisée en Chine (Eriksson & Olsson, 2011, p. 35). Les noms de ces producteurs ont été actualisés pour faciliter la lecture.

Une estimation de la capacité annuelle de production des fabricants d'aimants est également donnée, constituant un ordre de grandeur, sachant que ces données sont issues la plupart du temps d'auto-déclarations de la part des producteurs. Un article s'intéressant à la résilience dans les chaînes de valeur des aimants Nd-Fe-B (Sprecher et al., 2016) corrèle cependant les ordres de grandeur évoqués dans le Tableau 27 concernant les capacités de production : pour Sprecher et al., Beijing Zhong Ke San Huan High-Tech est le plus gros fabricant d'aimants avec une capacité de production de 13 500 tonnes par an et les autres producteurs sont autour de 7 000 tonnes. Seuls Shanghai ROCO et Shanxi Huiqiang Magnets semblent bien en-dessous de cette capacité de production. Pour Hengdian Group DMEGC Magnetics Co.Ltd, il n'a pas été possible de trouver une estimation de la capacité de production des aimants Nd-Fe-B.

Tableau 27 : Principaux producteurs chinois d'aimants Nd-Fe-B en 2012

Principaux producteurs en 2012		Capacité annuelle de production (en tonnes)		Licences Hitachi
Noms actuels	(BRGM, 2015, fig. 55)	**Capacité**	**Source**	**(d'après Bo-Ping, 2016)**
Beijing Zhong Ke San Huan High-Tech Co Ltd,	Beijing Zhongka San Huan	13 500	(Sprecher et al., 2016)	oui
Ningbo Yunsheng Co., Ltd.	Ningbo Yunsheng	8 000	(Ningbo Yunsheng, 2018)	oui
Jingci Material Science Co., Ltd.	Jingxi Magnetism	> 6 000	(Jingci Material Science Co.,Ltd, 2019)	oui
Shanghai ROCO Magnetics Co.,Ltd.	Shanghai roco	> 600	(Shanghai ROCO Magnetics Co.,Ltd., 2013)	nd.
Shanxi Huiqiang Magnets Co. Ltd.	Shanxi Huiqiang Magnets	1 500	(Shanxi Huiqiang Magnets, 2016)	nd.
Hengdian Group DMEGC Magnetics Co.,Ltd.	Hengdian Group Magnetics	nd.	nd.	nd.
Ningbo Zhao Bao Magnet Co.,Ltd.	Ningbo Zhao Bao	5 000	(Ningbo Zhaobao Magnet, 2015)	nd.
Magnequench (Tianjin) Company Limited (Neo)	Molycorp (Neo)	8 000	(Nishizu, 2018)	nd.

Les fabricants d'aimants chinois ont récemment augmenté leurs investissements dans la production d'aimants Nd-Fe-B à haute performance (Research and Markets, 2018). Ainsi, le principal producteur chinois (et mondial) Beijing Zhong Ke San Huan High-Tech a mis en place en juin 2015 une joint-venture pour la fabrication d'aimants Nd-Fe-B haute performance avec Hitachi Metals, principal producteur japonais, dont Beijing Zhong Ke San Huan High-Tech détient 51% des parts (Research and Markets, 2018). Cette usine se situe à Nantong. Cette collaboration a pour but pour Hitachi d'assurer l'approvisionnement en terres rares, et pour Beijing Zhong Ke San Huan High-Tech de monter en gamme sur la qualité des aimants produits. Le projet devrait permettre à Beijing Zhong Ke San Huan High-Tech de faire monter sa capacité de production annuelle à 18 000 tonnes et de rester le premier fabricant d'aimants (Research and Markets, 2018).

Après la Chine, le Japon est le deuxième producteur mondiale d'aimants Nd-Fe-B (BRGM, 2015, p. 169-171), et était le principal producteur et exportateur d'alliage Nd-Fe-B (Hurst, 2011). Les fabricants d'aimants japonais ont des installations de production dispersées en Asie (Eriksson & Olsson, 2011, p. 35). Les principaux fabricants d'aimants présents au Japon sont : Hitachi Metals, Shin-Etsu Chemical Co., Santoku, Daido Steel Co.Ltd., TDK-Hitachi Metal JV (BRGM, 2015, fig. 55). Certains acteurs se spécialisent dans des produits intermédiaires pour la fabrication d'aimants liés comme Sumitomo Metal Mining Co., Ltd.

Hitachi Metals est le premier fabricant japonais d'aimants Nd-Fe-B avec une capacité de production de 4000 tonnes par an (BRGM, 2015). C'est la première entreprise mondiale en termes de brevets pour les aimants permanents avec plus de 600 brevets (BRGM, 2015). Avec la fusion d'Hitachi Metals et de NEOMAX en 2007, Hitachi est devenu le successeur du portefeuille de brevets de NEOMAX couvrant les matériaux magnétiques Nd-Fe-B (Magnequench, 2010), dont le brevet le plus important

est le brevet US patent 5 645 651 (Kooroshy et al., 2015). C'est un brevet de base couvrant la composition et les propriétés matérielles essentielles des aimants Nd-Fe-B (Magnequench, 2010). Ce brevet a expiré en juillet 2014 et, en août 2014, plusieurs sociétés chinoises se sont regroupées pour engager une action en justice aux États-Unis contre Hitachi, pour obtenir une extension de ce brevet clé (Eriksson & Olsson, 2011, p. 35). Des fabricants d'aimants du monde entier ont un accord avec Hitachi pour utiliser ce brevet (Kooroshy et al., 2015). Il s'agit principalement de producteurs chinois et du sud-ouest de l'Asie (Eriksson & Olsson, 2011, p. 35). Mais cela concerne également des producteurs européens d'aimants Nd-Fe-B, tels que Vacuumschmelze, Morgan Crucible Company et Neorem, Magnetfabik Schrambach (Kooroshy et al., 2015). En 2017, l'entreprise Hitachi réalisait un bénéfice de 99,8 milliards de yens sur les aimants (ferrites et Nd-Fe-B) dont 65% dans l'automobile (véhicule électrique et hybride et systèmes de direction assistée et équipement *ESP), 21% dans les infrastructures industrielles, et 14% dans les produits électriques* et électroniques (Akada, 2017). Elle détient une usine à Narita en joint-venture avec TDK Corporation (BRGM, 2015, p. 169-171) et a annoncé son intention de créer une joint-venture avec le fabricant d'aimants chinois Zhong Ke San Huan en 2015 (Hitachi Metals, Ltd., 2015) pour produire des aimants NEOMAX.

En dehors de cette entreprise japonaise ayant un rôle primordial en termes de propriété industrielle, sont décrites ici rapidement les autres sociétés productrices d'aimants Nd-Fe-B. Shin-Etsu Chemical Co., Ltd. est une des principales entreprises chimiques du Japon et le deuxième producteur japonais d'aimants permanents, doté d'une usine de terres rares à Takefu dans la préfecture de Fukui (au nord de Kyoto) (BRGM, 2015), mais aussi en Malaisie, aux Philipines et dans l'île indonésienne de Batam (Eriksson & Olsson, 2011, p. 35). Shin-Etsu était également impliqué dans le montage de l'usine de chlorure de Terres Rares en Inde, projet mené par le groupe Toyota pour assurer son approvisionnement. L'entreprise est autorisée à utiliser des brevets d'Hitachi (Eriksson & Olsson, 2011, p. 35). Santoku produit des alliages pour aimants permanents Sm-Co et Nd-Fe-B et possède une usine à Baotou (BRGM, 2015). Daido Electronics Co., Ltd. (les ventes sont passées de Daido Steel à Daido Electronics en 2000) produit au Japon, en Chine et en Thaïlande des aimants liés contenant des terres rares, des aimants Nd-Fe-B et d'autres applications liées aux aimants (Daido Electronics Co., Ltd., 2016). TDK Corporation a une usine de production à Narita au Japon, ainsi qu'à Hong Kong et en Thaïlande (Eriksson & Olsson, 2011, p. 35).

Il y a très peu de production d'aimants Nd-Fe-B en dehors de la Chine et du Japon et il n'y en avait pas ou peu sur le continent américain jusqu'à récemment (Eriksson & Olsson, 2011, p. 35). Pour les États-Unis, deux sociétés peuvent cependant être citées. Neo est le principal producteur mondial de poudres magnétiques pour la production d'aimants Nd-Fe-B liés et déformés à chaud avec un site de production en Chine et un en Thaïlande (BRGM, 2015; Neo, 2018). Les activités de Neo sont organisées en trois secteurs opérationnels, dont un des secteurs correspond à l'ancienne société Magnequench fondée en 1986, à l'origine des aimants Nd-Fe-B (BRGM, 2015; Neo, 2018). Cette société avait été rachetée dans un premier temps en 2012 par Molycorp (BRGM, 2015), avant la faillite de cette société évoquée au paragraphe 1.2.4. Neo est actuellement la seule société non chinoise détenant une licence permettant de séparer les terres rares en Chine (Neo, 2018). Elle effectue du stockage de terres rares en Chine afin d'amortir les chocs de variations de prix, et travaille à avoir une partie de la chaîne intégrée : l'usine de Thaïlande s'approvisionne en partie auprès de l'usine estonienne NPM Silmet (anciennement Molycorp Silmet AS) appartenant à Neo qui produit de l'oxyde de néodyme (Neo, 2018) à hauteur d'environ 220 tonnes de néodyme pour des applications magnétiques en 2010 (Guyonnet et al., 2015). Cependant, comme vu au paragraphe précédent, l'oxyde doit encore être réduit et pour cela l'entreprise fait appel à une entreprise thaïlandaise (GQD Special Material), dont elle est propriétaire à 20%. Enfin, Electron Energy Corporation détient deux usines produisant des aimants, dont des aimants Nd-Fe-B (BRGM, 2015), dont une partie est à destination de l'armée américaine et des entreprises aérospatiales.

En Europe, en termes de volume, «il n'existe pas d'activité significative de transformation et de fabrication des terres rares dans l'UE [Union Européenne] » (Deloitte, BGS, BRGM, & TNO, 2017), c'est pourquoi la majorité des aimants Nd-Fe-B utilisés en Europe sont importés, parfois de manière

intégrée dans des produits finis ou semi-finis. Cela reflète la consommation de l'UE des terres rares en général qui « provient [en grande partie] de produits finis […] (aimants, alliages, disques durs, ordinateurs portables, véhicules électriques ou hybrides, etc.) » (Deloitte et al., 2017). En comptant les terres rares intégrées dans des produits finis, les trois principaux pays « fournisseurs de terres rares de l'UE sont la Chine (40%), les États-Unis (34%) et la Russie (25%). Ces trois pays représentent environ 99% des importations de terres rares de l'UE (environ 8 000 tonnes) » (Deloitte et al., 2017).

Cependant, il existe quelques producteurs d'aimants en Europe (Eriksson & Olsson, 2011, p. 35) avec une production estimée à 1 500 tonnes en 2010 (Guyonnet et al., 2015). D'après l'article de Guyonnet et al. (Chagnes, Cote, Ekberg, Nilsson, & Retegan, 2016, Chapitre 2) Vacuumschmelze GmbH & Co. KG (VAC), une société allemande, serait la seule entreprise européenne à fabriquer « réellement » les aimants en Europe. Vacuumschmelze GmbH & Co. KG (VAC) est le premier producteur européen. VAC appartient à la compagnie américaine VECTRA (anciennement OM Group Inc.) depuis 2011 (BRGM, 2015). Elle a cinq usines de productions implantées en Allemagne, Finlande (Neorem Magnets Oy), Slovaquie, Malaisie et une en Chine dont l'opérateur est une joint-venture entre VAC et Zhong Ke San Huan (BRGM, 2015). Les aimants permanents représentent environ 30% des ventes de VAC (VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG, 2018) incluant la production des aimants permanents Nd-Fe-B sous brevet Hitachi (BRGM, 2015). En Allemagne, les entreprises MS-Schramberg GmbH & Co. KG sous brevet Hitachi (BRGM, 2015; Eriksson & Olsson, 2011, p. 35) et Magnetfabrik Bonn, qui compte parmi ses clients Bosh, Opel, Mitsuba, Valeo (BRGM, 2015) produisent également des aimants Nd-Fe-B. En France, le BRGM souligne que de nombreuses PME et TPE françaises sont spécialisées dans la fabrication et la vente d'aimants permanents (Euromag, First Magnetic France, Emile Maurin, etc.) (BRGM, 2015, p. 176). Dans le reste de l'Europe peuvent être citées : Magneti Ljubljana, d.d., entreprise slovène produisant notamment des aimants frittés Nd-Fe-B (clients : General Electric, Bosch, Schneider Electric, Alstom, etc.) (BRGM, 2015) et Arnold Magnetic Technologies ayant une production aux États-Unis, au Royaume Uni, en Suisse et en Chine (BRGM, 2015).

iii. Les recycleurs

En l'absence de recyclage à grande échelle, les acteurs du recyclage des aimants évoqués sont donc pour beaucoup des acteurs développant des initiatives pour le recyclage des aimants et non des recycleurs d'aimants à l'échelle industrielle.

En Europe, Solvay (anciennement Rhodia) envisageait en 2014 une production par recyclage de 5 000 tonnes par an de terres rares à partir des poudres luminophores des ampoules fluocompactes. Le procédé pour récupérer les terres rares des aimants permanents (Pr, Nd, Dy) serait très similaire (BRGM, 2015).

Au Japon, le Ministère de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie (METI) et le Ministère de l'Education, de la Culture, des Sports, des Sciences et de la Technologie (MEXT) ont lancé la stratégie des éléments en 2007 (*Genso Senryaku*) pour garantir l'approvisionnement des entreprises du pays en matières premières critiques[92], notamment en néodyme et dysprosium. Cette politique est mise en œuvre depuis 2007 via des agences de financement qui appuient, notamment la recherche et le développement de technologies de recyclage concernant les terres rares (Feuardant, 2016). Les acteurs industriels sont donc plus avancés sur le recyclage des aimants et des compagnies comme

[92] La méthodologie pour désigner des matières premières comme critiques (bien que ce terme ne soit pas directement employé) utilisée par le Japon (NEDO, 2009) diffère de celle de l'Union Européenne définie dans le Tableau 6 du chapitre 1. Elle se découpe en : risque d'approvisionnement (temps d'épuisement, concentration des réserves, concentration de la production minière, concentration des partenaires commerciaux importateurs), risque prix (changement de prix, variation de prix), risque demande (changement de production minière, croissance de la demande domestique générale et pour des usages spécifiques), restriction du recyclage (stockages et recyclabilité), risques potentielles (possibilité de restriction d'usage) (Hatayama & Tahara, 2014). La liste établie par le NEDO sur 39 métaux mineurs étudiés en ciblait 14 : Cr, Mn, Co, Ni, Nb, Mo, Rh, Pd, In, Nd, Dy, Ta, W, Pt (Hatayama & Tahara, 2014).

Toyota, Honda, Hitachi et Mitsubishi ont annoncé la mise en place d'initiatives de recyclage, se donnant pour objectif de satisfaire au moins 10% de leur consommation en terres rares avec des matériaux recyclés (Akahori et al., 2014; Golev et al., 2014 in Navarro & Zhao, 2014). Il existe 16 centres de recyclage au Japon pour le traitement des équipements électroniques en fin de vie appartenant à Hitachi, Mitsubishi Electric, Sony et Sharp (Feuardant, 2016). Plusieurs sociétés développent cette activité de recyclage des aimants : Hitachi, Santoku, Shin-Etsu, Showa denko, Mitsubishi Materials (BRGM, 2015).

Hitachi a été sélectionné par le METI pour travailler sur le recyclage des métaux critiques et à développer une stratégie de récupération de ces métaux dans les appareils électroniques, notamment pour les aimants permanents (Feuardant, 2016). Sur les 16 centres de recyclage évoqués précédemment, 3 appartiennent à Hitachi, seule entreprise à avoir développé une technologie pour récupérer les aimants des disques durs (Feuardant, 2016). Le principal centre de recyclage du groupe est géré par la filiale d'Hitachi, *Tokyo Eco Recycle*. D'après l'ambassade de France au Japon (Feuardant, 2016) le procédé utilisé pourrait recycler jusqu'à 4 kg d'aimants par jour. Ce procédé a été développé avec un laboratoire de l'Université de Tokyo (BRGM, 2015) : grenaillage au sable, puis plongée des aimants dans un bain de magnésium fondu (un procédé breveté Hitachi) pour récupérer néodyme, praséodyme, et dysprosium. Dans les tests à l'échelle industrielle sont récupérés 61% des terres rares présentes dans les aimants avec une pureté de 81% (Feuardant, 2016). Le recyclage des seuls aimants n'était pas rentable en 2016 en raison du prix bas des terres rares (Feuardant, 2016). Contrairement aux procédés d'extraction par solvant, comme celui utilisé par Solvay, le procédé utilisant un bain de magnésium fondu présente l'avantage de générer moins d'effluents liquides nécessitant un traitement par la suite (BRGM, 2015).

D'après le BRGM (BRGM, 2015) Santoku Corporation réaliserait depuis 2012, par dissolution sélective à l'acide chlorhydrique suivie d'extractions par solvant, le recyclage du néodyme et du dysprosium contenus dans les aimants de moteurs d'équipements électriques comme les climatiseurs et dans les déchets de production. La société Shin-Etsu Chemical Co. dispose d'une usine pour récupérer les terres rares à partir de ses chutes de production et envisage d'étendre ses activités au recyclage des aimants permanents des équipements en fin de vie (BRGM, 2015). La société a annoncé la construction d'une usine au Vietnam pour le recyclage des terres rares dans les aimants notamment des véhicules hybrides, des disques durs d'ordinateurs, et des compresseurs de climatiseurs (BRGM, 2015). L'entreprise Showa Denko Rare-Earth Vietnam Co., Ltd., une filiale de SDK, a construit au Vietnam en 2010 une usine de recyclage du dysprosium et d'un alliage de néodyme et de praséodyme (BRGM, 2015) avec une capacité de production de 800 tonnes de terres rares par an (Ferron & Henry, 2015).

Mitsubishi Materials Corp. en partenariat avec Panasonic Corp. et Sharp Corp souhaite récupérer du néodyme et du dysprosium contenus dans les machines à laver, les climatiseurs (BRGM, 2015) et les compresseurs de réfrigérateurs (Feuardant, 2016). Dans son centre de recyclage *Green Cycle Systems* (Feuardant, 2016) Mitsubishi a développé un équipement pour démanteler ces équipements et récupérer ces aimants (Ferron & Henry, 2015).

Il a donc été vu dans ce paragraphe que l'ensemble des acteurs miniers et métallurgiques dans le secteur des terres rares en Chine (et donc dans le monde) étaient représentés par 6 consortiums depuis 2014. Les acteurs de la fabrication d'aimants sont principalement situés en Chine et au Japon. Les fabricants d'aimants chinois sont beaucoup plus nombreux que les consortiums, avec des centaines de sites de production, bien que l'étude ait souligné 8 producteurs chinois principaux. Le Japon a une production plus concentrée d'aimants à haute valeur ajoutée avec 5 acteurs qui dominent la production. En termes de recyclage d'aimants Nd-Fe-B, la littérature n'a pas permi d'identifier d'acteurs chinois dans ce domaine et en Europe, seul Solvay avait mis en place des projets industriels de recyclage des terres rares, mais ne concernant pas les aimants. Les seuls acteurs identifiés du recyclage sont 5 acteurs japonais, grâce à une politique volontariste du gouvernement de mise en place du recyclage.

1.4. Structure la chaîne globale de valeur du néodyme dans les aimants Nd-F-B en Chine et au Japon, éclairage des entretiens

Les acteurs impliqués dans la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B depuis les mines de terres rares chinoises en passant par la fabrication des aimants en Chine et au Japon et jusqu' au recyclage des aimants au Japon ont été identifiés dans le paragraphe précédent. Il s'agit ici de comprendre le fonctionnement de la chaîne de valeur, de préciser les liens entre les acteurs et la gouvernance de la chaîne afin de souligner les caractéristiques clefs de la chaîne globale de valeur susceptibles d'influencer les dynamiques d'épuisement et de création de coûts sociaux au sein de la chaîne. Ce paragraphe discute des liens entre les acteurs de la chaîne globale de valeur du néodyme dans les aimants Nd-F-B en Chine en se basant sur les entretiens réalisés avec les acteurs en 2016. Pour cela la méthodologie des entretiens est présentée, ainsi que la place des différents acteurs de la chaîne rencontrés en 2016. Puis les apports des entretiens en termes de compréhension de la chaine de valeurs et des dynamiques d'épuisement sont présentés avec un premier focus sur les liens des fabricants d'aimants avec les acteurs en amont, un deuxième focus sur les liens des fabricants d'aimants avec leurs acheteurs et enfin l'organisation du recyclage dans cette chaîne.

1.4.1. Précision de la question de recherche dans le cadre de l'analyse CGV et méthodologie d'entretien

L'enquête de terrain menée dans le cadre de cette thèse en 2016 avait tout d'abord pour objectif d'investiguer les liens entre épuisement, impacts sociaux et environnementaux et la gouvernance de la chaîne globale de valeur. Pour cela il aurait fallu que les impacts sociaux et sanitaires de la production d'aimants Nd-Fe-B, sur lesquels il n'existe quasiment aucune littérature académique puissent être documentés par l'enquête de terrain. Cependant, s'il est possible d'obtenir de la documentation (articles académiques, mais aussi entretiens) sur les impacts environnementaux de la production, il est très difficile d'obtenir des entretiens sur les conditions de travail avec des employés de l'industrie, sur les impacts sanitaires avec des professionnels de santé, ou sur la contestation environnementale avec la population locale. Les premiers entretiens en Chine avec des acteurs extérieurs à la filière (chercheurs et journalistes travaillant sur les impacts sociaux de la production) ont souligné la difficulté, voire le caractère dangereux pour les personnes interrogées de tels entretiens (Entretiens 4, 5, et 6, 2016). Ils ont souligné le contexte général en 2016 qui était au renforcement du contrôle des ONG et des associations environnementales, liée à la peur du gouvernement chinois d'une prise d'ampleur des contestations sociales. Ce contexte général, se superpose au cas particulier du secteur des terres rares, secteur stratégique pour la Chine, avec notamment le dossier des quotas qui a été perdu à l'OMC par la Chine, face à la difficulté de prouver la mise en place effective de mesures environnementales. Ce qui rend la recherche sur les impacts environnementaux, sociaux et sanitaires des terres rares en Chine d'autant plus difficile à aborder. Le seul entretien qui avait réussi à être organisé avec des acteurs de la contestation locale à Baotou a été annulé à l'initiative des personnes devant être interrogées, le contexte étant considéré comme trop dangereux pour mener les entretiens (arrestations d'éleveurs mongols luttant contre l'extension des projets miniers). Les entretiens ont donc eu lieu très majoritairement avec des acteurs industriels de la chaîne de valeur, marginalement avec des acteurs extérieurs à l'industrie des terres rares et pas du tout avec des parties prenantes non industrielles de la filière des terres rares. La problématique de l'épuisement, déjà identifiée comme une problématique centrale des enjeux sociaux et environnementaux du secteur extractif et comme un démultiplicateur des coûts sociaux (voir chapitre 1), est donc la seule problématique qui a pu être mise en lien avec l'organisation de la chaîne de valeur auprès des acteurs interrogés. Les entretiens ont conduit à identifier le lien entre l'organisation de la chaîne de valeur et l'épuisement, notamment à travers les pertes importantes liées au processus de production (les « déséconomies d'échelle ») comme un sujet clef et à recentrer l'analyse sur cet enjeu intermédiaire.

Il a été vu dans le chapitre 1 que l'augmentation de la production, les pertes (absence d'efficience), l'absence de recyclage augmentaient l'épuisement. La diminution de la teneur étant un phénomène

inéluctable sur le long terme dans le cadre de l'exploitation des ressources (chapitre 1), ce phénomène ne peut être contrecarré par les acteurs que par une diminution de la production. Les principaux facteurs d'épuisement surlesquels les acteurs ont une influence en termes d'épuisement sont donc : les volumes et la vitesse de production, les pertes de matière le long de la chaîne (l'efficience de la production), la part du secteur informel, et les freins et leviers pour l'utilisation des ressources secondaires (recyclage des produits en fin de vie, recyclage des déchets, meilleure conception des produits). Ce sont donc ces facteurs qui ont été abordés lors des entretiens et mis en lien avec l'organisation de la CGV.

La méthodologie mise en place par (Kaplinsky & Morris, 2001) pour réaliser une analyse de la CGV préconise de commencer l'analyse par la définition d'un « point d'entrée » qui peut être un acteur ou une thématique (Kaplinsky & Morris, 2001), et qui permet de remonter les liens de la chaîne afin de définir le périmètre de l'analyse de la chaîne de valeur étudiée. Le point d'entrée est donc ici le rôle de l'organisation de la CGV dans les dynamiques d'épuisement de la ressource et le point de départ de l'étude de la chaîne a été les fabricants d'aimants Nd-Fe-B.

La question du choix des entretiens découle de la formulation du phénomène à observer. Dit autrement, le choix de l'échantillonnage est relatif à « la question de savoir comment nous choisissons ce que nous observons réellement, choix qui correspond lui-même aux cas que nous avons en tête lorsque nous formulons explicitement nos idées générales » (Becker, 2002). L'objectif de cette analyse CGV est d'observer les effets de l'organisation de la filière sur les volumes produits, l'efficacité de la production (en termes de pertes ou de préservation de la ressource), et les freins et les leviers pour la mise en place du recyclage et de la récupération. Les présupposés issus de la littérature étaient que la production de terres rares en Chine était une production de masse, tirée par la demande en aimants Nd-Fe-B. Une logique d'échantillonnage pourrait donc être d'interroger les plus gros acteurs de la chaîne, notamment les plus grands fabricants d'aimants Nd-Fe-B. Cependant, les entretiens ont été choisis de manière «à maximiser les chances d'apparition d'au moins quelques cas capables de remettre en question ce que nous croyons savoir » (Becker, 2002), c'est-à-dire en interrogeant des acteurs de taille variée et avec différents positionnements dans la chaîne (voir Tableau 28). Le point d'entrée dans la CGV est la production des aimants Nd-Fe-B et le point de vue des producteurs d'aimants est majoritaire dans les entretiens menés.

La synthèse thématique des entretiens est disponible en annexe.

En Chine, les zones choisies pour les entretiens ont été les principales zones de production des terres rares. C'est-à-dire la Mongolie intérieure qui produit environ 50% des terres rares chinoises, puis les provinces du sud-est qui exploitent les argiles ioniques et qui ont une importance stratégique dans la production puisque ce sont les zones les plus riches en terres rares lourdes, notamment en dysprosium composant entrant dans la fabrication des aimants permanents. La thèse a ciblé particulièrement les 3 provinces les plus productrices au sud-est : le Jiangxi (36% de l'exploitation des argiles ioniques), le Guangdong (33%), le Fujian (15%) (Arshi, Vahidi, & Zhao, 2018). Sur les 6 consortiums, seuls deux consortiums ont répondu à nos sollicitations pour des entretiens : China Northern (ou Baogang group) et Xiamen tungsten (XTC).

Tableau 28 : Récapitulatif des entretiens menés pour le cas d'étude

Numéro d'entretien	Organisme	Catégorie d'acteurs	Pays
1	BRGM	Acteurs Externes	France
2	Solvay		Belgique
3	Ambassade de France en Chine (MAEDI)		France
4	City university of Hong Kong		Hong Kong
5	China Labour Bulletin		Hong Kong
8	School of Resources and Environmental Engineering		Chine
11	Baotou Solvay Rare Earth		Chine
21	Doshisha University		Japon
24	Ecosystèmes		France
25	MAEDI		France
26	Entretien anonyme		
27	Entretien anonyme		
10	Xiamen Tungsten (XTC)	Consortium minier	Chine
19	Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth International Trading (China Northern)		Chine
13	Baotou JinMeng Magnetics Material	Fabricant d'aimant intégré	Chine
23	Shin-Etsu Chemical		Japon
22	Tokyo Eco Recycle (Hitachi)	Fabricant d'aimant	Japon
9	Jiangxi YG Magnet		Chine
12	Baotou Jinshan Magnetic Material		Chine
16	Tianhe Magnets		Chine
20	Ningbo Yunsheng		Chine
6	Globalization monitor	ONG	Hong Kong
17	Chinese Society of Rare Earths, CSRE	Pouvoirs Publics	Chine
7	ACFTU		Chine
15	Baotou Research Institute of Rare Earths		Chine
2	Solvay	Séparateur	France
14	Baotou xinyuan rare earth hi-tech and new material		Chine
18	Gansu Rare Earth New Material		Chine

Les personnes interrogées dans l'industrie étaient principalement responsables des ventes, responsables de la production ou directeurs généraux de l'entreprise. Jusqu'à 4 acteurs ont été vus en entretien par organisation. Ces entretiens ont pris la forme d'un échange semi-directif entre la doctorante, la personne interrogée, et parfois une traductrice ou un traducteur lorsque cela était nécessaire en Chine et au Japon. Ces entretiens individuels ont été conduits dans des temps variables allant de rendez-vous d'une heure à des journées entières dédiées à l'échange entre la doctorante et l'organisation actrice de la filière et la rencontre de plusieurs acteurs au sein de l'organisation. Une série de questions ouvertes sur la question des coûts d'exploitation, de la structuration de la chaîne de valeur, des volumes et de la vitesse de production, des pertes de matières le long de la chaîne (l'efficience de la production), de la part du secteur informel, et des freins et leviers pour l'utilisation des ressources secondaires (recyclage des produits en fin de vie, recyclage des déchets, meilleure conception des produits) ont été posées Lors de l'enquête de terrain en juillet 2016 des entretiens ont également été réalisés pour une étude menée sur la chaîne de valeur de l'antimoine. Ces entretiens ont permis d'avoir des informations sur des acteurs également présents dans la chaîne de valeur du néodyme. Deux entretiens sont utilisés pour compléter l'analyse CGV du néodyme. Ces entretiens font l'objet d'un degré d'anonymisation des données supplémentaires, le nom de l'organisation n'est pas donné, pour des raisons de confidentialité.

1.4.2. De la mine à la fabrication d'aimants

Le paragraphe 1.3.1 a présenté la restructuration des acteurs miniers chinois en 6 grands consortiums et les principaux fabricants d'aimants Nd-Fe-B. Sur la base des entretiens, plusieurs types d'organisations peuvent être distingués (Figure 36).

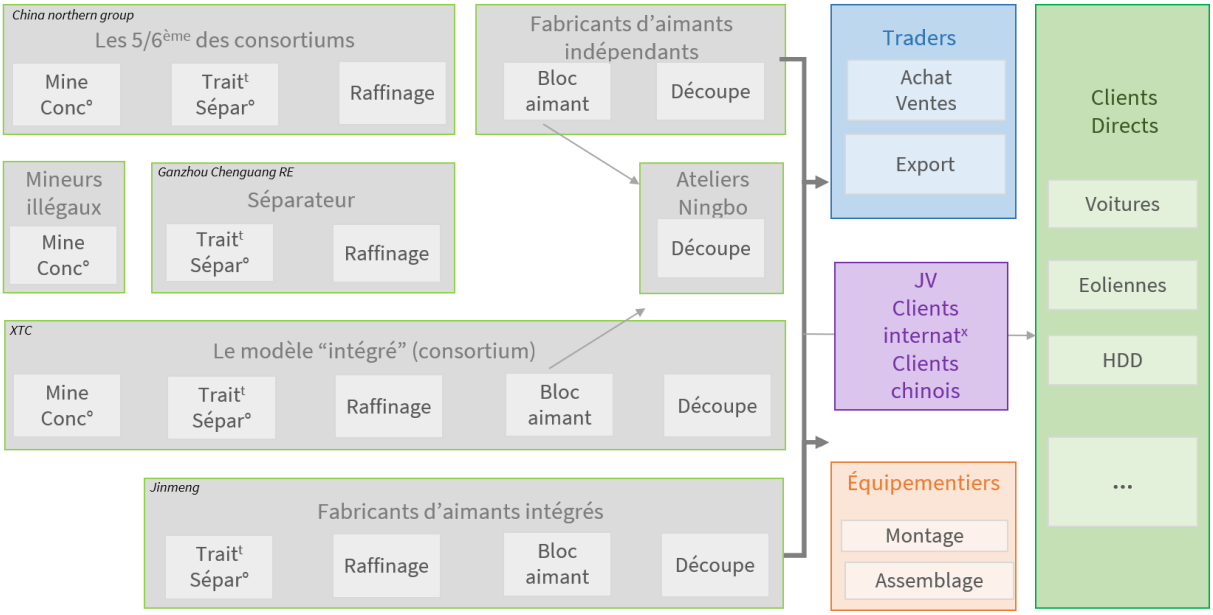


Figure 36 : Organisation industrielle du point de vue des fabricants chinois d'aimants Nd-Fe-B en 2016. Source : autrice, d'après entretiens

Les 5/6èmes des consortiums : les étapes minières et métallurgiques s'organisent bien autour de 6 acteurs. Tous les acteurs des consortiums (à l'exception de XTC) ont pour principales activités les étapes depuis la mine jusqu'à l'affinage des métaux. Ces consortiums vendent leur production à chaque étape sous forme de concentrés (Entretien 18 et 15, 2016), de chlorures et de carbonates de terres rares (Entretien 14, 2016), d'OTR, de terres rares sous forme de métaux et d'alliage servant directement pour la fabrication d'aimants (Entretien 10 et 19, 2016). Le schéma est une

simplification, les consortiums peuvent réaliser d'autres activités, notamment certains consortiums comme China Northern détiennent leurs propres activités de trading (Entretien 19, 2016). Ces consortiums sont interdépendants : les mines du sud ayant été en partie fermées pour lutter contre le secteur informel ou semi-informel, les acteurs au sud de la Chine se voient dans l'obligation d'importer des concentrés de Baiyun Ebo pour maintenir leur activité (Entretien 10, 2016). Les acteurs miniers des autres régions de la Chine sont eux dépendants des producteurs du sud dont les concentrés sont plus riches en terres rares lourdes (Entretien 10 et 19, 2016). Il est aujourd'hui illégal de réaliser les étapes minières en dehors de ces consortiums dont l'actionnaire majoritaire est souvent une province (et non l'état), c'est notamment le cas de China Northern dont la Province autonome de Mongolie intérieure est actionnaire à 39%, la société mère Baotou Iron and Steel Group étant détenue à 70% par la province. Le gouvernement chinois qui voulait imposer un modèle de State-owned Enterprise (SOE) de la production de terres rares doit apparemment composer les vélléités des provinces à garder un certain contôle dans l'organisation de la production. Si le secteur minier est le plus contrôlé pour éviter la fuite des ressources en terres rares via la contrebande, la lutte contre le secteur informel doit nécessairement se faire sur plusieurs maillons de la chaîne pour pouvoir empêcher l'entrée dans la chaîne légale de concentrés de terres rares produits illégalement. C'est pourquoi l'état et les provinces sont également actionnaires majoritaires de l'étape de traitement chimique et de séparation. L'intégration la plus aboutie étant celle de China Northern qui a une activiée minière effective et fait des prises de participations majoritaires auprès de nombreux séparateurs comme JinMeng et Xinyuan (Entretien 13 et 14, 2016). Ces séparateurs achètent leurs concentrés ou des produits issus du traitement chimique en provenance de la mine de Baiyun Ebo en Mongolie intérieure, c'est-à-dire à leur actionnaire China Northern, mais pas uniquement (Entretien 14 et 18, 2016). Les prises de participations étatiques décroissent le long de la chaîne de valeur.

Mineurs illégaux : comme cela a été souligné précédemment le problème de la production minière illégale n'est pas résolu et il subsiste encore des problèmes d'exploitations privées illégales dans le sud de la Chine (MIIT, 2019) (Entretien 11, 2016). D'après les entretiens réalisés la volonté et les actions du gouvernement chinois pour lutter contre l'exploitation illégale sont réels (Entretiens 2, 11, 2016). Notamment, la volonté de mettre fin aux productions minières illégales dans le sud de la Chine a conduit à une augmentation de l'importation de minerai issu de Mongolie intérieure dans les usines du Sud[93] (Entretien 10 et 12, 2016). Ce qui laisse entendre qu'elles constituaient auparavant une partie de leur approvisionnement. De plus, la lutte contre les mines illégales se heurte nécessairement à la volonté de maintenir un niveau de production similaire au niveau national, puisque, comme cela a été souligné précédemment, la production illégale représentait entre 15 % et plus de 40 % de la production chinoise totale (BRGM, 2015, p. 126). Ces difficultés peuvent éventuellement être palliées à court terme par la consommation de stocks précédemment établis, comme le pratique certains séparateurs (Entretien 10 et 13, 2016). A plus long terme, les acteurs rencontrés ont parlé de mise en conformité des mines dans le sud de la Chine (Entretien 27, 2016), ces procédés de rachats importants d'anciennes mines non conformes étant vu par certains acteurs comme une opération financièrement risquée (Entretien 10, 2016). Ces considérations tendent à conforter les études académiques qui montrent que le secteur informel et le secteur formel sont intrinsèquement interconnectés de manière complexe (Phillips, 2011). La politique d'intransigeance du gouvernement face aux mines illégales se heurte donc à la part importante de terres rares, notamment de terres rares lourdes, qui était fournie par ce secteur et à la stratégie d'augmentation massive de la production, notamment de la production d'aimants utilisant ces terres rares lourdes mise en place ces dernières années. Il n'a pas été possible cependant de déterminer via les entretiens, du fait même de la nature de l'économie informelle, la part que ce secteur occupe toujours dans l'approvisionnement, ni les débouchés des mines illégales. La production minière illégale est décrite par les acteurs du secteur des terres rares comme

[93] Ce qui laisse entrevoir la création d'une nouvelle problématique : l'importation de déchets radioactifs dans d'autres provinces que la Mongolie intérieure

débouchant uniquement sur de la contrebande, et notamment la traçabilité et les contrôles de registres des achats mis en place par le gouvernement tendraient à rendre impossible les achats illégaux (Entretien 11, 2016). S'il n'est pas possible de donner de chiffre sur la contrebande, il est certain qu'il existe des liens entre production minière illégale et exportation de concentrés. Mais il est loin d'être certain que les deux phénomènes soient exclusifs l'un de l'autre. Notamment, jusqu'en 2015 tant que les taxes à l'exportation existaient sur les minerais et concentrés, la contrebande avait pour but d'éviter les taxes à l'exportation et pas seulement d'écouler la production illégale, les traders de matières premières internationaux jouant un rôle sur l'organisation de cette contrebande comme cela a été documenté sur d'autres matières premières soumises à la même réglementation en Chine (Entretien 26, 2016).

Les séparateurs indépendants de la production minière : certains séparateurs comme Ganzhou Chenguang Rare Earths New Material Co.,Ltd[94] ont maintenu une activité importante tout en n'étant que minoritairement détenus par des consortiums. Ganzhou Chenguang Rare Earths New Material Co.,Ltd est un des deux grands fournisseurs de terres rares du Jiangxi (Entretien 9, 2016). Il existe également des acteurs dans le Jiangsu dont l'activité est essentiellement basée sur la séparation sans intégrer des étapes minières ou de la fabrication d'aimants (Entretien 10, 2016). D'après XTC, ce type d'activité n'a pas de valeur ajoutée économiquement et sera amené à péricliter (Entretien 10, 2016).

Le modèle « intégré » : la fabrication d'aimants est dans la grande majorité des cas gérée par des acteurs indépendants des consortiums. XTC affirme ainsi être le seul acteur engagé dans toutes les activités depuis la mine jusqu'à la production des aimants (Entretien 10, 2016). La production d'aimants se fait via sa filiale Golden Dragon Rare-Earth Co. Ltd. XTC a 4 filiales impliquées dans l'exploitation des terres rares. Les deux sociétés pouvant effectuer des opérations minières dans le Fujian sont : Longyan Rare-Earth Development, Sanming Rare-Earth Development. Ce sont des joint-ventures entre XTC (51%) et les gouvernements municipaux (49%) de respectivement Longyan et Sanming. Le contrôle public des activités minières de XTC est donc à une échelle encore plus locale que celui des autres consortiums. Le modèle n'est en réalité pas totalement « intégré ». En effet, à chaque étape, les produits sont achetés et revendus (Entretien 10, 2016) en fonction des qualités exigées - qui ne peuvent pas toujours être produites sur place -, du prix du métal, de la productivité des mines locales, comme dans le cas des autres consortiums (Entretien 19, 2016). Le but des achats et reventes à chaque étape peut également être de se tenir au courant des prix de la concurrence (Entretien 19, 2016). De plus lors de nos entretiens avec XTC, une seule mine leur appartenant était en passe d'être en activité, il n'y avait donc pas de production minière au sein du groupe et le minerai était donc acheté en dehors du consortium (Entretien 10, 2016). La spécificité de XTC tient donc dans la fabrication des aimants en plus de l'activité minière. Cependant, d'autres consortiums se sont engagés dans la production d'aimants comme China Northern qui détient une filiale de production d'aimants Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth Magnetic Material Co., Ltd (Entretien 19, 2016). Cependant, China Northern est laissé dans la catégorie des consortiums classiques, car son cœur d'activité reste bien la production et le traitement des terres rares (Entretien 20, 2016), sa filiale magnétique produisant essentiellement des matériaux magnétiques à destination des fabricants d'aimants, 15 000 tonnes d'alliage (en bandes) pour la production d'aimants NdFeB (Asian Metal, 2012).

Les firmes pilotes dans la relation entre consortiums et fabricants d'aimants sont donc les 6 consortiums. Les fabricants d'aimants sont relativement captifs de cette relation (au sens du monopole qui leur confère une forte capacité de négociation et non au sens de Gereffi[95]). En effet,

[94] Filiale de Shenghe Resources Holding Co., Ltd. Shenghe appartient à 18% à l'état, à 1% à China Northern, en partie à Chinalco un autre des 6 consortiums. Ganzhou Chenguang Rare Earth New Material Co., Ltd (Ganzhou Chenguang) produit des OTR, des TR metal et des alliages.

[95] Gereffi entend par réseaux captifs des relations asymétriques où les firmes pilotes, ayant investi dans le développement des compétences de leurs fournisseurs, cherchent à les enfermer dans la relation. Il s'agit ici

s'il existe des producteurs en dehors de la Chine comme Lynas, et des séparateurs en dehors de la Chine (Lynas, Molycorp, Solvay), les fabricants d'aimants japonais restent dépendants de la Chine pour l'étape de réduction des oxydes (raffinage) : en effet il n'existe pas de technique moderne pour cette étape qui est très énergivore ce qui donne un avantage comparatif à la Chine, l'électricité étant très chère au Japon. La création des consortiums, la fermeture des mines illégales, soit la reprise en main de la chaîne de valeur par quelques acteurs clefs entretenant des liens étroits avec les pouvoirs publics (provinces et municipalité) pourrait permettre une remontée des prix et éventuellement un « déverouillage » du verrou bas de gamme (évoqué au paragraphe 1.2.5) qui fait obstacle à la mise en place d'une production d'aimants à haute valeur ajoutée en Chine. Cette dynamique pourrait être vue comme l'occasion de mettre en place une production générant moins de pertes et rognant moins sur les coûts sociaux et environnementaux. Cependant, pour que cette politique soit efficace, il est nécessaire que la lutte contre le secteur informel soit efficace. En 2016, le secteur informel cassait encore le monopole des consortiums et le contrôle de l'état, tirait les prix vers le bas et faisait donc pression sur les coûts de la production des terres rares. Ainsi, la chute des prix avait notamment amené en 2016 les acteurs miniers à abandonner leur projet de réutilisation des déchets miniers (Entretien 15 et 17, 2016). De plus, un autre facteur vient contrer la perspective d'une reprise en main de la chaîne, orientée vers la haute valeur ajoutée : c'est la logique de surproduction qui s'entretient elle-même du fait des investissements réalisés (Entretien 11, 2016). Finalement, la forte production minière de terres rares à un coût bas amène les acteurs miniers à peu se préoccuper de la présence de terres rares dans les déchets (Entretien 17, 2016).

1.4.3. Des aimants Nd-Fe-B aux industries consommatrices

Les fabricants d'aimants sont en grande majorité indépendants des consortiums (voir Figure 36). La taille des fabricants d'aimants vus en entretien est remise en perspective par rapport à la répartition nationale : les capacités de production excédant 3000 tonnes par an représenteraient environ 10% des sites de production, les capacités entre 1000 et 3000 tonnes par an représenteraient 30% des producteurs et les petits producteurs avec une capacité de 500 à 1000 tonnes par an représenteraient 60% de la production chinoise.

Tableau 29 : Capacité de production des fabricants d'aimants Nd-Fe-B

Capacité de production d'aimants Nd-Fe-B	Fabricants d'aimants vu en entretien en 2016
> 3000 t/an (10% des fabricants chinois)	XTC (Entretien 10) Jinmeng (Entretien 13) Tianhe magnets (Entretien 16) Ningbo Yunsheng (Entretien 20)
Entre 1000 et 3000 t/an (30% des fabricants chinois)	*Jinshan Magnetic (Entretien 12)*
Entre 500 à 1000 t/an (60% des fabricants chinois)	YG Magnet (Entretien 9)
Producteurs japonais (4000t/an pour Hitachi, n.d. pour Shin-Estu)	Hitachi (Entretien 22) Shin-Etsu (Entretien 23)

Le type d'acteurs « fabriquant d'aimants intégrés » (voir Figure 36), c'est-à-dire des fabricants d'aimants effectuant les étapes de traitement chimique et de séparation ne semble pas courant en Chine. Le seul fabricant d'aimant interrogé fonctionnant sur ce modèle est Baotou Jinmeng

des acheteurs et non des fournisseurs, et l'on peut difficilement affirmer sur la base des entretiens que les consortiums aient investi dans les compétences des fabricants d'aimants dont ils ne sont pas propriétaires.

Magnetic Materials Co., Ltd. (Entretien 13, 2016). En revanche, 2 des 5 principaux fabricants d'aimants au Japon fonctionnent sur ce modèle. Ainsi, Santoku et Shin-Etsu sont séparateurs, même si la séparation se limite aux terres rares lourdes et moyennes (Nd, Pr, Tb, Dy) et sous-traitent la majeure partie de l'étape de raffinage en Chine (bien qu'ils possèdent de petites installations d'affinage au Vietnam) en raison du caractère énergivore de cette étape et du coût de l'énergie au Japon (Entretien 23, 2016). Shin-Etsu possède une JV en Chine pour la production des alliages afin de réduire le coût des matières premières utilisées pour la fabrication d'aimants (Entretien 23, 2016). Tous les acteurs rencontrés réalisant du recyclage d'aimants en fin de vie fonctionnent sur ce modèle, c'est-à-dire que ce sont des fabricants d'aimants possédant les étapes de traitement chimique et de séparation (voir paragraphe suivant).

Les ventes des fabricants d'aimants chinois se feraient principalement en Chine avec 60% à 80% des ventes sur le territoire (Entretiens 9, 12, 13, 16, 2016). Il n'a pas été possible de déterminer la part de ces aimants exportée plus en aval de la chaîne, il faudrait pour cela mener d'autres entretiens avec les acheteurs d'aimants de premier et second rang. Un fabricant d'aimant évoque 80% des aimants qui seraient réexportés à l'international, notamment dans le secteur de la climatisation où les États-Unis sont de gros consommateurs (Entretien 9, 2016). Le second pays d'ancrage pour les acheteurs de premier rang serait le Japon (Entretien 13, 2016). Le type d'achat serait en majorité des achats directs par les industries consommatrices (Entretien 9, 10 et 13, 2016), avec quelques ventes passant par des traders (Entretien 9, 10 et 13, 2016). Les raisons évoquées pour faire appel à des intermédiaires sont la responsabilité prise par les traders sur les risques d'approvisionnement et la barrière de la langue, la proximité géographique dans le cas des achats internationaux (Entretien 9, 2016). Les fabricants vendent également régulièrement à des équipementiers (Entretiens 9, 16, 20, 2016). Enfin les « bureaux de représentation des sociétés [étrangères…] en Chine […] composés d'un employé technique local qui relie l'acheteur d'aimants […] au fournisseur d'aimants chinois » (Machacek & Fold, 2018) n'ont pas été distingués des « ventes directes » dans les entretiens.

En 2016, l'acheteur le plus souvent évoqué comme représentant une part importante des ventes par les fabricants d'aimants interrogés est l'industrie automobile (Entretien 9, 12, 16, 22, et 23, 2016), avec seulement deux fabricants ayant spécifiquement évoqué la vente pour des générateurs de voitures électriques ou hybrides : Shin-Etsu (Entretien 22, 2016) et China Northern (Entretien 19, 2016). Juste après viennent les compresseurs pour la climatisation essentiellement, mais aussi la réfrigération (Entretien 9, 10, 22, et 23, 2016) et le secteur éolien (Entretien 10, 12, 16, 19, 2016) surtout vu comme un secteur en croissance. Le secteur électronique, bien qu'étant un gros secteur d'utilisation des aimants au niveau mondial était présent dans les achats auprès des acteurs interrogés, mais dans une moindre mesure (Entretien 13, 16, 19 et 22, 2016). Il n'est pas possible de savoir si cela tient du hasard ou si le secteur électronique est un secteur s'approvisionnant auprès des petits fabricants d'aimants voire des ateliers de découpage de Ningbo qui n'ont pas pu être rencontrés.

L'industrie électronique est documentée comme une industrie dont la relation à ses fournisseurs est qualifiée de « modulaire », c'est-à-dire ayant recours à la standardisation des composants qui permet de changer facilement de fournisseur et de région de production, dans le but d'abaisser les coûts de production et d'augmenter la capacité de production (Palpacuer, 2008a). Certains fabricants ont ainsi souligné les différences dans les relations établies avec les acheteurs en fonction du secteur. La phase de développement d'un produit prend ainsi en moyenne de 2 à 3 ans, mais il existe également des contrats de long terme qui peuvent aller jusqu'à 10 ans (Entretien 16, 2016). Selon cet entretien, la durée de cette relation dépend des secteurs, notamment l'industrie automobile ne change pas facilement de fournisseur alors que l'électronique ou les producteurs d'IRM sélectionnent leurs fournisseurs en fonction du coût le plus bas (Entretien 16, 2016). Le secteur électronique est un acheteur de second rang pour les fabricants d'aimants, qui sont plus en contact avec les assembleurs (Entretien 16, 2016). L'industrie automobile serait plus proche du modèle « relationnel » (Gereffi et al., 2005) investissant dans la « compétence » de ses fournisseurs, avec

notamment un accompagnement à la mise en place du recyclage des chutes de production (copeaux)[96] et des aimants défectueux pour diminuer les coûts de production. Cet accompagnement a été réalisé après 2011 par certaines marques avec leur fournisseur (Entretien 16, 2016). Ce procédé de recyclage s'est maintenu, même après la chute du prix des terres rares (Entretien 16, 2016). La recherche d'une certaine qualité dans les aimants - l'industrie automobile exigant la détention de brevets pour ses fournisseurs (Entretien 13, 2016) - conduit à une relation fournisseur-acheteur plus stable. Cela est possible pour ce secteur, car l'automobile « peut se permettre de vouloir mettre le prix et de vouloir de la qualité, car finalement la pièce est petite par rapport à la voiture, avec un pourcentage du prix final qui n'est pas si élevé » (Entretien 23, 2016).

La littérature fait état d'une diminution de la consommation des aimants Nd-Fe-B dans l'industrie après la crise de 2011, avec notamment des acteurs de l'industrie automobile ayant substitué une partie des aimants Nd-Fe-B par des aimants en ferrite, comme Renault (BRGM, 2015). En 2016, les entretiens confirment cette tendance à la méfiance vis-à-vis de la volatilité des prix du marché qui aurait conduit à une baisse de la demande (Entretien 10, 13, 15, 2016) au-delà de l'industrie automobile. Le secteur des climatiseurs notamment serait retourné en partie aux aimants en ferrite (Entretien 13, 2016). Certains acteurs sont pessimistes quant au revirement de cette décision avec des changements de ligne de production qui prennent 3 à 5 ans (Entretien 13 et 15, 2016) et envisagent même de se réorienter vers la production des aimants en ferrite (Entretien 13, 2016) si les prix bas se maintiennent alors que les coûts de production sont élevés. Cependant, d'autres acteurs notent déjà le retour de certains clients à des aimants Nd-Fe-B, notamment des marques automobiles qui souhaitent se positionner sur les voitures électriques comme Vokswagen (Entretien 16, 2016). Plusieurs fabricants d'aimants rencontrés comptent sur l'augmentation de la production des éoliennes pour une reprise des commandes (Entretien 10 et 23, 2016), tout en soulignant l'incertitude liée à la technologie (avec ou sans aimants Nd-Fe-B) qui va emporter le marché à l'international.

Malgré une volonté affichée de se positionner sur le haut de gamme avec notamment la création de JV avec les fabricants japonais (Bo-Ping, 2016), la production d'aimants en Chine reste en moyenne une production de masse « de basse qualité » (Entretien 20, 2016), contrairement aux fabricants d'aimants européens qui achètent des alliages aux fabricants chinois pour produire des aimants de haute qualité. Un fabricant chinois exprime ainsi le positionnement des fabricants d'aimants européens : « les fabricants européens veulent de la haute qualité et souvent de la qualité supérieure à ce dont ils ont vraiment besoin en termes techniques : pour les maillons intermédiaires de la chaîne cela leur permet de vendre plus cher à leurs clients, mais ce n'est pas forcément dans l'intérêt des fabricants d'aimants chinois » (Entretien 20, 2016).

Il existe une centaine d'entreprises avec un ou deux employés à Ningbo réalisant uniquement l'étape de découpage d'aimants (Entretien 9, 2016). Les gros fabricants d'aimants déclarent ne plus faire appel aux ateliers de découpage à Ningbo, réalisant la mise en forme eux-mêmes (Entretien 10 et 12, 2016). Cette affirmation tend à être confortée par les visites d'usines de fabricants d'aimants en Chine (Entretien 10, 12, 13, 16, 2016), bien que la présence d'un atelier de découpage n'empêche pas de faire appel à des sous-traitants en cas de surproduction. Un acteur extérieur à la filière des aimants confirme cependant cette tendance à la prise en charge du découpage pour les gros acteurs (Entretien 11, 2016). Les petits fabricants d'aimants font toujours appel à ces entreprises pour le découpage des blocs d'aimants (la mise en forme ou *shaping*), notamment pour gérer le surplus de production qui n'est pas vendu (Entretien 9, 2016). Ainsi, la surproduction (du fait de l'augmentation permanente des capacités de production) et la baisse des prix en 2016 par rapport à 2010 amènent les petits fabricants d'aimants à externaliser une partie de leur production pour diminuer les coûts.

[96] C'est l'organisation de la production des aimants frittés qui génère la production de copeaux. En effet, il a été vu au paragraphe 1.3.1 que les aimants étaient produits sous forme de blocs à découper, générant nécessairement des pertes. Des procédés pour produire dans une forme proche de sa forme finale existent mais sont considérés comme trop coûteux (Kooroshy, Tiess, Tukker, & Walton, 2015).

Il est probable que cette externalisation se fasse dans des mauvaises conditions qui génèrent des déséconomies liées à la difficulté de récupération des chutes de production par des petits acteurs et du travail précaire. Quand les prix des terres rares sont bas, de nombreux petits fabricants ne se préoccupent pas de recycler les chutes de production (copeaux) engendrant des pertes, mais de diminuer d'autres coûts de production (Entretien 9, 2016). Cela est d'autant plus vrai à Baotou où la matière première est abondante (Entretien 12, 2016). Les déchets de production de la phase de découpage (copeaux) accumulés avant 2011, qui contenaient entre 30 milles et 50 milles tonnes de terres rares (Kooroshy et al., 2015), auraient tous été exploités par des ferrailleurs (probablement du secteur informel) quand les prix des terres rares étaient hauts (Entretien 13, 2016). Cependant en l'absence de stockage et de transport approprié, il est raisonnable de penser que cette récupération a généré des pertes importantes de terres rares. En effet, même lorsque les copeaux sont récupérés par les fabricants d'aimants pour le recyclage, il existe déjà des pertes, JinMeng évaluant l'efficacité du ramassage des copeaux à 92,5% (Entretien 13, 2016).

La même logique de surproduction se retrouve chez les grands acteurs de la fabrication des aimants. Ainsi, les seuls acteurs dans la chaîne de production des aimants Nd-Fe-B à qui profitent les coûts bas sont les plus gros fabricants d'aimants qui peuvent réaliser des bénéfices sur une logique de production de masse à bas coûts, les petits producteurs étant mis en danger par l'augmentation de la compétition (Entretien 11, 2016).

Ainsi, il a été vu dans cette section que les fabricants d'aimants intégrés semblent avoir un avantage comparatif en termes d'économies de ressources, la détention d'unités de traitement chimique et de séparation favorisant la mise en place du recyclage. Les acheteurs chinois restent majoritaires auprès des fabricants d'aimants chinois sans qu'il ait été possible de déterminer la part finale de ces achats destinée au marché chinois. Le secteur automobile et la climatisation, des secteurs connus pour leur contribution aux émissions de gaz à effet de serre, restent des secteurs prioritaires d'utilisation des aimants Nd-Fe-B, malgré une baisse de la consommation entre 2011 et 2016. Une part émergente de la production est destinée aux éoliennes et dans une moindre mesure aux moteurs de voitures électriques et hybrides. Les relations fabricants d'aimants-acheteurs varient en fonction des secteurs avec deux exemples types que sont la filière automobile qui instaure des relations sur la durée avec les fabricants d'aimants et les assembleurs de l'industrie électronique qui à l'inverse recherchent le coût le plus bas pour des contrats sur de courtes périodes. Si des différences de travail sur la qualité des produits et sur la réduction des pertes (notamment via la mise en place du recyclage) se dessinent entre les différents producteurs, elles semblent également influencées par le type d'acheteurs. Notamment, l'exemple de l'entretien 16 montre que le recyclage peut se faire à la demande du client et que cette demande peut constituer un levier d'économie des ressources. En 2016, malgré une volonté affichée de se positionner sur le haut de gamme avec notamment la création de JV avec les fabricants japonais (Bo-Ping, 2016), la production d'aimants Nd-Fe-B en Chine reste en moyenne une production caractérisée par la surproduction « de basse qualité », avec les plus gros producteurs d'aimants qui profitent de leur coûts d'opération relativement bas pour s'imposer sur le marché. Les prix bas amènent les petits fabricants d'aimants à externaliser une partie de leur production, la phase de découpage des aimants, dans des micro-atelier de découpage situés majoritairement à Ningbo, exposant la filière à des pertes de matières importantes.

1.4.4. Recyclage des aimants Nd-Fe-B

Bien que les pratiques effectives de recyclage soient peu documentées dans la chaîne de valeur Nd-Fe-B, les entretiens ont montré qu'il existait en 2016 trois types de recyclage dans la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B en Chine et au Japon. Ces trois voies de recyclage sont résumées sur la Figure 37.

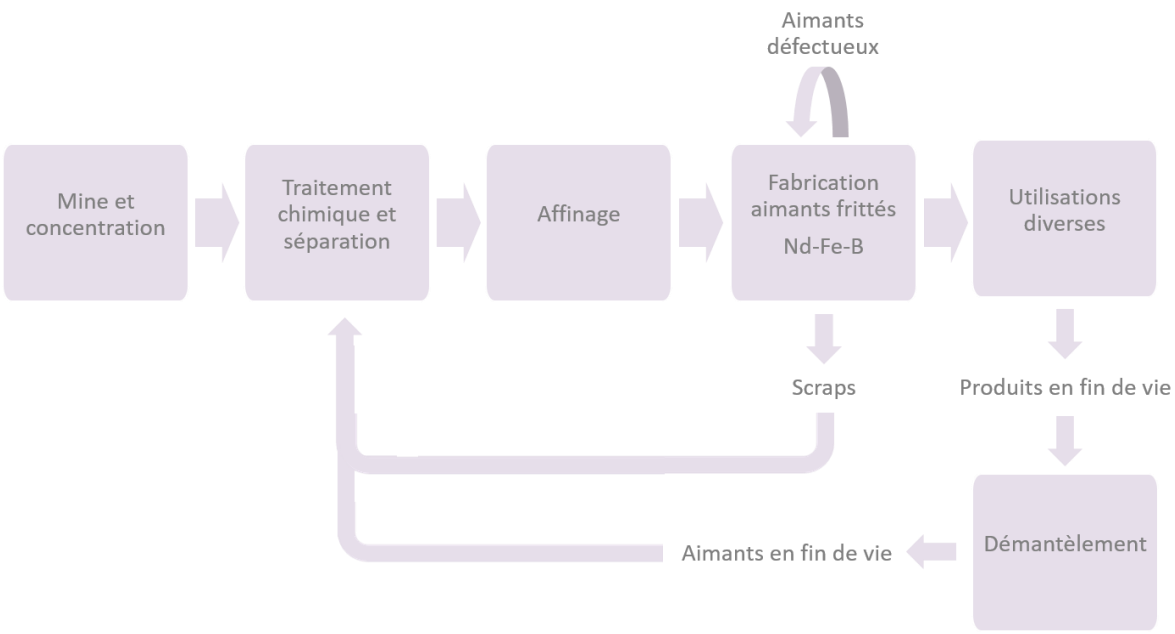


Figure 37 : Les différentes sources secondaires pour la fabrication des aimants Nd-Fe-B et leurs utilisations dans les 4 principales étapes industrielles. Source : autrice, d'après entretiens

De nombreux fabricants d'aimants Nd-Fe-B pratiquent le recyclage des copeaux en vendant ces copeaux à des acteurs spécialisés dans le recyclage (Entretien 9, 2016) ou en les recyclant eux-mêmes dans le cas des fabricants d'aimants intégrés (Entretien 10, 13, 16, 20, 22, et 23, 2016). Ces opérations de recyclage ont lieu depuis 2010 pour certains fabricants (Entretien 13, 2016). Pour le producteur d'aimants intégré interrogé la part de recyclage des copeaux par rapport au traitement de minerai reste très minoritaire, avec 150 à 200 tonnes de copeaux traités par an (Entretien 13, 2016). Le recyclage des copeaux est effectué en réintroduisant le liquide de découpage des blocs d'aimants dans le procédé de traitement de terres rares au niveau de l'attaque acide par l'acide sulfurique (traitement chimique) en le mélangeant avec du concentré de terres rares (Entretien 13, 2016). La rentabilité du procédé de recyclage est dépendante du contenu en terres rares lourdes (Entretien 2, 9, 13 et 23, 2016). En moyenne les copeaux d'aimants frittés seraient à 24% de terres rares (Tb, Dy, Nd, Pr) (Entretien 13, 2016). C'est pourquoi les aimants liés ne sont pas recyclés, car ils contiennent moins de terres rares, environ 18% (Entretien 13, 2016). La mise en place du recyclage des copeaux, très présent à Ningbo et Ganzhou, est surtout dépendante de la concentration géographique des fabricants d'aimants et donc du volume de copeaux disponible (Entretien 13, 2016). Les fabricants d'aimants japonais qui pratiquent ce recyclage (Shin-Etsu et Santoku), car possédant des installations de séparation, procèdent de la même manière : leurs copeaux de production et des copeaux achetés sur le marché japonais sont réintégrés dans le procédé de traitement des terres rares au niveau du traitement chimique (Entretien 23, 2016).Cette chaîne de valeur n'est donc pas indépendante de la production chinoise, puisque l'étape d'affinage est toujours réalisée très majoritairement en Chine (et dans une moindre mesure au Vietnam) (Entretien 23, 2016).

Le recyclage des aimants défectueux en Chine se fait en réintroduisant les aimants dans la chaîne de production des aimants au stade de la décrépitation (Entretien 16, 2016). Le recyclage a été mis en place pour Tianhe Magnets à la demande d'un client (Volkswagen) qui leur a demandé d'économiser sur les coûts depuis 2011 et d'être transparents sur les prix (Entretien 16, 2016). Ce type de recyclage, tout comme la vente des copeaux à des recycleurs, est souvent réalisé par les fabricants d'aimants (Entretien 16, 2016). Le recyclage des aimants défectueux correspond à une pratique de downcycling, recyclant les aimants défectueux de haute qualité pour produire des aimants de basse qualité pour le marché chinois (Entretien 20, 2016). Au Japon, les aimants sont soit

recyclés de la même manière par les acteurs ne disposant pas des étapes de traitement chimique et de séparation comme Hitachi (Entretien 22, 2016), soit sont broyés et réintroduits au niveau de l'attaque acide comme pour les copeaux et les aimants en fin de vie (Entretien 23, 2016) ce qui permet de récupérer les terres rares et d'éviter le *downcycling*.

Le recyclage des aimants en fin de vie, inexistant en Europe, est mis en place au Japon. S'il est dit que les fabricants chinois ne font pas de recyclage des produits en fin de vie (Entretien 20, 2016), des contre-exemples ont été trouvés (voir ci-après). Selon la Chinese Society of Rare Earths (Entretien 17, 2016), ou CSRE[97], le frein principal à la mise en place du recyclage en Chine est la mise en place de la collecte. En effet, des efforts conséquents ont été réalisés au Japon pour récupérér les aimants en fin de vie. L'approvisionnement de l'usine de Tokyo Eco Recycle (usine de récupération des aimants de Hitachi) est assuré par les lois concernant le recyclage. Essentiellement la Small Home Appliances Recycling Law de 2012 qui régule les petits appareils électroniques tels que PC, téléphones portables, magnétoscopes, DVD, appareils photo numériques, horloges et sèche-cheveux (Amemiya, 2018). Selon cette loi, ce sont les municipalités qui sont en principe à la commande et qui donc payent la collecte ou « les recycleurs autorisés » (Amemiya, 2018). En revanche, les climatiseurs, télévisions, lave-linges, réfrigérateurs sont régulés par la Home Appliance Recycling Law de 1998 : dans ce cas, ce sont les producteurs et importateurs qui sont en charge de la collecte (Amemiya, 2018). En ce qui concerne l'usine de récupération d'aimants d'Hitachi, Tokyo Eco Recycle, la collecte suit bien ce modèle : les frigos, télévisions et machines à laver sont apportés par la ville de Tokyo (Entretien 22, 2016). Cependant, pour les HDD (disques durs) la plupart des centres de collectes récupérant des aimants Hitachi sont gérés directement par Hitachi et non par la municipalité, Hitachi bénéficiant d'une autorisation spéciale pour récupérer directement les disques durs dans tout le Japon. Il existe donc 10 centres Hitachi de démantèlement des ordinateurs au Japon qui renvoient les HDD vers Tokyo Eco Recycle. À Tokyo, le fonctionnement est différent, ils récupèrent les disques durs quel que soit la marque (Entretien 22, 2016). Cette usine, dont le capital a été apporté pour moitié par le gouvernement, est une usine de démantèlement et non de recyclage. Les activités de Tokyo Eco Recycle consistent en du démantèlement automatique d'aimants frittés. Les applications prises en charge sont les HDD (chocs et vibrations pendant 35 min) et les compresseurs de climatiseurs et de réfrigérateurs (découpage), ils enlèvent la colle par chauffage (Entretien 22, 2016). En comparaison, le seul site visité en Chine pratiquant le recyclage des aimants en fin de vie, ne réalise pas de démontage des produits à proprement parlé, ce qui reviendrait trop cher, mais casse les produits tels que des téléphones pour en récupérer les aimants (impliquant donc une perte des autres composants). Le recyclage des téléphones est cependant peu pratiqué en Chine, avec une préférence pour le recyclage des aimants de taille plus importante, comme ceux contenus dans les enceintes (Entretien 13, 2016).

Le recyclage d'aimants en fin de vie réalisé par des acteurs chinois, est mis en place sur le même mode que celui des copeaux de production. Ce recyclage est essentiellement effectué pour des acteurs japonais. JinMeng réalise ainsi du recyclage d'aimants en fin de vie, pour Panasonic notamment. Le client paie « un petit frais » pour le démantelement et le fabricant d'aimants garde les terres rares issues du recyclage (Entretien 13, 2016). Il serait possible pour les clients d'obtenir un service « aimant recyclé », mais le coût serait plus élevé et les fournisseurs d'aimants en fin de vie préfèrent donc ne pas récupérer les produits issus du recyclage, leur objectif étant uniquement de se conformer à la réglementation japonaise sur le recyclage des métaux dans les produits en fin de vie (Entretien 13, 2016). Le recyclage, comme pour les copeaux, nécessite de l'apport en minerai et

[97] La CSRE est une organisation sociale chinoise à but non lucratif, créée en 1979 et composée de travailleurs dans le domaine des sciences et technologies relatives aux terres rares et autres unités apparentées. La CSRE compte 4 000 membres individuels, 58 organisations membres et 15 comités professionnels. L'objectif affiché de cette association est de faire le lien entre le parti communiste chinois et le gouvernement chinois d'une part et les travailleurs en science et technologie dans le domaine des terres rares d'autre part, pour le développement scientifique national de l'industrie des terres rares. Cette organisation est sous la direction du Parti communiste chinois (The Chinese Society of Rare Earths, 2018).

est donc dépendant de la filière primaire (Entretien 13, 2016). Le recyclage des aimants en fin de vie au Japon consiste, après collecte et démantèlement, à passer les aimants au grenaillage pour enlever le revêtement, les broyer et les traiter de la même manière que les copeaux (Entretien 22 et 23, 2016). Les entretiens n'ont pas révélé si le recyclage nécessitait de l'apport de minerai dans le processus. Le recyclage des aimants au Japon passe par Hitachi pour le démantèlement, puis les aimants et les copeaux sont ensuite séparés par Santoku (sous-traitance pour Hitachi) ou Shin-Etsu (ventes des aimants à Shin-Etsu). En effet, l'extraction des terres rares à partir des aimants par Hitachi grâce au procédé utilisant un bain de magnésium co-développée avec Toho Titanium Co., Ltd n'est pas utilisée à l'échelle industrielle. Le taux de récupération du dysprosium n'est pas actuellement de 80% (Feuardant, 2016), 80% correspond au taux qu'il faudrait atteindre pour que le procédé soit rentable. Pour le traitement réalisé actuellement, Shin-Etsu mélange les copeaux avec des aimants broyés en fin de vie et les réintroduit dans la chaîne au niveau de l'attaque acide, une technique qui est donc proche de celle utilisée en Chine. Shin-Etsu et Santoku sous-traitent le raffinage en Chine pour la maière première minière comme pour les copeaux. Santoku domine le marché du recyclage au Japon pour les scraps et les aimants en fin de vie (Entretien 23, 2016).

Il a donc été vu que des opérations de recyclage existaient dans la chaîne de valeur du néodyme, consistant principalement en la récupération de copeaux lors de l'étape de découpage des aimants. Ce recyclage, s'il permet de limiter les pertes de matière, provoque cependant plus de pertes que la mise en place d'un procédé de fabrication des aimants qui réaliserait directement des aimants de la bonne forme. Ce procédé est considéré comme trop coûteux aujourd'hui, mais cela dépend notamment de la fréquence de changement de forme des produits, qui est très élevée dans la filière des aimants (Entretien 11, 2016). Les pertes au niveau de la production sont donc associées au mode d'organisation de la chaîne de valeur avec l'externalisation du découpage préférée à la mise en place d'un procédé plus coûteux de mise en forme des aimants. Cette organisation est elle-même liée à la fréquence de changement des produits dans la chaîne de valeur des aimants (Entretien 11, 2016). Le recyclage des aimants défectueux au sein de la chaîne de production des aimants est effectué de manière systématique à la connaissance de l'autrice, mais pose le problème du *downcycling*. Le recyclage des aimants en fin de vie comme le recyclage des copeaux semble actuellement nécessiter l'apport de minerai et donc être dépendant de la filière primaire. Ceci est dû au fait que le recyclage consiste aujourd'hui à réintroduire les déchets dans la chaîne de production des terres rares, dont les procédés ont été mis au point pour traiter du minerai. Les seuls acteurs en capacité de réaliser un recyclage plus poussé des aimants défectueux sont des fabricants d'aimants intégrés qui possèdent les étapes de traitement chimique et de séparation, les mêmes acteurs qui réalisent le recyclage des aimants en fin de vie. En effet, ce sont des acteurs pour lesquels, il y a peu d'investissements supplémentaires à réaliser (en dehors de la collecte et du démantèlement) pour économiser des ressources en terres rares en recyclant des aimants. Les principaux acteurs miniers qui possèdent les mêmes outils de production et pourraient réaliser du recyclage ne semblent pas intéressés par la mise en place de ces procédés, la ressource étant vu comme abondante et les prix étant bas (Entretien 17, 2016). Le facteur déterminant à la mise en place d'une collecte et d'un démantèlement pour le recyclage des aimants en fin de vie est la réglemention portant sur les industries consommatrices d'aimants comme cela a été vu avec le cadre réglementaire japonais. Ainsi, les utilisateurs d'aimants doivent recycler les aimants en fin de vie et donc préserver des ressources en terre rare quand bien même ils ne tireraient pas profit du recyclage (Entretien 13, 2016). Cela pousse notamment les industries consommatrices à écoconcevoir leurs produits, puisque leur prise en charge en fin de vie est obligatoire. C'est notamment le cas pour les machines à laver, les réfrigérateurs et les climatiseurs (Entretien 23, 2016). Finalement, les freins à la mis en place du recyclage sont les prix bas de la ressource et leur volatilité (Entretien 2, 15, 2016), les difficultés liées à la mise en place de la collecte (Entretien 17, 2016), la dépendance du procédé actuel à la ressource primaire et aux acteurs du traitement des terres rares qui sont peu intéressés aux questions de recyclage. En miroir de cela, les leviers potentiels de l'amélioration du recyclage pourraient être un prix plus élevé et plus stable, une réglementation incitant les industries consommatrices d'aimants Nd-Fe-B à écoconcevoir et/ou la mise en place à l'échelle industrielle de

procédés métallurgiques ne dépendant pas de la filière primaire. Il semble qu'une reprise de contrôle des acteurs aval sur les étapes de traitement chimique favorise également la mise en place du recyclage.

L'analyse de la chaîne de valeur du néodyme et de son impact sur l'épuisement de la ressource à travers les entretiens a renforcé l'idée que la recherche des coûts de production les plus bas associée à la surproduction était le modèle économique dominant de la filière et rendait difficile pour les acteurs de sortir de cette logique.

Il a été montré que la chaîne de fabrication des aimants en Chine et au Japon était structurée par un monopole de 5 acteurs chinois fournisseurs de terres rares, de nombreux fabricants d'aimants Nd-Fe-B avec des tailles variées et de divers acheteurs avec une dominante pour les secteurs automobile et de la climatisation. Le monopole des producteurs de terres rares chinois pourrait conduire à une remontée des prix et un plus grand contrôle de l'utilisation des ressources, mais cette vélléité est contrecarrée par la persistance du secteur informel qui tire les prix vers le bas et fait pression sur les coûts.

La logique de surproduction des acteurs miniers comme des fabricants d'aimants chinois participe également à la course au prix le plus bas et est également un frein pour la mise en place de procédés plus efficients. Lorsque les prix étaient plus élevés des procédés de recyclage ont été mis en place chez les fabricants qui ont persisté après la chute des prix des terres rares. Les relations fabricants-acheteurs de type modulaire favorisent la pression sur les prix et donc l'externalisation de la découpe des aimants et les pertes de matières.

Pour favoriser la mise en place du recyclage la réglementation visant les industries consommatrices, avec notamment des critères sur la récupération par substance, est un levier permettant de limiter les pertes de matières et de favoriser l'écoconception des produits.

2. Les coûts sociaux dans la chaîne de valeur du néodyme dans les aimants Nd-F-B et leur lien avec l'épuisement de la ressource

La deuxième partie de cette étude de cas sur le néodyme vise à identifier les coûts sociaux de la chaîne de valeur du néodyme liés à l'épuisement et à les évaluer quand cela est possible au vu des données disponibles. Dans un premier temps, une synthèse des différents enjeux sociaux et environnementaux liés à la chaîne de valeur du néodyme dans les aimants Nd-F-B est présentée. Elle permet de lister les enjeux et de proposer une synthèse des interactions entre ces enjeux ainsi que de montrer leurs liens avec les dynamiques d'épuisement. Dans un deuxième temps, au vu de l'influence plus ou moins directe de l'épuisement sur les différents enjeux et des données disponibles il a été décidé de concentrer l'étude de cas sur la quantification des coûts sociaux associés aux déchets miniers à Baiyun Ebo, principal site de production des terres rares. Pour cela, il est nécessaire tout d'abord d'évaluer l'ampleur des phénomènes d'épuisement physique, et c'est pourquoi l'étude de cas développe un modèle de diminution de la teneur de la mine de Baiyun Ebo. Ensuite le lien entre la diminution de teneurs, le rendement de l'exploitation, la production de déchets et les pertes de terres rares lors de l'exploitation est étudié. Enfin, une évaluation des coûts associés aux déchets de l'exploitation minière pour l'année 2016 et pour différents scénarii de gestion de ces coûts est développée afin d'identifier la part de ces coûts attribuables aux dynamiques d'épuisement. Une évaluation des déséconomies liées au mode actuel d'exploitation des terres rares est également réalisée. La part des dépenses publiques liées à ces coûts sociaux est discutée, sans faire l'objet d'une évaluation quantitative. Une brève comparaison des coûts sociaux

de l'épuisement liés à la production d'aimants Nd-Fe-B avec du néodyme issu des mines avec la production d'aimants Nd-Fe-B recyclés est proposée avec les données disponibles sur ce procédé.

2.1. Les enjeux sociaux, sanitaires et environnementaux concentrés en amont de la filière, avec des spécificités au nord et au sud de la Chine

Ce paragraphe fait la synthèse des différents enjeux sociaux et environnementaux liés à la chaîne de valeur du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B. Cette synthèse permet de lister les enjeux et de proposer une synthèse des interactions entre ces enjeux, et de leurs liens avec les dynamiques d'épuisement. La revue de la littérature sur les impacts liés à cette production montre que les enjeux se concentrent particulièrement sur l'étape de production minière. En effet, si les autres étapes sont soumises aux mêmes problématiques en termes de conditions de travail et de respect des droits des travailleurs, en termes sanitaires et environnementaux les étapes minières et métallurgiques concentrent les problématiques comme l'ont montré Sprecher et ses collaborateurs dans leur comparaison de la fabrication d'aimants Nd-Fe-B avec des matières premières primaires et secondaires (Sprecher et al., 2014). Les enjeux qui seront décrits ici concernent donc particulièrement ces étapes. Pour rappel, à l'étape minière la thèse se concentre sur les deux principales zones d'exploitation que sont le gisement de Baiyun Ebo en Mongolie intérieur et les argiles ioniques du sud de la Chine.

Tout d'abord les enjeux environnementaux de la production sont décrits, puis les enjeux sociaux et sanitaires, et enfin, leurs liens avec la dynamique d'épuisement des ressources.

2.1.1. Enjeux environnementaux

Les données sur la pollution environnementale liée à la production des aimants Nd-Fe-B et en particulier à l'exploitation des terres rares sont peu disponibles. Ainsi toutes les analyses de cycle de vie (ACV) réalisées sur le sujet sont basées sur les données de production de Mountain Pass (États-Unis) des années 1990 ou sur des informations de la littérature chinoise ou une combinaison des deux (Navarro & Zhao, 2014). Navarro et Zhao, qui ont mené une revue de la littérature sur les ACV dans l'exploitation des terres rares, soulignent la faible qualité des données utilisées pour réaliser ces estimations, marquées notamment par leur caractère incomplet et non représentatif (Navarro & Zhao, 2014). Ces ACV sur l'exploitation des terres rares en Chine portent sur Baiyun Ebo mais, souffrant du manque de données sur l'exploitation, raisonnent principalement par analogie avec d'autres procédés. Les limitations concernent : la composition du minerai prise en compte, l'absence de prise en compte du statut de co-produit des terres rares avec le fer à Baiyun Ebo, le procédé de concentration et de traitement chimique qui est calqué sur celui d'exploitation des phosphates, l'extraction par solvant (séparation) qui est calquée sur celle d'huile végétale (ce qui est peu réaliste[98]), et enfin l'hypothèse d'une teneur à 6% issue de la base de données EcoIvent, ce qui est peu réaliste comme le montre le paragraphe suivant (Navarro & Zhao, 2014). La plupart des ACV semblent également utiliser un rendement pour la production des OTR de 61% (Navarro & Zhao, 2014) : or, l'étape de la séparation avec le fer abaisse considérablement le rendement qui est plutôt de 10% comme le souligne le paragraphe 2.2.2.

Enfin, la quasi-totalité des études et des ACV portent sur Baiyun Ebo, à l'exception d'une ACV sur les argiles ioniques (Vahidi, Navarro, & Zhao, 2016). S'il est souligné que « la pollution de l'eau liée à la production de terres rares est particulièrement grave dans le sud de la Chine en raison des caractéristiques de son minerai et de la part importante des activités minières illégales » (J. Chen et al., 2018), il est toutefois difficile d'établir une comparaison carles données concernant les impacts

[98] D'après Navarro et Zhao, la séparation des huiles végétales est une extraction par solvant avec 4 étapes, mais cette analogie sous-évalue la consommation d'électricité dans le cas des terres rares, qui demandent plus d'étapes. En effet, d'après les informations récoltées dans l'enquête de terrain l'extraction par solvant des terres rares en Chine utilise environ 200 batteries (une batterie est une série de mélangeurs-décanteurs) pour l'extraction par solvant (Entretien 23, 2016)

réels de ces exploitations sont encore plus rares que pour Baiyun Ebo, en raison notamment des exploitations illégales (Vahidi et al., 2016).

i. Enjeux climatiques

Selon les études, le potentiel de réchauffement global[99] de la production de terres rares sont chiffrés pour Baiyun Ebo entre 12-16 kg CO_2-Eq/kg d'OTR (Sprecher et al., 2014), et avec une allocation économique pour attribuer l'impact à l'oxyde de néodyme : 17,6 kg CO_2-Eq/kg d'oxyde de néodyme (Nuss & Eckelman, 2014) et 66 kg CO_2-Eq (Koltun & Tharumarajah, 2014). La différence de résultat pour les deux dernières études s'explique en partie par les variations dans le facteur d'allocation économique (dues aux variations de prix) pris pour calculer la part de la charge environnementale de l'oxyde de néodyme : 18% pour (Nuss & Eckelman, 2014) et 37% pour (Koltun & Tharumarajah, 2014).

Ceci situe l'exploitation du néodyme dans la moyenne des procédés de production des métaux. Les émissions de gaz à effet de serre et la demande énergétique seraient similaires dans les exploitations du sud de la Chine (Vahidi et al., 2016).

ii. Enjeux d'acidification

Dans la mine de Baiyun Ebo, malgré la présence de quelques minéraux sulfurés (X.-Y. Yang, Sun, Zhang, & Zheng, 2009), il n'existe *a priori* pas de problématique de drainage minier acide (voir chapitre 1) du fait de la présence de minéraux carbonatés et phosphorés qui ont un effet tampon sur l'acidification (Findeiß & Schäffer, 2017).

En revanche, le rejet aqueux de produits acides liés à l'exploitation pose plus de problèmes. Ainsi, à Baiyun Ebo, le parc à résidus recueille principalement les déchets issus de la concentration des terres rares et du fer et du traitement chimique des terres rares. Or le traitement chimique des terres rares se fait grâce à l'acide sulfurique (Qi, 2018, p. 57). Les eaux usées acides s'élèverait à environ 2,1 millions de mètres cubes par an provenant de la concentration des terres rares et de l'aciérie (Xiao, 2019). La NASA avance le chiffre de 75 m^3 d'eaux usées acides par tonne de terres rare produite ce qui donnerait 3,75 millions de mètres cube par an pour la production de Baiyun Ebo - qui est d'environ 50 000 tonnes d'OTR par an - soit une production d'eaux usées acides de 2 à 4 millions de mètres cube par an. Lima et Filho évoquent le chiffre de 200m^3 d'eaux usées acides par tonne de terres rares produite, ce qui est loin des autres estimations (Lima & Filho, 2015, p. 172).

Les exploitations des argiles ioniques du sud de la Chine (voir paragraphe 1.3.1), très majoritairement exploitées en lixiviation *in situ* (Arshi et al., 2018) provoqueraient moins d'acidification et plus d'eutrophisation liée à l'utilisation de sulphate d'ammonium (Vahidi et al., 2016). Cependant, il faut souligner que la pollution provoquée par l'utilisation d'acide oxalique sur ces exploitations est mal connue (Vahidi et al., 2016).

De même l'exploitation de Baiyun Ebo participe à l'émission de dioxyde de soufre et autres gaz responsables des phénomènes de dépôts acides (voir chapitre 1), avec notamment l'émission de fluororure (HF), dioxyde de soufre (SO2) trioxyde de soufre (SO3), tetrafluorure de silicium (SiF4). Le dioxyde de soufre provient de la consommation de charbon et de pétrole et le dégagement de fluorure de la calcination du minerai (B. Zhou, Li, & Zhao, 2017). D'après la CSRE, environ 9 600 à 12 000 m3 de ces gaz sont relachés par tonne de terres rares produite (NASA Earth Observatory, 2012). Ces gaz comprennent environ : 950 kg de SO_2, 470 kg d'oxydes d'azote, 300 kg de fluorure d'hydrogène, et 7 kg de monoxyde de carbone pour une tonne de terres rares produite à Baiyun Ebo en 2013 (China Nonferrous Metals Industry Association, 2014 in B. Zhou et al., 2017).Ces substances

[99] Le potentiel de réchauffement global est un facteur de conversion qui permet de comparer l'influence de différents gaz à effet de serre sur le système climatique. Ici le potentiel de réchauffement global de différents gaz sont rapportés aux effets causés par la libération de la même masse de dioxyde de carbone (CO2) sur 100 ans (GWP 100a).

contribuent elles aussi à l'acidification (China Nonferrous Metals Industry Association, 2014 in B. Zhou et al., 2017).

iii. Pollution des eaux

Dans l'exploitation des argiles ioniques, la pollution des eaux est liée à la technique d'exploitation minière de lixiviation *in situ*. Les mines du sud-est de la Chine, très souvent exploitées en lixiviation *in situ,* provoquent de graves pollutions des nappes phréatiques, notamment la pollution des cours d'eau au sulfate d'ammonium qui fait décliner la biodiversité (X. J. Yang et al., 2013). Paradoxalement, ce mode d'exploitation est issu d'une tentative du gouvernement chinois de réguler la gestion environnementale des exploitations de terres rares, en interdisant la lixiviation en tas (voir paragraphe v.).

La pollution des eaux à Baiyun Ebo est principalement liée au stokage des déchets et est traitée dans le paragraphe suivant.

iv. Les déchets miniers de Baiyun Ebo, le barrage de Weikuang

Aujourd'hui, la plupart des déchets liés à l'extraction des terres rares de Baiyun Ebo sont contenus dans la retenue du barrage de Weikuang, qui constitue un parc à résidus. La construction du barrage de Weikuang a commencé en 1955 et s'est finie en 1963, mais celui-ci n'a pas été utilisé avant 1965 (Beijing Huacai Zhichuang Technology Co., Ltd, 2016). Le parc à résidus contient les déchets issus de divers procédés : les eaux usées (entre 2 et 4 millions de tonnes par an), les intrants chimiques des procédés, et des matériaux broyés. (Navarro and Zhao, 2014). Viennent s'ajouter à cela des pollutions anciennes notamment liées à l'ancien processus de séparation des terres rares et de raffinage appelé saponification qui a généré des eaux usées nuisibles. Il a été estimé en 2005 que le processus avait généré entre 20 000 et 25 000 tonnes d'eaux usées, avec une concentration totale en azote ammoniacal variant entre 300 et 500 mg / L (Hurst, 2010; Schüler, Buchert, Liu, Dittrich, & Merz, 2011). Depuis l'ammoniac en sortie d'usine est traité (Entretien 11 et 3, 2016).

90–95% des déchets solides (les matériaux broyés) ont une granulométrie inférieure à 74-76 µm (Navarro & Zhao, 2014; Y. Zhou, Yang, Xue, & Yuan, 2017), ce qui pose problème, car les déchets ne sont pas entièrement ennoyés et sont donc d'autant plus sujets à la dispersion (Xu & Shi, 2005).

Il est avéré que ce parc à résidus provoque des pollutions environnementales sérieuses : il serait notamment une des sources de pollutions majeures du Fleuve Jaune qui se trouve à proximité (Xiao, 2019; Xu & Shi, 2005; Y. Zhou et al., 2017). Les pollutions sont liées entre autres à la radioactivité des déchets qui sera évoquée dans le paragraphe suivant sur les enjeux sociaux et sanitaires. Outre les risques pour les personnes et l'environnement au niveau local, le comité du parti municipal, le gouvernement municipal et des experts environnementaux de la Mongolie-Intérieure et de la ville de Baotou s'inquiètent des risques potentiels de rupture de barrage et de pollution du Fleuve Jaune (Y. Zhou et al., 2017). En effet, des barrages de résidus ont récemment cédé dans de nombreuses régions en Chine, et le barrage de Weikuang est situé dans une zone sujette aux tremblements de terre (Xiao, 2019).

Le site du barrage est situé à 150 kilomètres au sud de la mine de Baiyun Ebo (Wang, Jiao, Lu, & Wang, 2019), quelques kilomètres à l'ouest de Baotou et 10 km au nord du Fleuve Jaune (Xiao, 2019; Y. Zhou et al., 2017). Si le barrage contenant les déchets du traitement des terres rares et de l'acier se situe près du Fleuve Jaune, c'est qu'il a été construit en même temps que l'aciérie de Baotou Iron and Steel Group. En effet, le procédé de fabrication de l'acier nécessite de l'eau, or il n'y a pas de source d'eau dans la zone minière, c'est pourquoi l'aciérie a été construite dans cette zone (Xiao, 2019). La superficie de ce parc à résidus en 2005 était de 11 à 12 km^2(Beijing Huacai Zhichuang Technology Co., Ltd, 2016; Xiao, 2019; Y. Zhou et al., 2017). En 2016 des travaux était réalisés pour élever le barrage afin d'augmenter sa capacité de stockage à 233,8 millions de m^3 (Beijing Huacai Zhichuang Technology Co., Ltd, 2016).

D'après Xiao (Xiao, 2019), la pollution environnementale causée par le parc à résidus de Weikuang a commencé à la fin des des années 1970, c'est-à-dire dès la mise en fonctionnement de cet espace de stockage. En 1995, était déjà observée une pollution à l'acide sulfurique, aux chlorures et fluorures dans les puits des villages alentours (Xiao, 2019). Wang Jianying (Xiao, 2019), professeur à l'Université de technologie de Mongolie intérieure, confirme qu'il existe une contamination des eaux souterraines à proximité du parc à résidus. De ce fait, la fertilité des terres cultivées autour du parc à résidus a commencé à décliner ; des animaux et des plantes ont été contaminés à leur tour. Wang Jianying a déclaré que la contamination des eaux souterraines par les polluants continuait à se propager et approchait du Fleuve Jaune à un rythme de 20 à 30 mètres par an (Xiao, 2019). Ainsi l'absence de drainage minier acide ne prévient malheureusement pas les eaux de fuites contaminées du barrage de se propager, avec très peu d'études sur leur composition et sur l'impact environnemental et sanitaire de cette propagation (Findeiß & Schäffer, 2017).

Ainsi, après 50 ans d'exploitation du parc à résidus, la propagation de la contamination du sol aux radionucléides autour de ce parc est estimée à 47 km^2 (R. Li et al., 2014) et a atteint les eaux souterraines et la végétation de la région environnante (Hurst, 2010; Schüler et al., 2011).

Enfin, une tonne de terres rares produite équivaudrait à la production d'1 à 1,4 tonnes de déchets miniers radioactifs (Lima & Filho, 2015, p. 172) et environ 2000 tonnes tous déchets miniers compris (Hurst, 2010), contenant 8,5 kg de fluor, 13 kg de poussières (Lima & Filho, 2015, p. 172). Ces chiffres seront discutés dans le paragraphe 2.2.3.

v. Les déchets miniers liés à l'exploitation des argiles ioniques

Pour les argiles ioniques, il n'y a quasiment pas de problème de radioactivité (Navarro & Zhao, 2014). Cependant, la gestion des déchets miniers reste problématique. Ainsi, rien que dans le district de Ganzhou (la zone la plus exploitée pour les argiles ioniques), sont recensées 302 mines abandonnées et 191 millions de tonnes de stériles. Ces stériles sont générés par l'association de techniques d'exploitation minière telles que les mines à ciel ouvert ou les mines à déplacement de sommet[100], avec des techniques de traitement des terres rares par lixiviation en tas. La lixiviation en tas, correspond au même principe d'exploitation (dissoudre les métaux recherchés par le passage de l'acide) que la lixiviation *in situ*, mais se fait sur des tas de stériles après l'extraction du minerai. Cette technique présente l'avantage d'avoir une gestion de la circulation des fluides facilitée par rapport à la lixiviation *in situ*, mais demande une surface d'exploitation plus importante et a donc provoqué une déforestation et un impact sur la topographie importants (Entretien 2, 2016). À partir de juin 2011, le gouvernement chinois a interdit la technique de la lixiviation en tas (X. J. Yang et al., 2013) pour arrêter les impacts majeurs de cette exploitation en termes de déforestation et de changement d'usage des terres (Entretien 2, 2016). Ce qui a de fait instauré la technique du lixiviation *in situ* comme la technique d'exploitation la plus utilisée pour l'exploitation des argiles ioniques. Cependant, cette décision est pour le moins controversée d'un point de vue environnemental (X. J. Yang et al., 2013). En effet, si cette technique permet d'éviter l'excavation massive de sols et la déforestation, elle induit une contamination des eaux et des sols à long terme comme vu au paragraphe iii.

2.1.2. Enjeux sanitaires et sociaux

i. Métaux lourds dans le sud de la Chine

Il n'existe pas à la connaissance de l'autrice d'études d'impacts sanitaires de la pollution aux métaux lourds liée à l'exploitation des terres rares dans les gisements d'argiles ioniques. Les évaluations sont d'autant plus difficiles que l'exploitation des terres rares dans les argiles ioniques consiste en

[100] Les mines à déplacement de sommet sont une forme d'exploitation minière à ciel ouvert, dans laquelle la mine se situe au sommet ou sur la crête d'une montagne. On procède préalablement au déblaiement des stériles de couverture (voir tableau 7, chapitre 1) afin d'exposer le gisement sous-jacent. L'excès de roche et de terre est déversé dans les vallées voisines, remblayant les cours d'eaux etc.

une myriade de petites exploitations sur un large territoire, souvent informelles. Il a été estimé (Su, 2009 in Liao, He, Liu, & Wang, 2014) que près de 1000 tonnes d'eaux usées contenant du sulfate d'ammonium et des métaux lourds sont générées pour produire une tonne d'oxyde de terres rares à partir de l'exploitation des argiles ioniques par lixiviation *in situ* et lixiviation en tas. De plus, des niveaux élevés de manganèse, plomb (métal responsable entre autres du saturnisme, voir chapitre 1) et zinc ont été mesurés dans le sol et la végétation à proximité d'un site de résidus (Liao et al., 2014).

ii. Radioactivité dans le nord de la Chine

Le thorium rejeté lors de l'exploitation de la monazite et de la bastnaésite à Baiyun Ebo « est un élément faiblement radioactif mais dont la chaîne de désintégration produit un isotope du radon émetteur alpha facilement inhalable et présentant un risque radiologique important. Les minéraux et résidus de traitement à thorium sont donc considérés comme des déchets radioactifs, avec les problèmes de stockage associés » (BRGM, 2015, p. 100). La publication de Clark et Zheng (Table 7 in Clark & Zheng, 1991) montre que, dans la zone Ouest du gisement, le minéral porteur de terres rares est la monazite très majoritairement, la zone Est et la zone principale étant plus riches en bastnaésite. Or la monazite présente une concentration d'oxyde de thorium (ThO_2) plus élevée, 0,26% en moyenne, comparée à la bastnaésite (de 0,02 à 0,28%) (Clark & Zheng, 1991), ce qui annonce avec l'ouverture de la mine Ouest depuis 2006 une augmentation à venir du problème de pollution au thorium.

Malheureusement, il existe peu d'études disponibles sur l'exposition des travailleurs et de la population locale à la radioactivité liée aux activités minières et métallurgiques. Ainsi Sprecher et ses collaborateurs notent que si la question des déchets radioactifs liés aux terres rares est une question importante, le manque de données sur le sujet rend très difficile la caractérisation de l'impact de la radioactivité sur le site (Sprecher et al., 2014). L'étude de Qifan qui s'intéresse à l'exposition externe conclut que les doses maximales annuelles prescrites par l'OMS ne sont pas dépassées pour les travailleurs et la population environnante, excepté pour les habitations construites avec des scories de la production du fer. Cependant, cette étude ne prend pas en compte l'exposition interne liée à l'inhalation de particules radioactives alors qu'il est connu que, dans le traitement de la monazite, de la poussière de monazite se dépose dans les poumons, ce qui se traduit par une irradiation à long terme du tissu pulmonaire par des particules alpha (Findeiß & Schäffer, 2017).L'exposition à long terme aux poussières de minerai a fait l'objet d'études qui ont montré que les travailleurs des zones minières fortement exposées à la poussière présentaient un risque accru de charge pulmonaire, même si une différenciation entre les effets des substances cancérogènes ThO_2, SiO_2, des particules de poussière et les effets accrus d'une exposition chronique aux rayonnements gamma n'a pas été possible (Findeiß & Schäffer, 2017). L'étude de Qifan ne prend pas non plus en considération l'exposition liée à la consommation d'eau et de produits agricoles contaminés. Or, le stockage inapproprié des déchets et l'absence de protection contre les émissions autour de la mine ont conduit à la contamination du bétail et des pâturages, comme l'a montré l'analyse d'échantillons d'os de mouton, de pâturages, de sols de prairies et d'échantillons de profondeur de sol différents (Findeiß & Schäffer, 2017). De plus les scénarii d'exposition (nombres d'heures passés sur le site par jour) ne sont pas justifiés par des données réelles, mais par de simples hypothèses (Qifan et al., 2010). D'après Sun Qinghong (Xiao, 2019), directeur adjoint du Laboratoire de recherche sur la radioprotection de l'Institut chinois de radioprotection, la dose absorbée au niveau du parc à résidus est significativement différente de celle du sud de la ville de Baotou.

Enfin, s'il n'existe pas d'étude épidémiologique complète sur le sujet, on notera qu'un total de 66 décès par cancer liés aux opérations industrielles des terres rares ont été officiellement enregistrées de 1993 à 2005 (Gardner, 2012).

iii. Conditions de travail

La mine de Baiyun Ebo et les activités métallurgiques, y compris pour le fer, emploient directement environ 20 000 employés (Xu & Shi, 2005).

Comme cela a été vu au chapitre 1, un des problèmes sanitaires courants du travail dans le secteur minier et métallurgique est la pneumoconiose, qui est un problème de santé d'ampleur et dont les chiffres varient d'un auteur à l'autre, cela étant notamment dû à l'absence de diagnostic des travailleurs (Entretien 7, 2016). Il n'existe pas à la connaissance de l'autrice d'études disponibles sur le sujet à Baiyun Ebo.

Concernant la rémunération des travailleurs, le salaire des travailleurs du secteur minier en zone urbaine en 2011 est estimé par le gouvernement chinois à 44 196 yuan/an (National Bureau of Statistics of China, 2011), ce qui correspond à 3 683 yuan/mois. Le *living wage* le plus bas calculé pour la Chine par la Global living wage coalition selon la méthode d'Anker pour la zone urbaine de Chengdu en aout 2015 (Chuanbo & Xingyue, 2015) s'élève à 2 634 yuan/mois. Les salariés de la mine sont donc en moyenne au-dessus de ce *living wage*, calculé pour une petite agglomération (environ 9 millions d'habitants). En revanche pour une grande (24 millions d'habitants et 70,5 millions pour l'agglomération) et riche (2ème ville chinoise en PIB par habitant) comme Shanghai, les travailleurs des mines seraient en dessous du *living wage* : 4 136 yuan/mois. Cependant, même si les chiffres du National Bureau of Statistics of China (National Bureau of Statistics of China, 2011) n'indiquent pas si les 5,5 millions de travailleurs dans les mines chinoises sont dans les zones rurales ou urbaines, il est raisonnable d'estimer qu'ils travaillent en zone rurale (Lu & Lora-Wainwright, 2014) ou dans des villes dont l'activité est dédiée à la mine. Et de ce fait que le coût de la vie est plus proche d'une petite ville comme Chengdu. Cependant, il est peu probable que les chiffres officiels de rémunération des ouvriers du secteur minier reflètent la situation réelle des travailleurs. En effet comme cela a été souligné au chapitre 1, la situation des travailleurs dans le secteur minier en Chine est marquée par des salaires non-payés, l'appel à des travailleurs intérimaires (« Employment and Wages », 2015), l'absence de contrat de travail (Taylor, 2012) et l'appel à des travailleurs migrants (au sens d'une autre région de la Chine) dont le statut est particulier et tend à la précarité (Bhattacharyya, 2015; National Health Commission of the People's Republic of China, 2016) : avec le système Hukuo les Chinois sont attachés à leur ville de départ et perdent leur droit à la propriété et l'accès aux services sociaux en migrant dans une autre région. Ainsi, les travailleurs migrants doivent payer des frais conséquents en plus des frais liés à leur déplacement pour avoir accès aux services de santé et sociaux (« Employment and Wages », 2015).

iv. Secteur informel

Comme vu précédemment, la production de terres rares chinoises est réputée pour faire l'objet d'une exploitation illégale et d'une contrebande, particulièrement concentrée dans les exploitations d'argiles ioniques du sud. En effet, le contexte politique des provinces du sud-est et la nature du gisement (le gisement étant en surface, son exploitation demande donc moins d'équipement) font que les argiles ioniques sont particulièrement concernées par l'exploitation illégale du minerai. Ces exploitations seraient gérées par des « gangs », qui intimideraient la population locale qui se plaint de la pollution déversée dans les rivières (correspondant probablement aux boues issues de la lixiviation) (Bradsher, 2010b). L'illégalité a donc un double effet négatif : d'une part elle prive le gouvernement chinois des revenus que devraient rapporter ces ressources via les taxes appliquées à la production des terres rares, et d'autre part elle aggrave les impacts environnementaux (pollutions de l'eau, des sols, déforestation) et sociaux (conditions de travail dans les mines) des exploitations.

v. Usage des terres

Pour les argiles ioniques, avec les anciennes techniques de lixiviation en tas et de mine à déplacement de sommet, il est estimé que pour une tonne de terres rares, 300 mètres carrés de

végétation et de la couche arable du sol étaient enlevés, et que 2000 tonnes de stériles étaient disposées dans les vallées adjacentes et dans les cours d'eau (Su, 2009 in X. J. Yang et al., 2013). Ce qui s'est traduit par de grands changements de topographie et de capacité de drainage, induisant une augmentation sans précédent des inondations (X. J. Yang et al., 2013). La dégradation et les changements d'usage des terres dans le sud de la Chine sont attribués en majeure partie à l'exploitation des terres rares lourdes, ayant causé des pertes irréversibles dans les écosystèmes et une sévère érosion des sols (X. J. Yang et al., 2013). Rien que dans le district de Ganzhou la déforestation serait passée de 23 km^2 en 2000 à 153 km^2 en 2010 (X. J. Yang et al., 2013). L'utilisation de la technique de lixiviation *in situ* a ensuite réorienté ces impacts vers la pollution des sols (la solution de lixiviation est attirée dans les sols par capillarité) et les glissements de terrains (X. J. Yang et al., 2013). A Ganzhou plus de 100 glissements de terrains en lien avec l'exploitation en lixiviation *in situ* ont été recensés (X. J. Yang et al., 2013).

A Baiyun Ebo, l'emprise des mines est aujourd'hui d'environ 48km^2 (B. Zhou et al., 2017), le principal parc à résidu à proximité fait 12km^2 , et la contamination direct du sol aux radionucléides autour de ce parc est estimée à 47 km^2 (R. Li et al., 2014). Les sols enlevés par l'exploitation minière ou directement pollués serait donc au moins de 108 km^2 (soit une superficie supérieure à la surface de Paris). D'après Wang Jianying (Xiao, 2019), aujourd'hui environ 40 000 m^2 d'étendues de terres autrefois cultivées sont contaminées et presque toutes abandonnées. De plus la pollution ayant atteint les eaux souterraine, les animaux et la végétation de la région environnante (Hurst, 2010; Schüler et al., 2011), il faudrait calculer l'emprise environnementale indirecte de la mine. Concernant cette emprise, toujours d'après Wang Jianying (Xiao, 2019), les eaux souterraines ne peuvent plus être utilisées pour irriguer ou être consommées par les humains et les animaux. Cette contamination de l'eau et des terres concerne plus de 7 villages, soit plus de 3 000 personnes.

En plus de l'impact direct lié à l'emprise de la mine et des impacts liés à la pollution vient s'ajouter le déplacement des éleveurs mongols qui étaient installés dans la région avant le début de l'industrialisation de Baotou. Selon l'organisation SMHRIC[101], des dizaines de millions de personnes ont été déplacées en Mongolie intérieure, au Xinjiang et au Tibet à cause du boom des projets miniers non régulés et de la construction de barrages de grande ampleur en Chine. Selon l'association ces projets sont régulièrement approuvés sans la participation des communautés locales (« Ethnic Mongolian Family on Hunger Strike in Protest Over China's Rights Abuses », 2015). Selon le SMHRIC, depuis 2006 les éleveurs mongols (en Mongolie intérieure) ont manifesté contre les expropriations et ventes de terrain par le gouvernement chinois, contre la destruction des aires de pâturages des éleveurs par les mineurs et militaires, et pour dénoncer l'absence de compensations appropriées destinées aux éleveurs mongols affectés (SMHRIC, 2015). Enfin le SMHRIC estime qu'au moins 160 000 Mongols ont été expulsés de force de leurs pâturages traditionnels au cours des dernières décennies. Les activistes locaux accusent également les entreprises chinoises d'endommager l'écosystème fragile de la région, tandis que les autorités locales imposent des interdictions de pâturage pour prévenir la désertification (« Ethnic Mongolians Protest Loss of Traditional Grazing Lands Outside Banner Government », 2016).

[101] *Southern Mongolian Human Rights Information Center*

vi. Conflits sociaux dans les usines

Il s'agit ici de souligner un cas de conflit social relaté par la presse et les ONGs concernant les conditions de travail dans une usine d'Hitachi. Cette entreprise produit des aimants, cependant il est à noter que le conflit en question a eu lieu dans l'usine d'Hitachi Metals Panyu Factory situé à Guangzhou qui produit des noyaux en ferrite douce (ainsi que des transformateurs et des bobines) et non des aimants Nd-Fe-B. Cet exemple permet néanmoins d'illustrer ici le type de problématiques liées aux conditions de travail dans les usines de fabrication d'aimants.

Hitachi Metals est une entreprise à part entière dans la banlieue sud de Guangzhou dont le fonctionnement s'était fait sans syndicat depuis sa création en 1997. Suite à une lésion grave subie lors d'un accident de travail par un travailleur en avril 2013, un mouvement social s'est mis en place. C'est dans ce contexte que Zhu Xiaomei, une repésentante des salariés pour les droits des travailleurs à l'usine Hitachi Metals à Guangzhou et qui a fait pression pour la création d'un syndicat dans l'entreprise, a été licenciée en janvier 2014. Zhu Xiaomei avait été la cible de représailles à partir du moment où elle avait défendu les droits des travailleurs à l'usine au début du mouvement social de 2013 (« Hitachi sacks worker activist who lobbied for trade union », 2014). Zhu Xiaomei a ensuite organisé une grève réclamant la hausse des salaires, toujours en 2013. Depuis son licenciement, elle a milité dans des associations de soutien aux travailleurs (« Chine : Liberté pour les défenseurs des droits des travailleurs et des travailleuses ! », 2015). En mai 2013, l'association « Sunflower Women Workers » a aidé 300 travailleurs à obtenir d'Hitachi leur compte d'assurance sociale, impayé. Peu de temps après l'intervention de « Sunflower Women Workers » dans le conflit des travailleurs avec Hitachi, « Sunflower Women Workers » a été notifiée par les pouvoirs publics d'une obligation de déplacer leurs locaux. En 2015, l'ONG active depuis 3 ans dans la défense des droits des travailleuses et basée dans la province du Guangdong a été sommée par le bureau des affaires civiques locales de se " désenregistrer " (Jennifer Zhang, 2015). En 2016, Zhu Xiaomei a été arrêtée et placée quelques mois en détention avant d'être relâchée. Cet exemple illustre les pressions et intimidations que peuvent recevoir les travailleurs et travailleuses dans le cadre de conflits sociaux pour la défense de leurs droits fondamentaux.

2.1.3. Lien entre les enjeux sociaux et environnementaux et la problématique de l'épuisement

Les principaux enjeux sociaux et environnementaux de la production des terres rares, étape la plus impactante de la production des aimants Nd-Fe-B ont ainsi été identifiés. Ces enjeux sont liés plus ou moins directement aux pertes de matières ayant lieu pendant la production et à la diminution des teneurs de l'exploitation comme le synthétise la Figure 38. Ainsi, comme cela a été vu au chapitre 1, les meilleures parties du gisement étant exploitées en premier, la teneur des gisements a tendance à diminuer au fur et à mesure de l'exploitation. Pour une quantité de produit de la mine constante, il faut donc exploiter de plus en plus de minerai, ce qui conduit à l'augmentation des déchets miniers et à l'utilisation d'une quantité d'intrants croissante. Cela explique l'augmentation des impacts en termes de changement climatique et d'acidification, sur la droite de la Figure 38. De plus, comme l'a souligné la description des enjeux, la production et le stockage des déchets miniers (dans le cas de Baiyun Ebo) ou le déversement des déchets (dans le cas des argiles ioniques) sont à l'origine de nombreux impacts environnementaux, sanitaires et sociaux comme la pollution de la ressource en eau, les conflits liés à l'usage des terres et la contamination des sols, de l'eau et de l'air aux métaux lourds (dans le cas des argiles ioniques) et des radionucléides (dans le cas de Baiyun Ebo). Enfin, les pertes de matières liées à l'inefficience des procédés utilisés (comme cela est montré dans le paragraphe suivant) viennent augmenter l'extraction nécessaire pour répondre à la demande en terres rares et augmentent le volume de déchets à stocker.

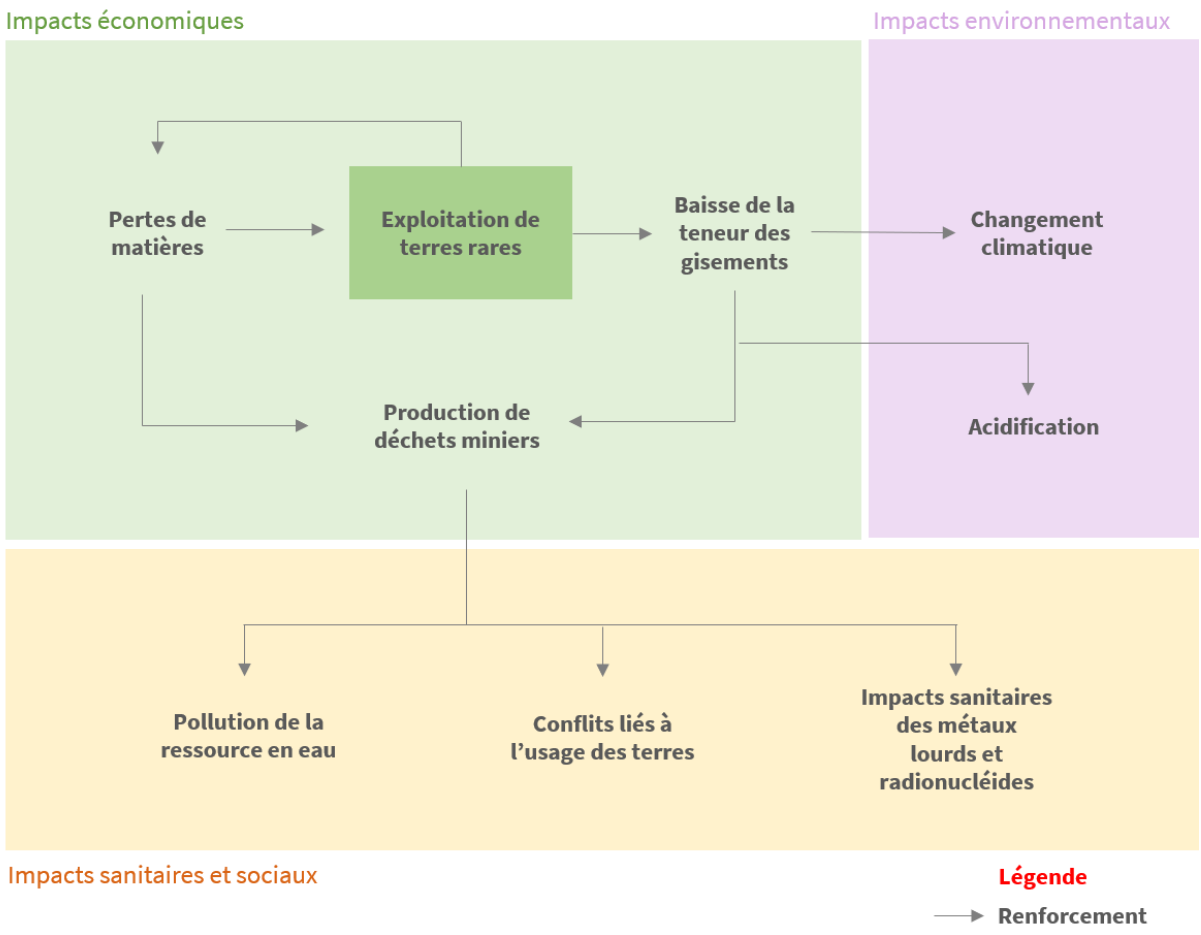


Figure 38 : Lien entre les facteurs d'épuisement et les enjeux sociaux et environnementaux pour le cas des terres rares. Source : autrice

Les déchets constituent donc un enjeu charnière ou « intermédiaire » entre les facteurs contribuant à l'épuisement et les enjeux sanitaires et environnementaux de la production, ainsi que les enjeux sociaux liés à l'usage des terres. Il est donc proposé pour l'évaluation des coûts sociaux de se concentrer sur la problématique des déchets miniers, un enjeu intermédiaire, directement influencé par les dynamiques d'épuisement et jouant directement sur la création des impacts sociaux, environnementaux et sanitaires. Cela conduit à ne pas prendre en compte les autres coûts sociaux de la chaîne de valeur : changement climatique, acidification, mauvaises conditions de travail, secteur informel, déplacement de population et conflits sociaux.

Cette section nous a donc permis de montrer que la chaîne de valeur néodyme-fer-bore présentait de nombreux enjeux sociaux, sanitaires et environnementaux. Ces enjeux présentent des similitudes avec les enjeux généraux de la production minière métallique tels que présentés dans le chapitre 1 (importance de la question des déchets miniers, pollution aux métaux lourds et radionucléides, conditions de travail), mais également des spécificités (forte présence du secteur informel, enjeux liés au contexte locale de la province autonome de Mongolie extérieur). La synthèse des enjeux souligne également la difficulté à obtenir des données de terrain en Chine sur ces questions, en particulier sur les aspects sociaux et sanitaires.

2.2. Évaluation des coûts sociaux des déchets miniers et de leur lien avec la dynamique d'épuisement de la ressource

La synthèse des principaux enjeux sociaux et environnementaux liés à la chaîne de valeur du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B a souligné le caractère central de la problématique des déchets miniers et la difficulté à réunir des données sur les dommages sociaux et sanitaires de l'exploitation. Il est donc proposé pour l'évaluation des coûts sociaux de se concentrer sur la problématique des déchets miniers, un enjeu charnière ou intermédiaire, directement influencé par les dynamiques d'épuisement et jouant directement sur la création des impacts sociaux, environnementaux et sanitaires.

Cette évaluation des coûts sociaux liés aux déchets miniers est faite sur la mine de Baiyun Ebo pour laquelle les données sont plus disponibles que pour les argiles ioniques et qui est la plus grosse production de terres rares au monde.

Dans le chapitre 2, il a été vu que l'évaluation des coûts de dommages était à privilégier par rapport à l'évaluation des coûts d'abattement / atténuation. Cependant, comme cela a été vu dans le paragraphe 2.1., pour évaluer les coûts de dommages liés aux impacts de la production et du stockage des résidus miniers contenant des polluants, il n'existe pas à la connaissance de l'autrice d'études fiables sur les impacts environnementaux et sanitaires des polluants émis par ces déchets. Seuls les impacts potentiels et/ou probables de ces déchets peuvent être listés et estimés un à un. Dans ce cas précis, l'évaluation des coûts de dommages devient donc hasardeuse puisqu'elle reviendrait à évaluer le coût potentiel sur la base d'estimations d'impacts potentiels. Un tel procédé démultiplierait les incertitudes liées aux résultats et détournerait l'étude de cas d'une évaluation au plus près des dépenses réelles.

En revanche, il est possible d'évaluer les coûts d'abattement (comment régler le problème du parc à résidus), d'atténuation (comment mieux gérer cette problématique des déchets) et de prévention (comment prévenir la formation d'une telle quantité de déchets). Cette évaluation ne nécessite pas d'estimer les impacts potentiels et/ou probables environnementaux et sanitaires des polluants émis par ces déchets. Comme souligné dans le chapitre 2, cela correspond à une sous-estimation des coûts liés à la pollution des déchets miniers puisque la pollution a déjà été dispersée en partie et a déjà provoqué des dommages irréversibles sur l'environnment et la santé des habitants. De plus, la suppression de la principale source de pollutions (les résidus et les stériles) ne supprimera pas les éventuelles sources secondaires (pollution accumulée dans l'environnement à la suite de la dispersion des déchets). Il s'agit donc d'une estimation *a minima*.

La modélisation est construite en trois temps. Dans un premier temps est proposé d'étudier l'évolution des teneurs et de la production minière au cours du temps à Baiyun Ebo et de consolider un modèle de production historique de cette mine afin d'évaluer quelles sont les dynamiques d'épuisement à l'œuvre. Dans un deuxième temps sera proposée une modélisation de l'évolution de la production de déchets basée sur le modèle de production, permettant une évaluation de la pollution au thorium dans les déchets et des déséconomies de terres rares dans les déchets. Enfin, une évaluation des coûts sociaux liés à ces déchets est proposée pour 2016 et pour différent scénarii de gestion de la pollution. L'ensemble des formules, variables et constantes utilisées dans cette partie sont synthétisées en Annexe 6.

2.2.1. Cadre de l'analyse, les coûts sociaux de Kapp

Les coûts sociaux sont évalués selon la typologie mise en place au chapitre 2 se basant sur le travail de K.W.Kapp (W. Kapp, 1963). Ainsi, ce paragraphe s'intéresse à l'augmentation des coûts sociaux des déchets en fonction des dynamiques d'épuisement de la ressource, aux dépenses publiques liées à la prévention de l'impact économique de l'épuisement, et aux déséconomies. Pour rappel, le

terme de coût social chez Kapp peut aussi bien faire référence à des coûts sociaux, qu'environnementaux ou sanitaires.

Pour évaluer la part de l'augmentation des coûts sociaux des déchets attribuable à l'épuisement des ressources, il s'agit d'abord d'évaluer les facteurs d'épuisement de la ressource.

Ces facteurs ont été définis dans le chapitre 1 comme la perte de quantité (déséconomies) et de qualité (diminution des teneurs du gisement et difficultés du recyclage) de la ressource au fur et à mesure de son utilisation dans notre économie, ils seront évalués en deux temps. Tout d'abord, la baisse de qualité de la ressource est traitée à travers la baisse de la teneur sur le site d'exploitation de Baiyun Ebo (paragraphe 2.2.2). La baisse de qualité des ressources secondaires n'est pas traitée ici, l'étude de cas se concentrant sur l'amont de la chaîne. Ensuite, la perte de quantité est traitée à travers les déséconomies de ressources en terres rares évaluées dans le paragraphe 2.2.4. Sur la base de l'évaluation de ces facteurs d'épuisement et de l'évaluation des coûts sociaux des déchets, la part de ces coûts attribuable aux dynamiques d'épuisement est donc évaluée au paragraphe 2.2.4.

Les déséconomies sont considérées dans le cadre d'analyse de cette thèse en même temps comme un facteur direct de l'épuisement physique et comme un coût social au sens de Kapp et sont présentées comme telles au paragraphe 2.2.4

Enfin, en ce qui concerne les dépenses publiques, une discussion sur la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement et la part des dépenses publiques est présentée au paragraphe 2.2.4 (xi.), sans qu'il ait été possible de présenter une évaluation quantitative.

2.2.2. Quantification de la diminution de la teneur du gisement et de la production minière à Baiyun Ebo

Dans ce paragraphe est proposé un modèle d'évolution des teneurs et de la production minière à Baiyun Ebo. Les objectifs de ce paragraphe sont de tester l'hypothèse d'une diminution des teneurs d'exploitation au cours du temps à Baiyun Ebo et de consolider un modèle de production historique qui permettra dans le paragraphe suivant d'établir la production de déchets miniers à Baiyun Ebo.

Au niveau mondial, les réserves[102] de terres rares ont une teneur[103] moyenne d'environ 0,8%, ce qui est faible ((Fouquet and Martel-Jantin, 2014 ; Liang et al., 2014) in Navarro & Zhao, 2014), mais qui avoisine les teneurs actuelles d'exploitation de certains grands métaux, comme le cuivre, dont les teneurs moyennes dans les réserves actuelles sont d'environ 0,5% (Northey, Mohr, Mudd, Weng, & Giurco, 2014). Cette teneur moyenne en terres rares regroupe des réalités différentes selon les gisements et les minéraux exploités (monazite, bastnaésite, argiles ioniques). Dans ce paragraphe sont regroupées les principales sources de la littérature concernant les teneurs en oxydes de terres rares du gisement de Baiyun Ebo, principale source de terres rares en Chine avec environ 60% de la production nationale, afin d'établir l'évolution au cours du temps des teneurs de cette exploitation et de tester l'hypothèse d'une diminution.

Il convient cependant de rappeler que ces données sont à prendre avec précaution. Tout d'abord, les teneurs en oxydes de terres rares ne sont pas équivalentes aux teneurs en oxyde de néodyme[104]. Cependant, il est fait l'hypothèse qu'à l'échelle d'un gisement (Baiyun Ebo ou argiles ioniques) les

[102] Pour les définitions de réserve, ressource et gisement, se référer au tableau 1 du chapitre 1.

[103] Pour les termes concernant la teneur se référer au tableau 7 du chapitre 1.

[104] En effet, il existe différents minéraux contenant les 17 terres rares dans des proportions variées (voir Annexe 2), les gisements présentant eux-mêmes différentes proportions de ces minéraux. Selon les types de gisement les proportions entre les différentes OTR ne sont donc pas stables. Par exemple, les gisements contenant des argiles ioniques ont une proportion plus forte en terres rares lourdes que le gisement de Baiyun Ebo contenant des minéraux tels que la monazite et la bastnaésite. De plus, il est possible que la répartition des différents minéraux au sein du gisement soit inégale, conduisant donc à une instabilité des proportions d'OTR trouvées au fur et à mesure de l'exploitation.

proportions entre terres rares restent les mêmes, et que la baisse de la teneur en terres rares reste un bon indicateur de la baisse de la teneur en néodyme. Ensuite, les données publiées dans des articles scientifiques sur les teneurs en OTR des gisements chinois sont en générales issues de la CSRE, ou d'acteurs affiliés à la CSRE, et donc potentiellement liées à la stratégie du gouvernement chinois. En effet,la CSRE est sous la direction du Parti communiste chinois (The Chinese Society of Rare Earths, 2018). Or, de manière générale, les données sur les teneurs et leur évolution sont des données stratégiques pour les acteurs économiques (elles peuvent indiquer la fermeture prochaine d'une mine, ou l'abondance de la ressource). De plus, les terres rares en Chine constituant un levier économique important pour l'industrie, et à plus grande échelle un levier de négociation important pour le gouvernement chinois dans les relations extérieures, il est possible que les données soient communiquées de manière partielle ou que la baisse des teneurs soit minimisée (pour maintenir l'idée que la Chine est destinée à rester incontournable dans la production mondiale des terres rares), ou, moins vraisemblablement, exagérée (pour provoquer une augmentation des prix).

Pour donner un aperçu de l'évolution des teneurs au fur et à mesure de l'exploitation du gisement de Baiyun Ebo, les publications suivantes ont été passées en revue et ont été croisées avec les entretiens réalisés en 2016 : (Castor & Hedrick, 2006; Drew, Qingrun, & Weijun, 1990; Golev, Scott, Erskine, Ali, & Ballantyne, 2014; Gupta & Krishnamurthy, 2005; Navarro & Zhao, 2014; Orris & Grauch, 2002; Schreiber et al., 2016; D.A. Singer, 1998; Sprecher et al., 2014; Wübbeke, 2013; Xu & Shi, 2005; Zhongxin, Ge, Chenyu, Zhongqin, & Xianjiang, 1992). Cela a permis d'établir un modèle des teneurs du minerai exploité à Baiyun Ebo au cours du temps de 1958 à 2016. Ce modèle permettra d'une part de tester l'hypothèse d'une diminution de la teneur, et d'autre part d'utiliser ces informations pour tester une potentielle corrélation entre diminution des teneurs et coûts socaux liés aux déchets dans la partie suivante.

i. Situation initiale

D'un point de vue géologique, pour simplifier[105], la partie du gisement ayant un intérêt économique peut être décrite comme une zone dolomitique s'étirant sur un axe Est-Ouest sur une longueur de 18 km, une largeur de 2 km et d'une épaisseur d'environ 1km (Gupta & Krishnamurthy, 2005). Dans ce gisement peuvent être distinguées trois zones principales : le gisement principal, le gisement Est et le gisement Ouest (Gupta & Krishnamurthy, 2005). Souvent les zones Est et principale sont regroupées par les auteurs, donnant deux grandes parties : la zone principale-Est (PE) et la zone Ouest. La zone Ouest du gisement est moins concentrée en terres rares, la teneur en fer est à peu près constante sur tout le gisement comme le montre le Tableau 30.

L'exploitation minière s'est donc faite selon ce découpage en deux zones principales, une mine Principale-Est exploitée depuis la mise en service de Baotou Iron and Steel Group en 1958 (Xu & Shi, 2005)[106], bien qu'à cette époque les terres rares n'étaient pas encore valorisées, et une mine Ouest exploitée depuis mai 2006 (Qifan et al., 2010)

Pour le modèle, il est considéré que l'expoitation des terres rares commence en 1980 (Argall, 1980), bien que les premiers essais industriels aient commencés dans les années 1970 (Qi, 2018) et qu'il n'y ait pas de données de production avant 1983 (Clark & Zheng, 1991).

[105] Simplification, car Zhongxin et ses collaborateurs (Zhongxin, Ge, Chenyu, Zhongqin, & Xianjiang, 1992) décrivent en 1992, dans une publication encore citée aujourd'hui (Castor & Hedrick, 2006; Schreiber et al., 2016), la géologie du site qui est en réalité plus complexe : composée principalement de trois groupes de roches dans l'ordre croissant : des grés fins à moyens avec quartz et feldspath ; des marbres dolomitiques intercalés avec des roches feldspathiques, des roches à biotites et de l'ardoise ; et enfin des roches feldspathiques, roches à biotites et ardoise (Zhongxin et al., 1992). Clark et Zheng vont même jusqu'à dénombrer 16 corps minéralisés intermédiaires dans le gisement ouest (Clark & Zheng, 1991).

[106] Bien que certains auteurs datent le début de l'exploitation en 1927, date de découverte du gisement (Jordens, Cheng, & Waters, 2013)

Il est fait l'hypothèse que les mines Principale et Est contribuent à parts égales à la production, chacune à 50% de la production de Baiyun Ebo, ce qui équivaut à considérer ces deux mines comme une seule : la mine PE. Cette hypothèse influence uniquement le calcul des teneurs d'exploitation pour les années où la teneur d'exploitation est donnée dans la littérature : pour les années où on a une teneur détaillée pour la mine Principale et la mine Est, la moyenne des deux est prise.

Tableau 30 : Teneurs moyennes et ressources initiales du gisement de Baiyun Ebo en 1958 avant exploitation

En rouge les résultats de calculs réalisés par l'autrice à partir des données de Xu et Shi
*Dans ce tableau les teneurs sont des teneurs moyennes du gisement : **Teneur moyenne initiale du gisement** = Masse totale OTR dans le gisement / Masse totale ressources initiales minerai contenant OTR = 35/1400=2,5%*

		1958
Source information		(Xu & Shi, 2005)
Teneur OTR (%)	**Teneur moyenne initiale du gisement de Baiyun Ebo**	**2,50**
	Gisement principal	5
	Gisement Est	
	Gisement Ouest	0,625
Teneur Thorium (%)	Gisement principal-Est	0,032
Teneur en Fer (%)	Gisement principal-Est	34
	Gisement Ouest	33,15
Ressources initiales OTR (en millions tonnes)	**Ensemble des gisements de Baiyun Ebo**	**35**
	Gisement principal	30
	Gisement Est	
	Gisement Ouest	5
Ressources initiales minerai contenant des TR (en millions de tonnes)	**Ensemble des gisements de Baiyun Ebo**	**1400**
	Gisement principal	600
	Gisement Est	
	Gisement Ouest	800

Pour ce paragraphe, les informations données pour l'année 1958 dans la publication de Xu et Shi (Xu & Shi, 2005) sont prises comme situation initiale du gisement (Tableau 30), les teneurs étant des teneurs moyennes des différentes parties du gisement avant exploitation. Cette publication est prise comme référence, car c'est la plus précise dans sa description des ressources de terres rares dans le gisement et la seule à tenter de dresser un état initial avant exploitation[107]. L'ensemble du gisement

[107] Ainsi, certaines publications, moins précises que celle de Xu et Shi (Xu & Shi, 2005) ne font pas la différence entre les parties Ouest et principale-Est du gisement (Drew, Qingrun, & Weijun, 1990; Gupta & Krishnamurthy, 2005; D.A. Singer, 1998; Voncken, 2016) et surtout ne font pas une évaluation totale des ressources sur le gisement, mais plutôt une évaluation de type évaluation de réserves (voir chapitre 1). En effet, le chiffre de 800 millions de tonnes de réserves en minerai apparaissant dans plusieurs publications (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Voncken, 2016) semble calculé à partir d'une publication de 1990 (Drew et al., 1990) qui évoque en 1987 des réserves d'OTR de 48 millions de tonnes dans un minerai à 6% de teneur, ce qui donne l'évaluation suivante : Réserves de minerai = Réserves OTR/Teneur et donc 48Mt/6%=800Mt. Les réserves de minerai ont donc été calculées à partir de la teneur d'exploitation en 1987 (6%), et une estimation des réserves OTR (48Mt)

est composé de ressources initiales de 600 millions de tonnes de minerai pour le gisement principal-Est à 5% OTR et de 800 millions de tonnes de minerai pour le gisement Ouest (à 0,625% OTR (Xu & Shi, 2005). Ces ressources initiales sont une estimation des ressources totales en terres rares de ce gisement et ne changent donc pas au cours des variations des prix, technologies, etc. Autrement dit, les ressources initiales correspondent à ce qui s'approche le plus du concept de ressources physiques (voir chapitre 1).

Le Tableau 30 fait état d'une teneur moyenne du gisement de 2,5% (sur l'ensemble : partie principale-Est et partie Ouest) pour l'année 1958. Cette teneur est donc considérée comme la teneur moyenne initiale du gisement. Cet ordre de grandeur est confirmé dans une publication de 1991 qui fait état d'une teneur moyenne du gisement de 2,9% (Clark & Zheng, 1991).

ii. Définition de la teneur d'exploitation, PMin et POTR

La teneur d'exploitation (Teneur OTRn, voir Figure 39) est distinguée de la teneur moyenne du gisement (teneur de la partie du gisement non encore exploitée à l'année n)[108].

Ainsi, **Teneur OTRn** est la teneur moyenne d'exploitation de l'année n pour Baiyun Ebo, soit la masse d'oxydes de terres rares rapportée à la masse totale de minerai extraite pendant l'année n :

Teneur OTRn = (Masse d'oxydes de terres rares dans $PMin_n$) / $PMin_n$ = $POTR_n$ / $PMin_n$*Rdt OTR (1)

Avec :
n : une année entre 1980 et 2016 (c'est-à-dire que cette relation n'est valable que tant qu'il y a production d'OTR et non quand la mine avait une activité purement ferrifère)
$POTR_n$: production massique d'oxydes de terres rares de Baiyun Ebo pour l'année n
Rdt OTR : rendement du procédé permettant d'obtenir des OTR à partir du minerai de terres rares l'issu de l'extraction, du broyage, du tri, de la concentration, du traitement chimique et de la séparation
$PMin_n$: Production massique de minerai[109] de terres rares de Baiyun Ebo pour l'année n

comme si le gisement était uniforme et que l'ensemble du gisement était à 6%. C'est donc une estimation imprécise (puisqu'il y a deux parties du gisement à des teneurs bien différentes), mais qui donne des indications sur la teneur d'exploitation en 1987. De même l'évaluation de réserves de minerai de 750 Mt à 4,1% en 1998 (D.A. Singer, 1998) ne semble-t-elle pas tenir compte de la partie Ouest du gisement.

[108] Pour rappel, les définitions de minerai, gisement, ressources et réserves sont données au chapitre 1.

[109] Cette production de minerai n'inclut pas les stériles.

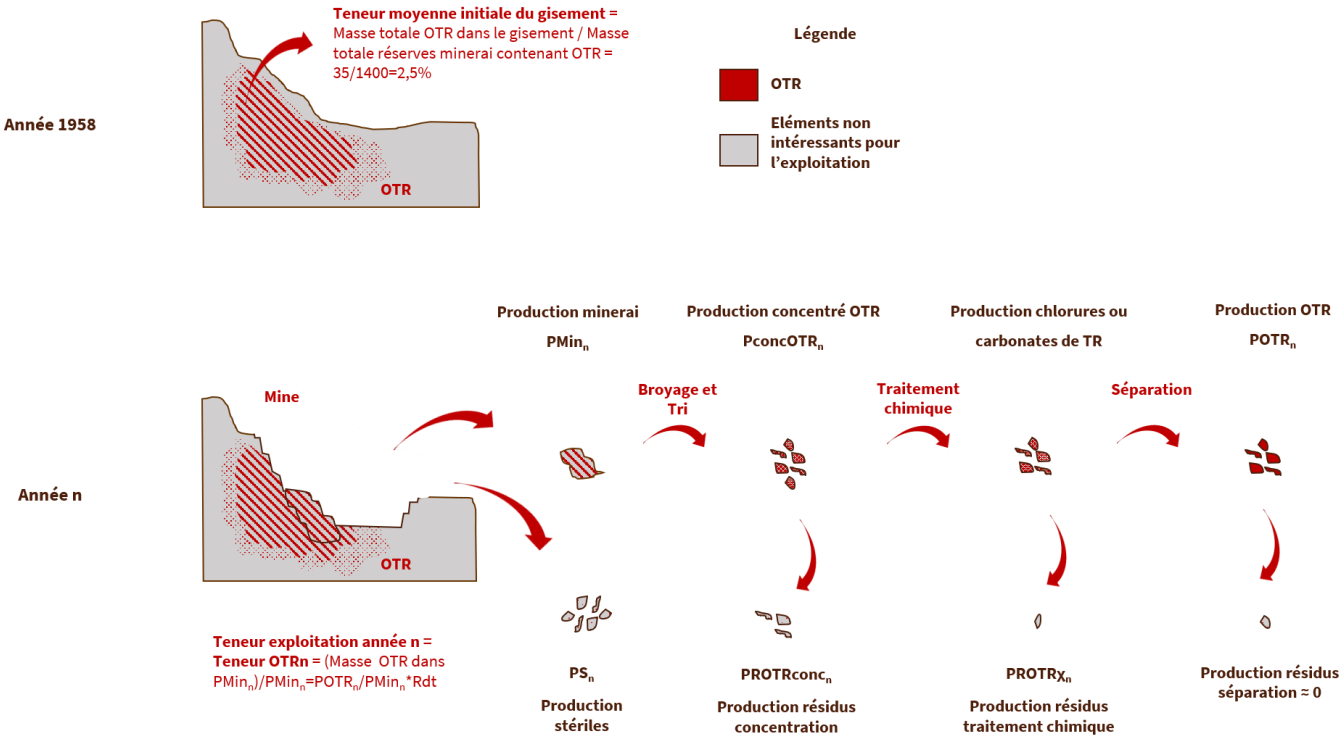


Figure 39 : Illustration du modèle diminution des teneurs. Source : autrice, d'après éléments graphiques ISF SystExt, 2014

iii. État des connaissances sur les teneurs d'exploitation

Les autres informations bibliographiques concernant l'évolution de la teneur d'exploitation à Baiyun Ebo au cours du temps sont regroupées dans le Tableau 31.

Tableau 31 : Synthèse bibliographique (de 1958 à 2016) de l'évolution au cours du temps des teneurs d'exploitation de la mine PE à Baiyun Ebo

En rouge les résultats de calculs réalisés par l'autrice à partir des données bibliographiques (voir texte ci-après pour explications détaillées)

	1980	1987	1992	1998	2004	2012
Source information	(Argall, 1980)	(Drew et al., 1990; Voncken, 2016; Gupta & Krishnamurty, 2005)	(Zhongxin et al., 1992)	(Singer, 1998)	(Norton & G. Groat, 2005; Xu & Shi, 2005)	(Ding et al. 2012)
Teneur d'exploitation de la mine PE (Teneur OTRn)	**5,68**	**6**	**5,295**	**4,1**	**5,795**	**5,083**
Teneur exploitation Mine Principale	6,19		5,41			
Teneur exploitation Mine Est	5,17		5,18			

Dans le Tableau 31, les teneurs d'exploitation sont soit reportées dans le tableau lorsqu'elles sont données telles quelles dans l'article, soit calculées à partir d'autres données fournies dans l'article. C'est le cas pour les années 1980, 1992, 2004 et 2012.

En 1980 (Argall, 1980) et 1992 (Zhongxin et al., 1992) la teneur moyenne d'exploitation de la mine PE a été calculée en faisant la moyenne des teneurs des mines Principale et Est :

En 2004 (Norton & G. Groat, 2005; Xu & Shi, 2005), la teneur moyenne de la mine PE a été calculée avec la formule (1) en sachant que :

- la production à Baiyun Ebo représentait 61% de la production chinoise (voir paragraphe v.) et que 95 000 tonnes d'OTR ont été produites en 2004 par la Chine d'après USGS (Norton & G. Groat, 2005), soit $POTR_{2004}$=95000*0,61 ;
- 10 millions de tonnes de minerai ont été exploitées cette année là à Baiyun Ebo d'après Xu et Shi (Xu & Shi, 2005), soit $PMin_{2004}= 10^7$;
- Le rendement sur le procédé d'obtention des OTR est de 10% (voir paragraphe vi.), soit Rdt=0,1 ;

La teneur d'exploitation de la mine PE en 2012 a été calculée de la même manière grâce à la formule (1) et sur la base des articles suivants (Y. Ding, Wang, Wang, & Xue, 2012; Jewell & Kimball, 2015; Xu & Shi, 2005).

iv. Régression sur la teneur d'exploitation

A partir de ces données sur la teneur d'exploitation (Tableau 31), une tendance d'évolution de cette teneur est établie (voir Figure 40). Entre 1980 et 2012, les teneurs évoluent légèrement à la baisse selon cette régression. Il s'agit d'une régression linéaire réalisée à partir des teneurs des années 1980, 1987, 1992, 1998, 2004 et 2012 pour lesquelles les données ont été trouvées dans la littérature. La régression choisie est une régression linéaire de la teneur en fonction du temps (Reglinetime), qui a été comparée avec une régression sur la production cumulée d'OTR du gisement de Baiyun Ebo. Or, la régression sur le temps correspond mieux aux données avec un meilleur coefficient de corrélation (R^2 = 0,1261), que la régression sur la production cumulée (R^2 = 0,0478)[110]. Cette corrélation est assez faible, mais la cohérence du modèle de teneur et de production sera vérifiée à travers d'autres facteurs.

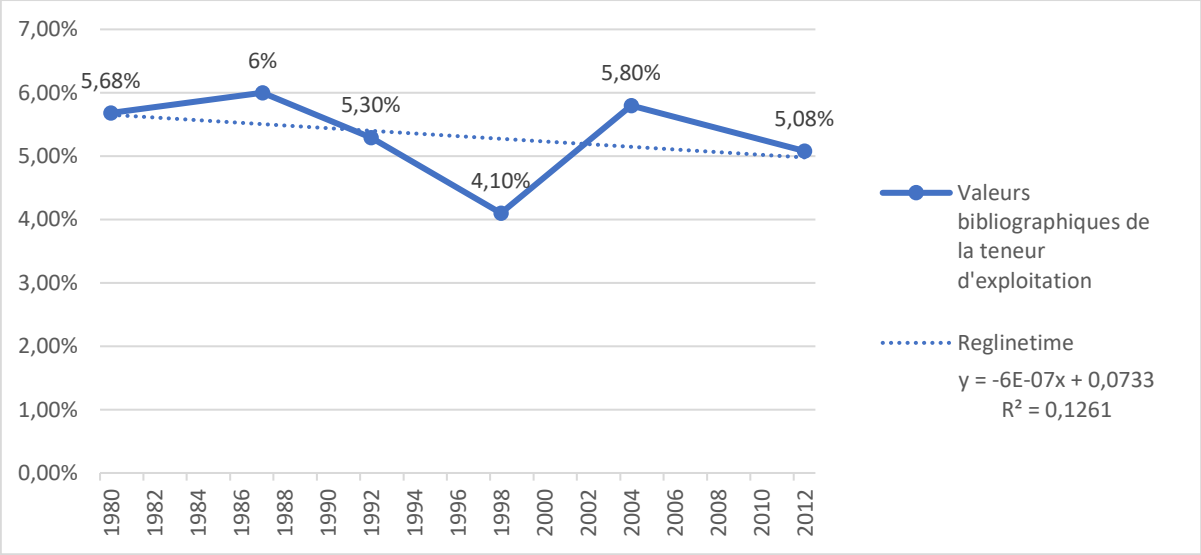


Figure 40 : Teneurs d'exploitation de Baiyun Ebo au cours du temps : données bibliographiques

[110] Ce résultat est contre-intuitif, car il est logique que la teneur diminue au fur et à mesure que les bonnes parties du gisement aient été exploitées, alors que la corrélation entre production et temps devrait être moins forte, car elle dépend de l'intensité de la production selon les années. Cependant, comme cela est discuté après la production cumulée à ce stade ne prend pas en compte plusieurs facteurs. Il faudrait donc faire une régression linéaire par rapport à la production cumulée corrigée pour obtenr un meilleur coefficient.

et régression linéaire. Source : autrice

v. Premier modèle de la production de minerai au cours du temps

L'étape suivante est d'obtenir l'évolution de la teneur du gisement au cours du temps. Pour cela, il s'agit d'obtenir PMin sur la durée. L'obtention de PMin est également nécessaire pour obtenir l'augmentation du volume de déchets au cours du temps et sa corrélation avec la teneur du gisement (voir paragraphe 2.2.3).

En effet, la teneur du gisement peut être exprimée ainsi :

$$\textbf{Teneur gisement OTR}_n = \frac{ROTR - \sum_n \mathbf{E\ OTR\ n}}{RMin - \sum_n \mathbf{PMin\ n}} = \frac{ROTR - \sum_n \mathbf{POTR\ n}/Rdt}{RMin - \sum_n [\,\mathrm{POTRn}\,/_{\mathrm{Teneur\ OTRn} * \mathrm{Rdt}}]} \qquad (2)$$

Avec :
ROTR : Les réserves en OTR du gisement (5 millions de tonnes pour le gisement Ouest et 30 millions de tonnes pour le gisement Principal-Est)
RMin : Les réserves en minerai du gisement (800 millions de tonnes pour le gisement Ouest et 600 millions de tonnes pour le gisement Principal-Est)
$EOTR_n$: masse d'OTR qui a été enlevée du gisement au cours du temps. Elle est différente de $POTR_n$ qui correspond à la quantité produite, disponible à Baiyun Ebo à la fin du procédé de production et est donc dépendante du rendement du procédé. On a donc $EOTR_n = POTR_n/Rdt$

Pour obtenir la production minérale ($PMin_n$) au cours du temps, la tendance de la teneur d'exploitation approximée par Reglinetime et la relation (1) sont utilisées :

$$\mathbf{PMin_n} = POTR_n \,/\, \text{Teneur } OTR_n * \text{Rdt OTR}$$

Avec :
Teneur OTR_n : approximée grâce à Reglinetime : Reglinetime = $(-6*10^{-7}*x) + 0{,}0733$
x : le codage excel de l'année n, c'est-à-dire le nombre de jours depuis le 1 janvier 1900.

Cette relation est valable si la production minière de Baiyun Ebo est intégralement utilisée sur place pour produire des oxydes de terres rares et que les exportations ne se font qu'à partir de l'obtention d'oxydes de terres rares (et non dans des étapes intermédiaires). Ceci est une hypothèse forte, car environ un tiers des concentrés de terres rares étaient exportées en dehors de Baotou en 2010 (Qifan et al., 2010). Il est considéré ici que cette information ne change pas le calcul de PMin par rapport à POTR, car du concentré est également importé du sud du pays afin d'obtenir d'obtenir un mélange d'oxyde de terres rares plus riche en terres rares lourdes (Entretiens 12, 14 et 19, 2016). L'hypothèse est donc faite que la part de concentré de terres rares exportée avant traitement chimique est égale à la part de concentré importée.

La production d'OTR de Baiyun Ebo est rarissime dans la littérature : seules les années 1987, 1995, 1997 et 2000 sont reprises de sources bibliographiques. Pour le reste des années, la production d'OTR de Baiyun Ebo est reconstituée grâce à la production chinoise en faisant des hypothèses sur l'évolution de la part de Baiyun Ebo dans la production nationale. Le Tableau 32 expose la production chinoise sur la période explorée. Entre 1980 et 1983 ,en l'absence d'information, la production de Baiyun Ebo est considérée comme stable à 3 900 tonnes par an, production de l'année 1983 (Clark & Zheng, 1991). Entre 1980 et 1986, l'hypothèse est faite d'une production chinoise fournie à 100% par Baiyun Ebo. Entre 1988, 80% de la production d'après (Clark & Zheng, 1991), et en 1995, 56% de la production(26905/48000) d'après (Gupta & Krishnamurthy, 2005), il est fait l'hypothèse d'une diminution linéaire de la proportion de Baiyun Ebo/Chine. Entre 1995 et 2016, pour les années où la production de Baiyun Ebo est inconnue, les proportions dans la littérature étant à peu près constantes, une moyenne est prise des années, 1995, 1997, 2000 et 2015. La

moyenne de ces 4 années pour la proportion Baiyun Ebo/Chine est de 61%. La proportion est reconstituée à partir des données de production de la Chine et de Baiyun Ebo pour 1995, 1997, 2000 (Hedrick 1997 in Gupta & Krishnamurthy, 2005), et pour 2015 la proportion est directement donnée par le panorama sur les terres rares du BRGM (BRGM, 2015). Les données obtenues de la production OTR de Baiyun Ebo (POTR) sont présentées sur les Figure 41 et Figure 42.

Tableau 32 : Production annuelle d'OTR chinoise de 1980 à 2016

	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Source	Hypothèse de l'autrice			(Clark & Zheng, 1991)			Moyenne (Clark & Zheng, 1991; Gupta & Krishnamurthy, 2005)			(Gupta & Krishnamurthy, 2005)	
Production OTR (tonnes)	3 900	3 900	3 900	3 900	6 000	8 500	9 325	15 100	19 830	25 220	16 500
	1991	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**
Source	(Gupta & Krishnamurthy, 2005)										
Production OTR (tonnes)	16 150	21 340	22 100	30 650	48 000	55 000	53 000	60 000	70 000	73 000	73 000
	2002	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**
Source	(Gupta & Krishnamurthy, 2005)	Mineral commodity summaries de 2004 à 2018									
Production OTR (tonnes)	75 000	90 000	95 000	119 000	119 000	120 000	120 000	129 000	130 000	130 000	100 000
	2013	**2014**	**2015**	**2016**							
Source	Mineral commodity summaries de 2004 à 2018										
Production OTR (tonnes)	95 000	95 000	105 000	105 000							

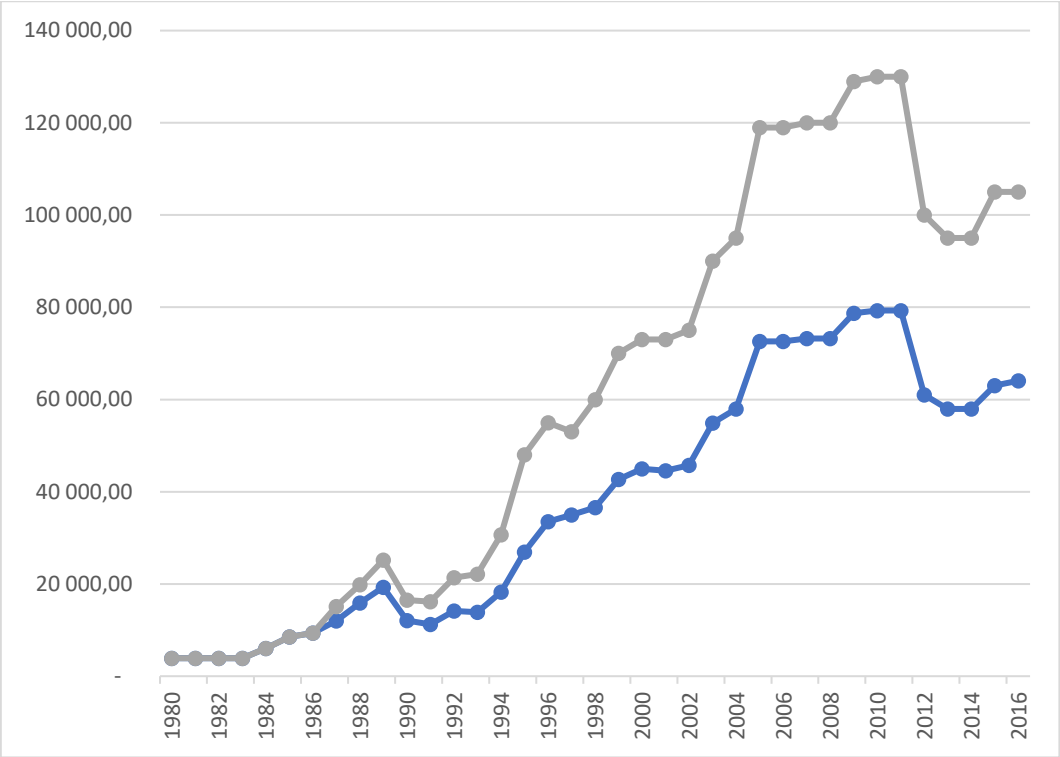


Figure 41 : Production annuelle d'OTR en Chine (en gris) et à Baiyun Ebo (en bleu), en tonnes. Source : autrice

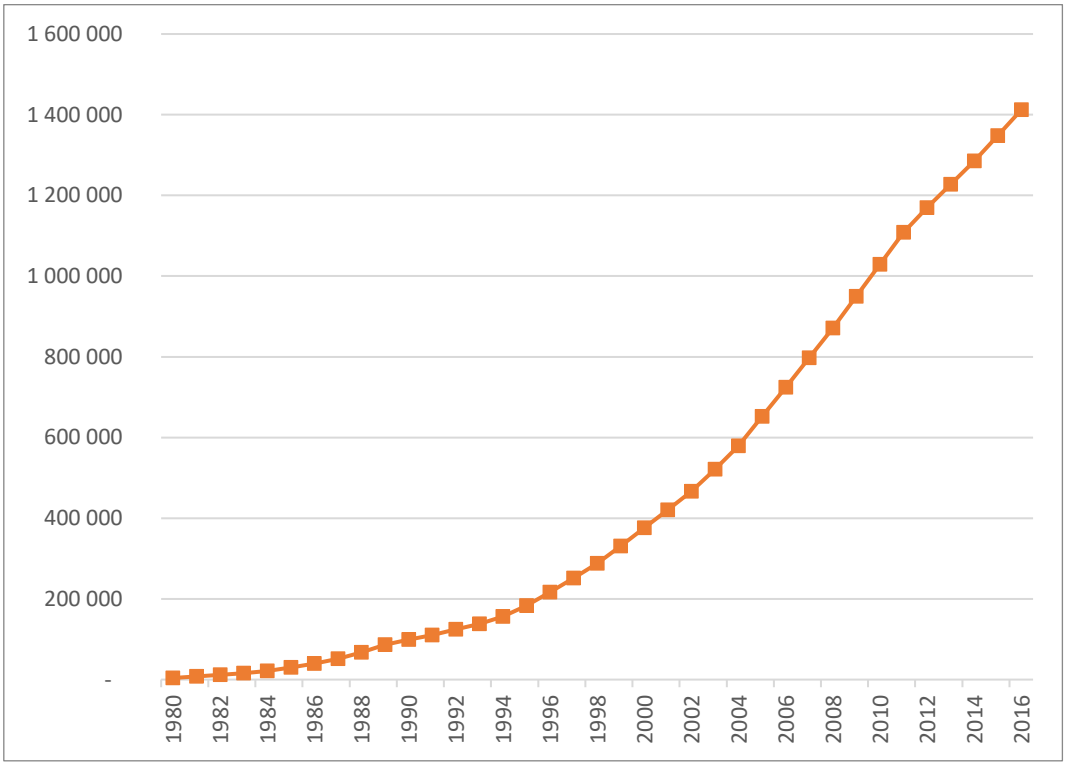


Figure 42 : Production cumulée d'OTR à Baiyun Ebo (tonnes). Source : autrice

Grâce à ces données de production d'OTR au niveau de Baiyun Ebo, à la relation (1) et à Reglinetime, la production de minerai au cours du temps (PMin) à Baiyun Ebo peut être calculée de 1980 à 2016. Cependant, le calcul de PMin de 1980 à 2016 amène à une production minière cumulée en 2004 de 111 millions de tonnes de terres rares, ce qui correspondrait à des réserves minérales restantes de 488 millions de tonnes de minerai. Or d'après l'article de (Xu & Shi, 2005), les réserves restantes en 2004 étaient de 350 millions de tonnes de minerai. Cela est dû au fait que de 1958 à 1980, la mine PE était déjà exploitée, même si les données d'exploitation ne sont pas disponibles sur cette période. Le modèle est donc calé pour prendre en compte la production entre 1958 et 1980. Sur cette période toute la production de Baiyun Ebo est ferrifère : POTR=0. En effet, même si d'après Moran-Palacios et ses collaborateurs (Moran-Palacios, Ortega-sFernandez, Lopez-Castaño, & Alvarez-Cabal, 2019) il y avait bien une production de terres rares avant les années 1980, celle-ci était anecdotique. Les années 1980 marquent le début du commerce des terres rares, le début d'une production conséquente.

Cependant, après avoir calé le modèle pour obtenir 350 millions de tonnes restantes sur le gisement principale-Est en 2004 (Xu & Shi, 2005), la production annuelle de minerai que cela induit entre 1958 et 1979 pose problème, car la production annuelle est près de 10 fois supérieure au niveau de 1980. Or il est invraisemblable que la production ait chutée drastiquement dans les années 1980.

Ainsi, le modèle donne :

> [PMin cumulée calculée 1958-1980] = [PMin cumulée théorique 1958-2004] – [PMin cumulée modèle 1980-2004] = 250 millions de tonnes – 111 millions de tonnes = 139 millions de tonnes
>
> Ce qui donnerait, en présumant une production annuelle constante sur la période 1958-1980 : PMin = 139 millions de tonnes/22 = 6,3 millions de tonnes par an
>
> Sachant que le modèle donne pour 1987 : $PMin_{1980}$ = 0,7 million de tonnes

La grandeur maximale que devrait avoir [PMin cumulée calculée 1958-1980] pour être cohérente, correspond à une production de minerai annuelle égale à celle de 1980 :

[PMin cumulée MAX 1958-1980] = $PMin_{1980}$ *22 = 15,38 millions de tonnes

Plusieurs explications peuvent être avancées pour expliquer que PMin soit trop élevée sur 1958-1980 et comparativement trop faible dans les années 1980 :

- Cela pourrait venir du fait que la période considérée ne soit pas la bonne. En effet, le gisement ayant été découvert dans les années 1920, Xu et Shi (Xu & Shi, 2005) indiquent un début de production du fer par la Chine en 1958, mais indiquent que la mine était exploitée avant cela par l'union soviétique. Cependant le chiffre de 250 millions de tonnes déjà exploitées en 2004 sur le gisement Principal-Est cité dans leur article (Xu & Shi, 2005) se réfère explicitement à la période 1958-2004 (Xu & Shi, 2005). Ce n'est donc pas la période qui est en cause.
- Une autre hypothèse possible est que les 250 millions de tonnes évoquées par Xu et Shi correspondent aux chiffres réels de production et que les chiffres officiels utilisés dans le modèle soient sous-estimés. En effet les chiffres officels de production d'OTR utilisés entre 1958 et 2004 pour le modèle pourraient ne pas prendre en compte une partie de la production d'OTR qui irait fournir des stocks stratégiques nationaux. Les chiffres officiels sous-estimeraient ainsi la production réelle. Cette hypothèse ne peut pas être vérifiée dans les faits. De plus, il est peu vraisemblable que le stockage explique l'ordre de grandeur de l'écart entre la production de minerai cumulée attendue entre 1958 et 1980 (15,38 millions de tonnes) et la production de minerai cumulée calculée (139 millions de tonnes). Cela correspondrait à un stockage de 90% de la production annuelle.

- Le plus probable est que l'hypothèse d'un rendement de 10% stable pour la production des OTR entre 1980 et 2004 soit fausse. En effet, la production minérale étant reconstituée à partir de la production d'OTR, du rendement d'obtention des OTR et de la teneur en OTR du minerai, le rendement joue fortement sur la production minérale cumulée obtenue en 2004.

vi. Rendements (Rdt OTR, RdtχOTR, RdtsepOTR) de l'obtention des oxydes de terres rares au cours du temps

Le rendement actuel des différents procédés de transformation du minerai de oxydes de terres rares (concentration, traitement chimique et séparation) est de 10%[111] (Y. Ding et al., 2012; Findeiß & Schäffer, 2017; J. Li & Guo, 2014; Ma et al., 2016; Moran-Palacios et al., 2019; Xu & Shi, 2005).

Cette valeur est très faible et les articles indiquent que ces pertes très importantes (H. Ding, He, & Deng, 2014; Findeiß & Schäffer, 2017; J. Li & Guo, 2014) sont dues principalement aux premières étapes : concassage et broyage du minerai de fer et terres rares, séparation magnétique couplée à une première flottation assurant la séparation entre minéraux ferrifères et terres rares, séparation gravitaire et déschlammage. Les étapes suivantes de la concentration (depuis le résidu de la séparation avec le fer jusqu'au concentré de terres rares) ayant, elles, un rendement tournant autour de 60% (Gupta & Krishnamurthy, 2005; Ma et al., 2016; Navarro & Zhao, 2014). Le rendement du procédé serait passé au-dessus de 10% ces dernières années, entre 10 à 15% (Zhou et al., 2017 in Moran-Palacios et al., 2019). Il est considéré ici que cette amélioration est postérieure à la période considérée.

Peu d'informations sont disponibles sur l'évolution au cours du temps du rendement de l'obtention des terres rares. Ding et ses collaborateurs (Y. Ding et al., 2012) indiquent que l'étape de séparation avec le fer (générant de lourdes pertes) se faisait par récupération des scories dans les hauts fourneaux et que le rendement était encore plus faible que le procédé minéralurgique.

Cependant, l'article de Drew et ses collaborateurs (Drew et al., 1990) indique qu'en 1987 la production de minerai était de 7 millions de tonnes, et la production d'OTR de 12 milles tonnes, ce qui donne pour une teneur OTR de 5,42% (d'après Reglinetime en 1987) :

$Rdt\ OTR_{1987} = 12000/(7\ 000\ 000*5{,}42\%) = 3{,}16\%$

Il est donc proposé une évolution par palier du rendement OTR depuis 3,16% dans les années 1980 à 10% dans les années 2000, avec un doublement du rendement à partir de 1995 (voir Tableau 33).

Tableau 33 : Hypothèses rendements de la production d'OTR (RdtOTR) de 1980 à 2016

1980 - 1994	1995 - 1999	2000 - 2016
3,16%	6,32%	10%

Cette variation du rendement d'obtention des terres rares à partir du minerai est attribuée à l'évolution de l'étape de concentration/séparation du Fer.

Le rendement des autres étapes d'obtention des terres rares (traitement chimique et séparation) est considéré comme stable.

Le rendement de l'étape de traitement chimique (RdtχOTR) est égal à 80% pour la décomposition par grillage du concentré de terres rares de Baiyun Ebo par l'acide sulfurique, méthode la plus

[111] Il y a parfois une confusion dans les articles, avec un rendement de 10% attribué parfois à l'ensemble des étapes pour obtenir des OTR et parfois à la seule étape de concentration. Cependant des chercheurs de Baiyun Ebo travaillant sur le rendement des étapes de concentration des terres rares (Ma, Li, Zhang, Wang, & Li, 2016) ont été contactés pour cette étude de cas, et ils confirment que le chiffre de 10% recouvrirait toutes les étapes de l'extraction du minerai à l'obtention des oxydes de terres rares.

utilisée (Qi, 2018) et le rendement de l'étape de séparation (RdtsepOTR) est égal à 92% (Entretien 10, 2016).

vii. Production de minerai au cours du temps, modèle calé

La production minérale recalculée de 1980 à 2016 grâce à la production OTR avec un rendement OTR qui évolue au cours du temps (Tableau 33) donne cette fois ci pour la production passée :

[PMin cumulée calculée $_{1958-1980}$] = [PMin cumulée théorique $_{1958-2004}$] – [PMin cumulée modèle $_{1980-2004}$] = 250 millions de tonnes – 194 millions de tonnes = 56 millions de tonnes

Ce qui donnerait, en assumant une production annuelle constante sur la période 1958-1980 : PMin = 56 millions de tonnes/22 = 2,55 millions de tonnes par an

Sachant que le nouveau modèle de production donne pour 1987 : PMin $_{1980}$ = 2,21 millions de tonnes. Cet écart est considéré comme acceptable et la production minérale est calée de 1958 à 1980 à 2,21 millions de tonnes par an. Reglinetime est utilisé pour calculer la teneur d'exploitation en OTR sur cette période et avoir ainsi accès aux pertes de terres rares sur cette période.

A partir de 2006, le modèle prend en considération l'ouverture de la mine ouest dont la teneur est estimée stable à 0,625% jusqu'en 2016. En effet, il est estimé qu'étant donnée l'ampleur des ressources du gisement Ouest (800 millions de tonnes de minerai à 0,625% OTR (Xu & Shi, 2005)) et sa mise en exploitation tardive, il est peu probable que la teneur d'exploitation de la mine ait significativement baissée. La production de la mine Ouest (PMin) est calée sur la production prédite par les publications de Xu et Shi et de Qifang et al. (Qifan et al., 2010; Xu & Shi, 2005) soit :

- 3 millions de tonnes de 2006 à 2012
- 5 millions de tonnes à partir de 2013

La production de la mine PE est déduite en enlevant la production de la mine Ouest, soit :

$POTR\ Ouest_n = 0{,}625\% * 10\% * PMin_n$
$POTR\ PE_n = POTR\ totale - POTR\ Ouest_n$

Finalement, la production minérale est présentée sur la Figure 43. Cette production de minerai est artificiellement lissée jusqu'en 1980 et pour la production de la mine Ouest à cause des hypothèses prises sur ces années en l'absence de données de production.

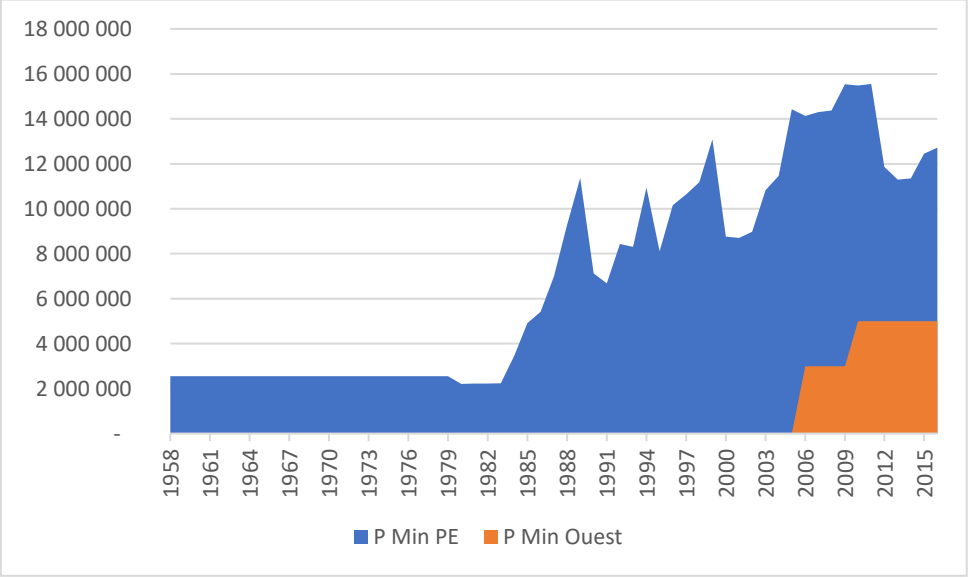


Figure 43 : Évolution de la production de minerai à Baiyun Ebo de 1958 à 2016 (en tonnes). Source : autrice

Ce modèle est vérifié grâce à d'autres articles. Ainsi :

- d'après (Y. Ding et al., 2012) : les réserves restantes seraient de 230 millions tonnes en 2012 sur la gisement PE, or d'après le modèle ces réserves sont de 234 millions de tonnes
- d'après (Qifan et al., 2010) la production cumulée de la mine PE était de 276 millions de tonnes en 2006, or d'après le modèle de production PMin PE 1958-2006 = 278,5 millions de tonnes

La production estimée à partir des teneurs OTR, Rdt OTR et POTR semble donc être proche des données de la littérature. La teneur d'exploitation moyenne et la teneur moyenne du gisement déduites de ce modèle sont présentées ci-après (les teneurs moyennes du gisement et de l'exploitation Ouest sont stables et égales à 0,625%).

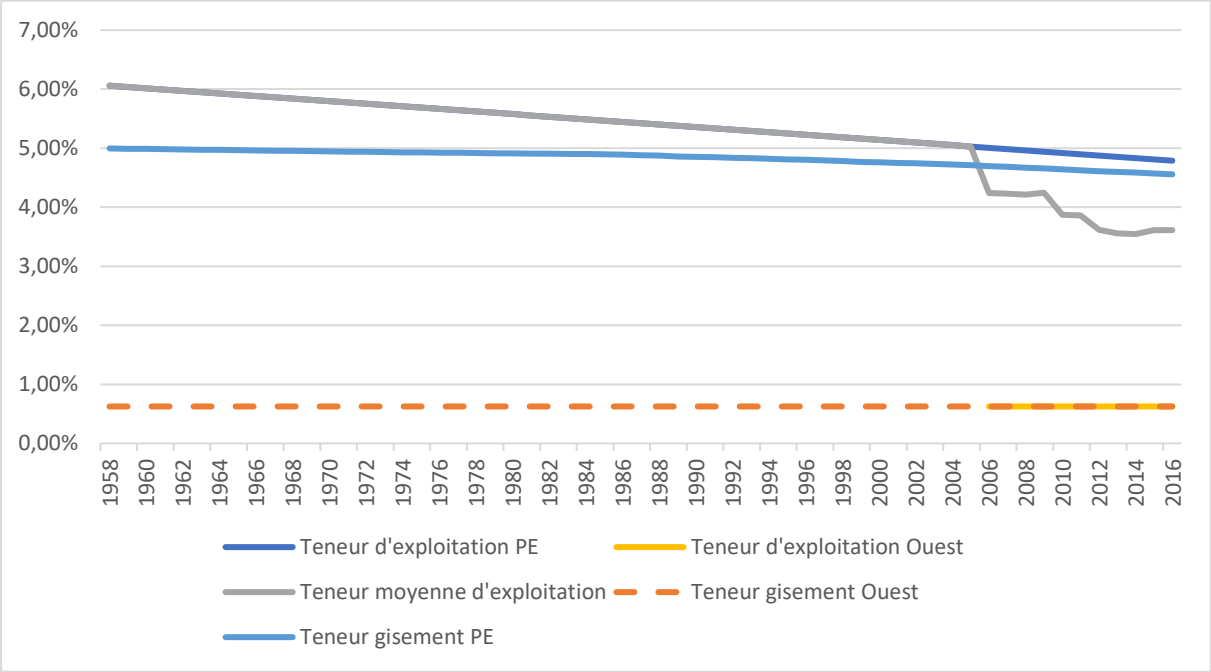


Figure 44 : Teneurs moyennes d'exploitation et teneurs moyennes du gisement de Baiyun Ebo d'après modèle (%). Source : autrice

Ce paragraphe a également permis d'établir que les pertes d'OTR sont très importantes lors du traitement des terres rares. La Figure 45 montre l'ampleur de ces pertes en comparant la quantité cumulée de terres rares prélevées au cours du temps (E OTR) comparée à la quantité cumulée d'OTR produite (POTR) pour la mine PE. Ces pertes liées à la production élevée et au mauvais rendement constituent un facteur d'épuisement très important.

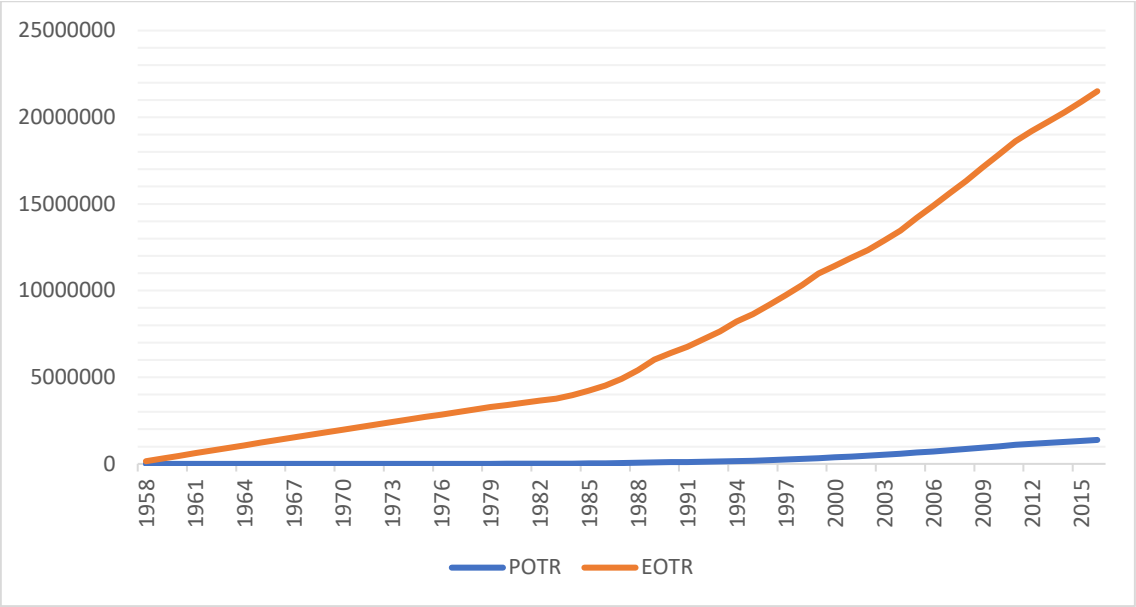


Figure 45 : Comparaison de la quantité cumulée d'oxydes de terres rares prélevée (EOTR) du gisement par rapport à la quantité cumulée de terres rares produites (POTR) dans la mine PE de Baiyun Ebo (en tonnes). Source : autrice

Enfin, le calcul des réserves restantes est présenté pour les deux mines sur la Figure 46.

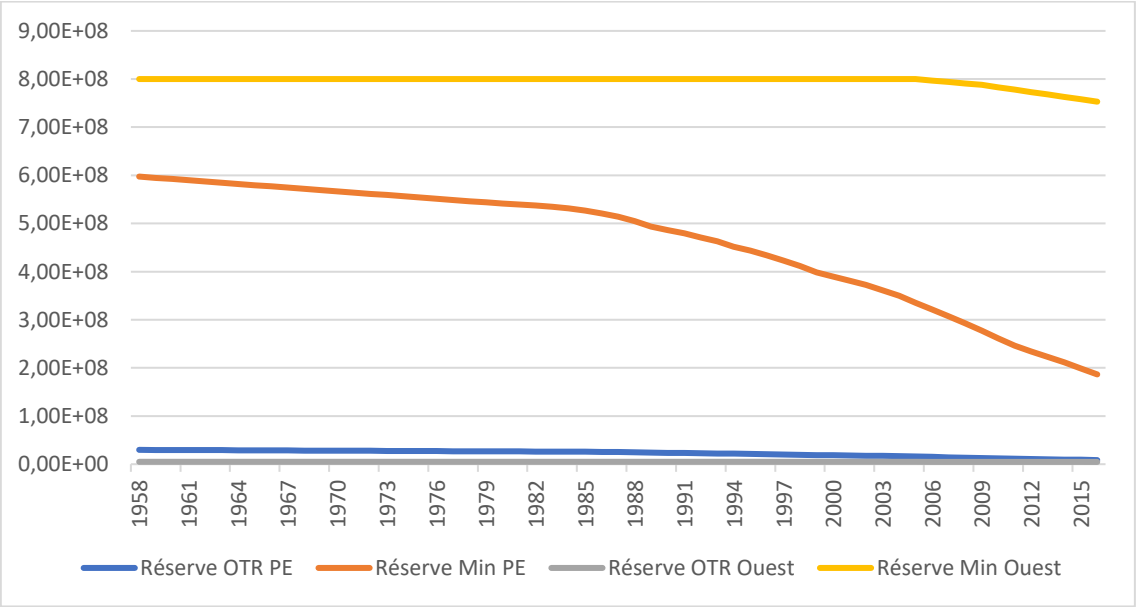


Figure 46 : Réserves restantes en minerai et en OTR pour les mines PE et Ouest (en tonnes). Source : autrice

La description du gisement de Baiyun Ebo montre que la diminution des teneurs peut se faire à différents niveaux (Figure 44) : la diminution de la teneur sur une partie donnée du gisement (partie Est et Principale par exemple), et/ou le passage de l'exploitation de la partie Est et Principale du gisement à la partie Ouest moins concentrée[112]. Il s'agit ici de voir comment le gisement a été

[112] Des chercheurs chinois (Xu & Shi, 2005) ont pointé en 2005 l'épuisement rapide des ressources chinoises en terres rares dans un rapport (en chinois, mais la traduction est disponible en Annexe). En particulier, le rapport fait état de l'épuisement rapide des réserves des mines Principale et Est entre 1958 et 2005 : sur 600 millions

exploité, les conséquences sur les teneurs d'exploitation et ce que cela présage pour les teneurs futures d'exploitation. Jusqu'à aujourd'hui l'exploitation a commencé par les mines Principale et Est pour ensuite se tourner vers la mine Ouest (Entretien 15, 2016) ce qui a conduit de fait à une baisse de la teneur moyenne d'exploitation.

Il a donc été vu dans ce paragraphe que la teneur du gisement de Baiyun Ebo était en diminution. Cette diminution de la teneur et la vitesse d'épuisement du gisement sont d'autant plus fortes que le rythme d'extraction s'intensifie, mais sont également agravées par le mauvais taux de récupération des terres rares dans les premières étapes du procédé de récupération des terres rares, les étapes minéralurgiques visant à séparer les minéraux contenant des terres rares des minéraux contenant du fer et à produire le concentré de terres rares. En effet, plusieurs auteurs chinois travaillant sur Baiyun Ebo pointent cette étape comme une étape cruciale dans la question de l'épuisement des terres rares (Y. Ding et al., 2012; P. Gao, Han, Li, & Ma, 2010; Ma et al., 2016). Ainsi, Ma et ses collaborateurs (Ma et al., 2016) soulignent-ils que non seulement l'inefficacité du procédé en termes de récupération de terres rares conduit à des pertes de ressources et gaspille de l'énergie, mais également à des conséquences néfastes sur l'environnement, du fait de l'accumulation des déchets. Selon les auteurs (Ma et al., 2016), l'environnement doit être protégé afin de préserver la santé et la survie de la population. C'est pourquoi, la recherche sur l'optimisation du procédé de flottation des terres rares est d'une grande importance, afin d'améliorer la récupération des terres rares et de réduire la pollution environnementale (Ma et al., 2016).

2.2.3. Quantification de la production de déchets miniers à Baiyun Ebo et lien avec l'épuisement de la ressource

Les déchets miniers issus de l'exploitation des terres rares de Baiyun Ebo liés à la filière du néodyme sont principalement de 3 types : les stériles miniers (déchets solides produits sur le lieu de l'extraction et restant sur place pour former des verses à stériles, *waste rock* sur la Figure 47 et *tailings*[113] sur la Figure 48), les résidus issus des étapes de concentration du minerai stockés dans un parc à résidus (*tailings* sur la Figure 47), et des résidus issus du traitement chimique à partir du concentré (Qifan et al., 2010) (*RE slag* sur la Figure 47). Les stériles sont en partis réutilisés pour la construction en fonction de leur radioactivité (Qifan et al., 2010) : les stériles les plus proches du gisement sont les plus radioactifs et ne sont en principe pas réutilisés. Ils sont donc stockés sur place sous forme de verses à stériles (ou terrils), ce qui dans le contexte climatique local induit de la dispersion par voie aérienne. Les verses sont aspergées pour éviter l'inhalation de poussières radioactives, mais étant donnée l'ampleur des verses de 560 millions de tonnes en 2006 (Qifan et al., 2010), il est peu probable que cette méthode empêche totalement la dispersion. En dehors des déchets miniers, il existe d'autres types de déchets à Baotou liés aux étapes ultérieures de traitement du fer (scories issues des procédés d'alliages et scories de haut fourneau, mises en décharge) auxquels l'étude de cas ne s'intéressera pas. L'évaluation des coûts s'intéresse aux coûts liés à la gestion des résidus de concentration et des résidus de l'étape de traitement chimique, les déchets les plus problématiques.

---

de tonnes de réserves estimées en terres rares au total dans ces deux mines, 250 millions avaient été extraites. De plus, ce rapport propose comme solution (Xu & Shi, 2005) pour ralentir le rythme de cet épuisement de se concentrer à moyen terme uniquement sur l'exploitation de la mine Ouest. Cependant, l'article de Wübbeke fait état de l'échec de l'appel de 2005 pour une meilleure gestion des ressources (Wübbeke, 2013), et il semble que les solutions préconisées dans le rapport soient gelées depuis la crise des terres rares (Entretien 15, 2016)., comme par exemple la recherche sur l'exploitation des déchets préconisées dans le rapport de Xu et Shi. Il est donc possible que le début d'activité de la mine Ouest corresponde moins à une volonté d'arrêter totalement la production de la mine PE qu'à la volonté de prolonger la durée d'exploitation des terres rares en exploitant un peu moins la mine PE en fin de vie.

[113] Tailings désigne généralement les résidus plutôt que les stériles en anglais. Il y a donc une confusion sur la légende de la photographie.

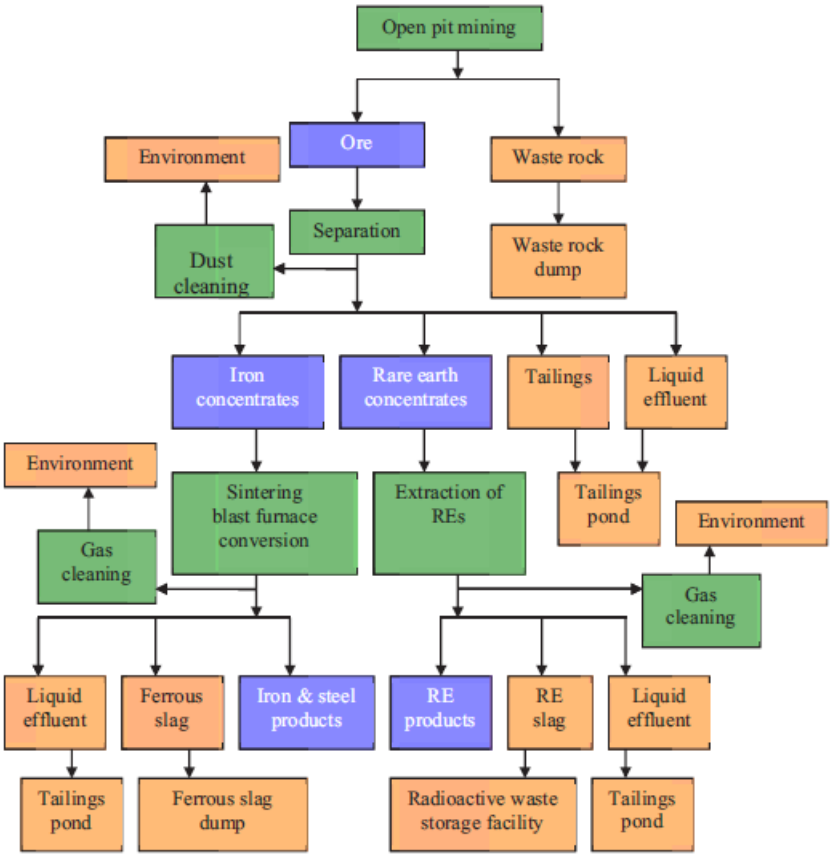


Figure 47 : Principales étapes et déchets du traitement du minerai de Baiyun Ebo. Source : Qifan et al., 2010

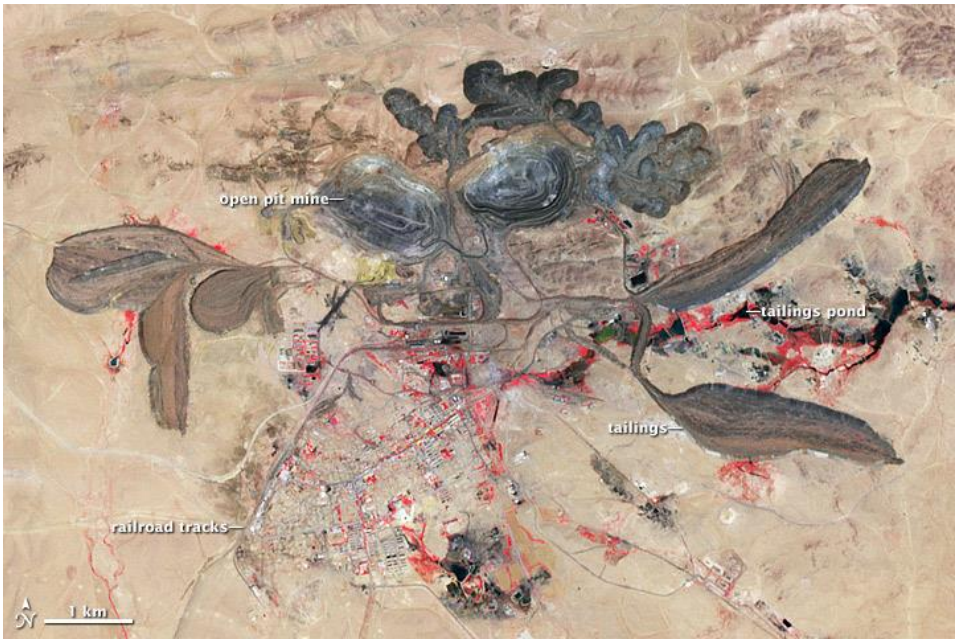


Figure 48 : Les mines Principale et Est de terres rares de Baiyun Ebo, photographie satellite. Source : NASA, 30 juin 2006

Aujourd'hui, la plupart des résidus liés à l'extraction des terres rares de Baiyun Ebo sont contenus dans la retenue du barrage de Weikuang, qui est présenté au paragraphe 2.1.1. (non visible sur la Figure 48). Cependant, depuis l'ouverture des installations de concentration de la mine Ouest

l'observation des images satellite montre que de nouveaux parcs à résidus, plus petits ont été ouverts plus proches de Baiyun Ebo (*tailings pond* Figure 48).

Pour établir les coûts d'abattements et d'atténuation liés aux déchets miniers, il s'agit d'abord de calculer la masse de résidus accumulées au cours du temps, du contenu en thorium de ces résidus pour évaluer le travail de dépollution nécessaire et le contenu en terres rares de ces déchets pour évaluer les pertes de terres rares provoquées par la production des déchets. Pour cela, le modèle des teneurs d'exploitation et de production établi précédemment est réutilisé. Le paragraphe 3.1 a montré la diminution des teneurs en OTR et l'augmentation de la production au cours du temps dans le gisement de Baiyun Ebo. Il s'agi ici d'évaluer l'impact de ces évolutions sur la production de déchets.

i. Masse de résidus accumulée dans le parc à résidu de Weikuang

La quantité de résidus de Weikuang est principalement issue des résidus de l'étape de concentration du minerai, étape produisant du concentré de fer, d'OTR et une quantité négligeable de Nb (B. Zhang, Liu, Li, & Jiang, 2014) :

$$\mathbf{PRweikuang_n} = PMin_n - PconcOTR_n - PconcFe_n - PconcNb_n \approx PMin_n - PconcOTR_n - PconcFe_n \qquad (3)$$

Avec :

$PRweikuang_n$: La masse de résidus ajoutée au parc de Weikuang à l'année n
$PMin_n$: La quantité de minerai produite à l'année n calculée grâce à la relation (1) $POTR_n$ / Teneur OTRn *Rdt
$PconcOTR_n$: La quantité de concentré en OTR produit à Baotou à l'année n
$PconcFe_n$: La quantité de concentré en Fe produit à Baotou à l'année n

Il faut donc calculer la masse de concentrés d'OTR et de Fe produite à l'année n :

$$PconcFe_n = \frac{(\mathrm{RdtconcentrationFe} * \mathrm{Teneur\ Fe})}{\mathrm{TeneurconcFe}} * PMin_n \qquad (4)$$

Soit $PconcFe_n = RdtconcFe * PMin_n$

Avec :

RdtconcFe : Le rendement de la production de concentré permettant de passer de PMin à PconcFe

Ce rendement est une constante de 38% pour la mine PE (Xu & Shi, 2005) et de 37,05% pour la Mine Ouest, calculée à partir des teneurs en Fer des gisement PE et Ouest, stables selon la littérature, de respectivement 34% et 33,15% (voir Tableau 30), du rendement de la concentration du Fer à 70% (Y. Ding et al., 2012; P. Gao et al., 2010; J. Li & Guo, 2014) et de la teneur en concentré du Fer (62,6%).

En effet, d'après (Xu & Shi, 2005), pour 2004, c'est-à-dire pour la mine Ouest :

RdtconcFePE =1,9 millions de tonnes de concentré de Fer/5millions de tonnes de minerai = 38%, ce qui donne : TeneurconcFe=62,6%

En utilisant une teneur du concentré en Fer de 62,6%, cela donne pour la mine Ouest :

$$RdtconcOuest = \frac{(\mathrm{RdtconcentrationFe} * \mathrm{Teneur\ Fe\ Ouest})}{\mathrm{TeneurconcFe}} = 37{,}05\%$$

La teneur en concentré du Fer de 62,6% est vérifiée pour l'année 2006 à l'aide des données fournies par (Qifan et al., 2010) :

- $RdtconcFe_{2006}$ = 4,5 millions/13 millions = 34,6% d'après (Qifan et al., 2010)

- $RdtconcFe_{2006}$ = RdtconcFeOuest*($PMinOuest_{2006}$/$PMin_{2006}$) +RdtconcFePE*($PMinPE_{2006}$/$PMin_{2006}$) = 37,8% d'après nos calculs

Les valeurs de 38% pour la mine PE (Xu & Shi, 2005) et de 37,05% pour la Mine Ouest sont donc retenues pour le rendement du concentré de Fer, utilisé pour calculer la quantité de concentré de Fer.

Pour le concentré d'OTR, la formule suivante est utilisée :

$$PconcOTR_n = \frac{\mathrm{POTRn}}{(\mathrm{Rdt\chi OTR} * \mathrm{RdtsepOTR}) * \mathrm{TeneurconcOTR}} \qquad (5)$$

Avec :

RdtχOTR*RdtsepOTR : Le rendement des étapes pour obtenir des oxydes de terres rares à partir du concentré. D'après les informations données dans le paragraphe sur le rendement cette constante est égale à 73,6% à partir de 1980 (avant cela pas de production d'OTR)

TeneurconcOTR : La teneur en OTR dans le concentré = 55% en moyenne (voir paragraphe 1.3.1)

Les résultats obtenus pour PRweikuang sont comparés avec les résultats de la littérature (Clark & Zheng, 1991; Qifan et al., 2010; Xu & Shi, 2005; Y. Zhou et al., 2017) pour les années où des données existent. L'ordre de grandeur des déchets accumulés de l'ordre de 150 millions de tonnes de résidus pour le début des années 2000 sans conteste cohérent avec la littérature. En revanche, la production annuelle de résidus PRweikuang pour l'année 2006 est bien supérieure dans le modèle, avec un écart de près de 40%. C'est écart est dû en parti à la différence de production considérée : (Qifan, 2010) considère que PMin en 2006 est d'environ 13 millions de tonnes alors que notre modèle prend en compte une production PMin de 17,12 millions de tonnes pour 2006. Si PRweikuang est rapporté à PMin, l'écart entre nos calculs et ceux de Qifan et al. se réduit à 20%, avec PRweikuang/PMin égale à 0,5 pour Qifan et al. et 0,61 pour nos calculs.

Tableau 34 : Comparaison de la production de résidus déversés dans le parc de Weikuang (PRweikuang) entre les calculs de l'autrice et les données bibliographique

	1991	2004	2005	2006
PRweikuangn littérature	(Clark & Zheng, 1991) 5 millions			(Qifan, 2010) 6,54 millions
Calculs autrice PRweikuangn	4,1 millions			10,5 millions
PRweikuang cumulée littérature		(Xu & Shi, 2005) 150 millions	(Zhou et al., 2017) > 150 millions	(Qifan, 2010) 149,3 millions
Calculs autrice PRweikuang cumulée		142, 5 millions	151,2 millions	161,7 millions

L'évolution de la production annuelle de résidus rejetés dans le parc à résidus est présentée Figure 49. Entre 1965 et 1980, la production est artificiellement lissée, puisque le modèle de production établi au paragraphe 2.2.2 présume d'une production PMin constante sur cette période en l'absence de données de production. L'accumulation des résidus dans le parc est présentée sur la Figure 50.

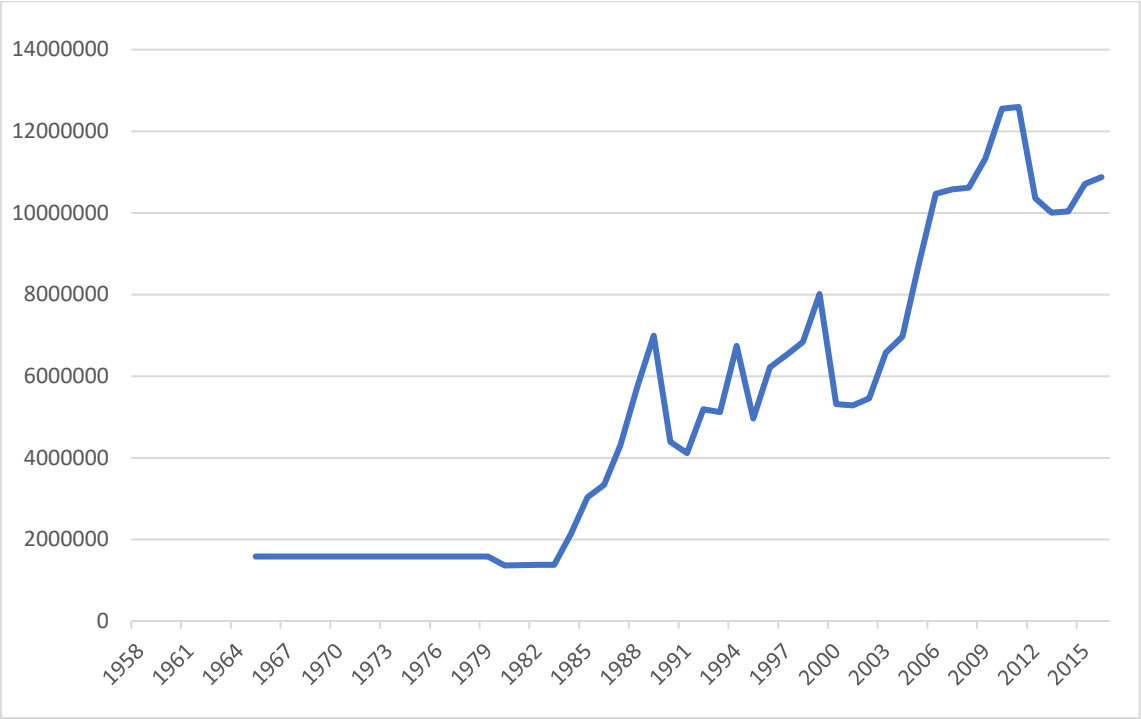


Figure 49 : Production annuelle de résidus déversés dans le parc à résidus de Weikuang depuis sa création en 1965 (tonnes). Source : autrice

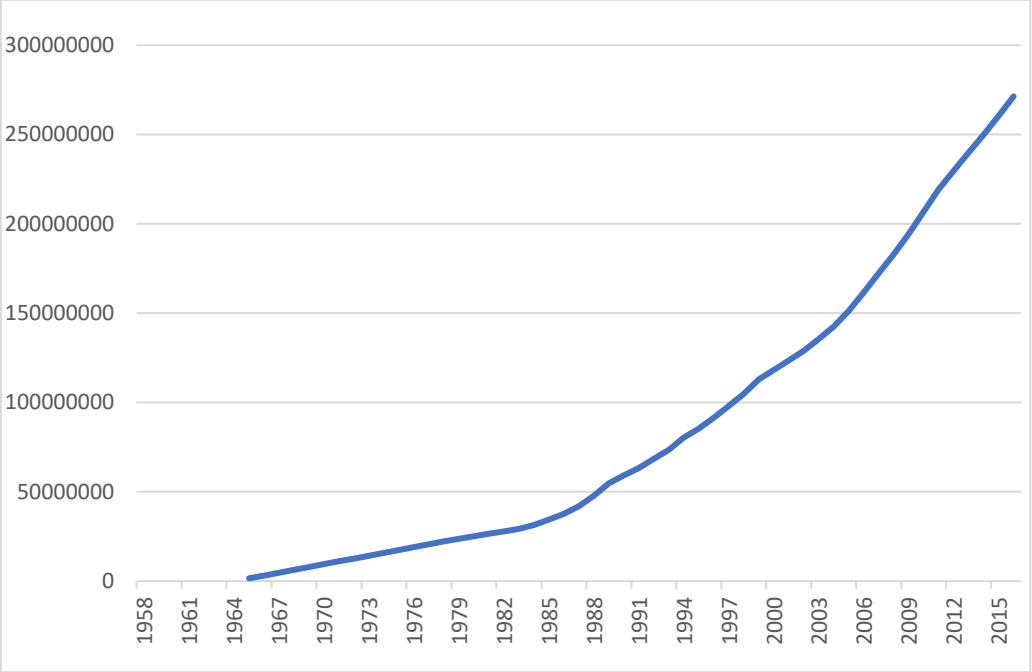


Figure 50 : Production cumulée de résidus déversés dans le parc à résidus de Weikuang depuis sa création en 1965 (tonnes). Source : autrice

La production annuelle de résidus du barrage de Weikuang rapportée à la production annuelle d'OTR de Baiyun Ebo est présentée sur la Figure 51. Les 3 paliers de diminution de 1980 à 2000 sont dus aux hypothèses prises sur l'augmentation du rendement de la production d'OTR (1980-1994, 1995-1999 et 2000-2016, voir Tableau 33). A partir des années 2000, la production de résidus de concentration tourne autour de 150 tonnes de résidus par tonne d'OTR produite.

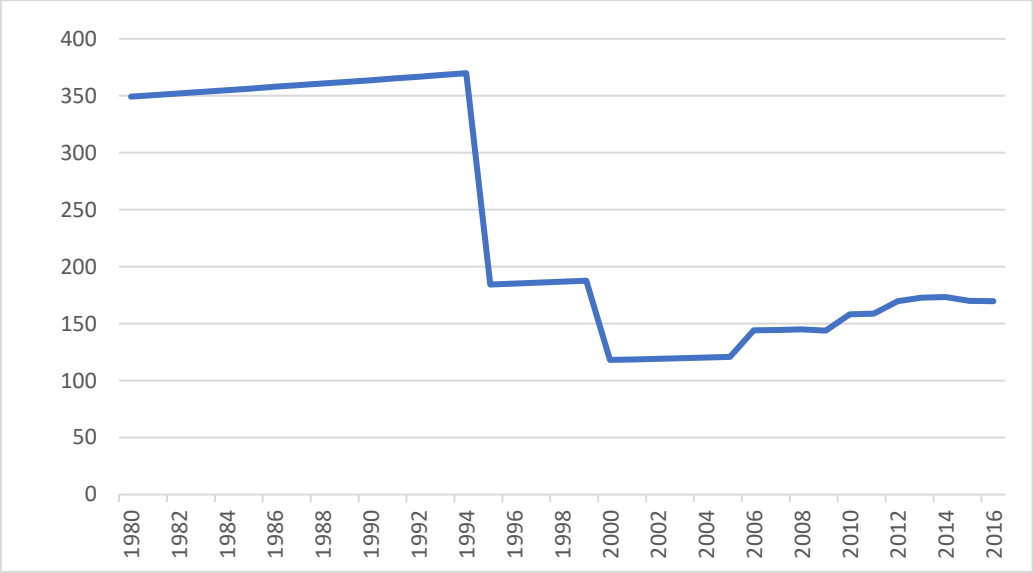


Figure 51 : Production annuelle de résidus du barrage de Weikuang rapportée à la production annuelle d'OTR de Baiyun Ebo (tonnes de résidus/tonne OTR produite). Source : autrice

Cet ordre de grandeur est cohérent avec les sources utilisées (Clark & Zheng, 1991; Qifan et al., 2010; Xu & Shi, 2005; Y. Zhou et al., 2017). En revanche, cette production de 150 tonnes de résidus par tonne d'OTR produites est nettement inférieur (ordre de grandeur 13 fois inférieur) au chiffre de 2000 tonnes de résidus produits pour une tonne d'OTR donné par Hurst (Wang Caifeng, China's Deputy Director-General of the Materials Department of the MIIT, 2009 Minor Metals and Rare Earths Conference, Beijing, China in Hurst, 2010) et repris dans plusieurs articles et ouvrages (Lima & Filho, 2015) et confirmé en entretien (Entretien 17, 2016). Ce chiffre correspond d'après nos calculs à la production de déchets dans les gisements d'argiles ioniques du sud du pays avec une teneur de 0,2% (Gupta & Krishnamurthy, 2005), un rendement de 25% et pas de coproduits. Il ne peut donc pas être appliqué à Baiyun Ebo et ne peut pas être utilisé pour traiter du problème des résidus radioactifs. Le même écart est constaté pour le chiffre donné d'une tonne d'OTR extraite produisant 1,4 tonne de déchets miniers radioactifs. En effet, d'après nos calculs, une tonne d'oxydes de terres rares produite à Baiyun Ebo équivaut à la production de 150 tonnes de résidus, dont 77 kg de thorium.

La Figure 52 témoigne du lien direct entre la production minérale de Baiyun Ebo (PMin) et la production de résidus déversés dans le parc à résidus de Weikuang (PRweikuang). Ceci découle directement de la relation (3) utilisée pour calculer PRweikuang : les résidus étant issus de la production il est évident que la masse de résidus produite dépend de la production minière, représentant en moyenne 61% de la production.

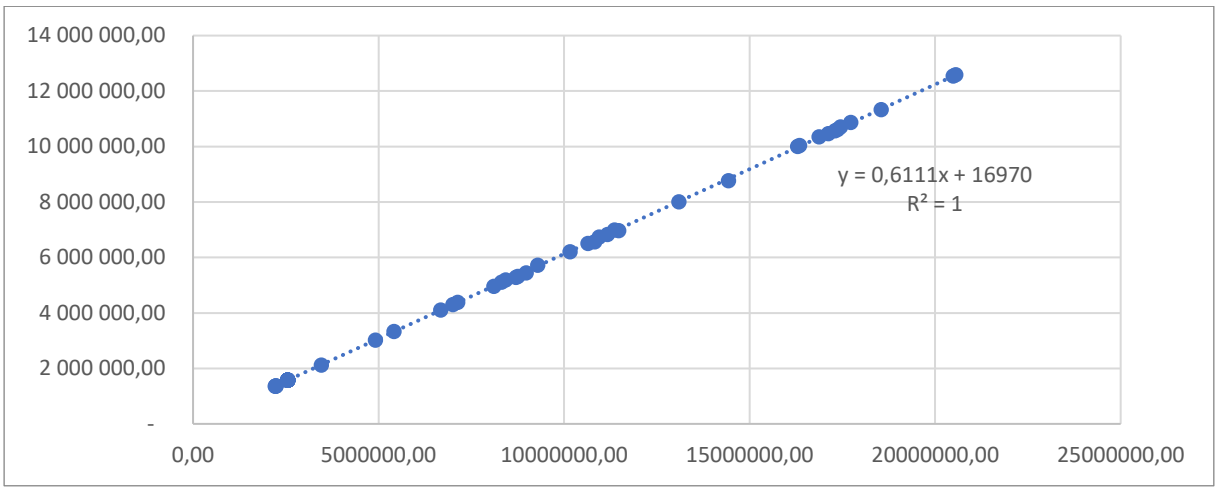


Figure 52 : Production de résidus déversés dans le barrage de Weikuang entre 1965 et 2016 en fonction de la production minérale totale de Baiyun Ebo (en tonnes)

L'étude de l'évolution de la production de résidus en fonction de la baisse de la teneur en OTR est présentée sur les Figure 53 et Figure 55. La production de résidus est rapportée à la production minérale totale afin d'occulter les effets d'augmentation de la production et de se concentrer sur l'effet de la teneur. La Figure 53 montre que jusqu'en 2005 (points entourés en orange, teneur OTR supérieur à 5,03%), l'effet principalement observé est la diminution des déchets produits avec les augmentations successives de rendement de production d'OTR (voir Figure 54). Après 2006, l'augmentation des résidus relativement à la production minière est attribuable à la baisse de teneur (voir Figure 55).

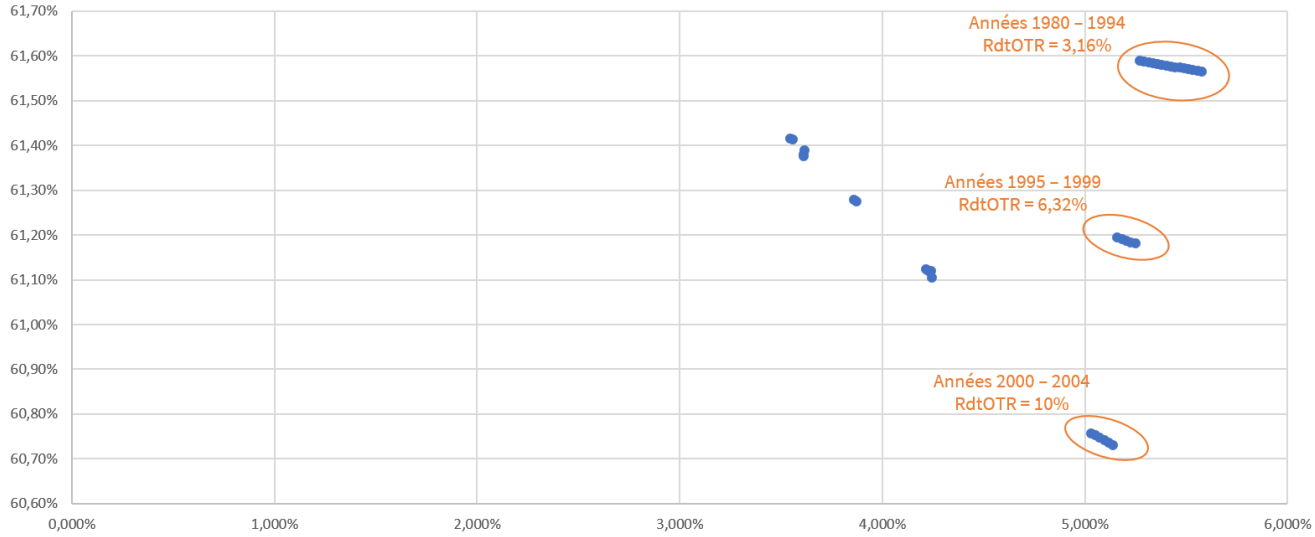


Figure 53 : Rapport entre la production annuelle de résidus déversés dans le parc de Weikuang et la production minérale totale (en %) entre 1980 et 2016 en fonction de la teneur en OTR moyenne (en %). Les cercles orange soulignent les effets des changements de $RdtOTR_n$. Source : autrice

La Figure 54 montre que la diminution de la production de déchets grâce à l'augmentation du rendement de la production d'OTR reste toute relative avec une diminution d'environ 0,85% de la production de résidus par tonne de minerai produit, pour un rendement augmentant de 7% (pente de la droite à -0,1218).

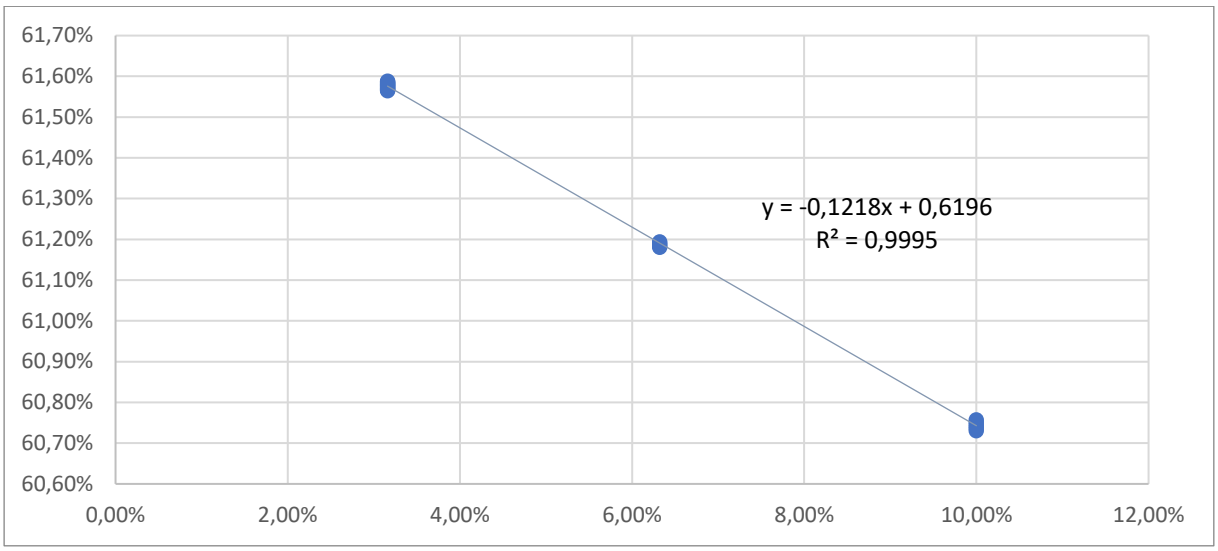


Figure 54 : Rapport entre la production annuelle de résidus déversés dans le parc de Weikuang et la production minérale totale (PRweikuang/PMin en %) entre 1980 et 2005 en fonction du rendement OTR (Rdt OTR). Source : autrice

La Figure 55 illustre la production annuelle de résidus déversés dans le parc de Weikuang pondérée par la production minérale totale (en %) entre 2000 et 2016 en fonction de la teneur en OTR moyenne. Entre 2000 et 2016, le rendement de la production OTR est constant (égal à 10%), ce qui permet d'observer l'effet de la baisse de teneur en OTR. La baisse de teneur s'accélère entre 2005 (teneur moyenne de production à 5,03%) et 2006 (teneur moyenne de production à 4,24%) avec la mise en route de la mine Ouest, dont la teneur moyenne en OTR est bien inférieure à celle de la mine PE avec une teneur à 0,625%. La baisse de teneur en OTR a eu pour effet d'augmenter la part de déchets produite à un niveau supérieur à celui de la deuxième moitié des années 1990 (avec un rendement OTR = 6,32%). Comme pour le rendement, le facteur teneur OTR a un effet léger sur la production de déchets. À rendement égal, la baisse de la teneur de 1,5% augmente la part de résidus produits de 0,65% (facteur d'augmentation du pourcentage de déchets produits est de -0,435 comme indiqué sur la Figure 55).

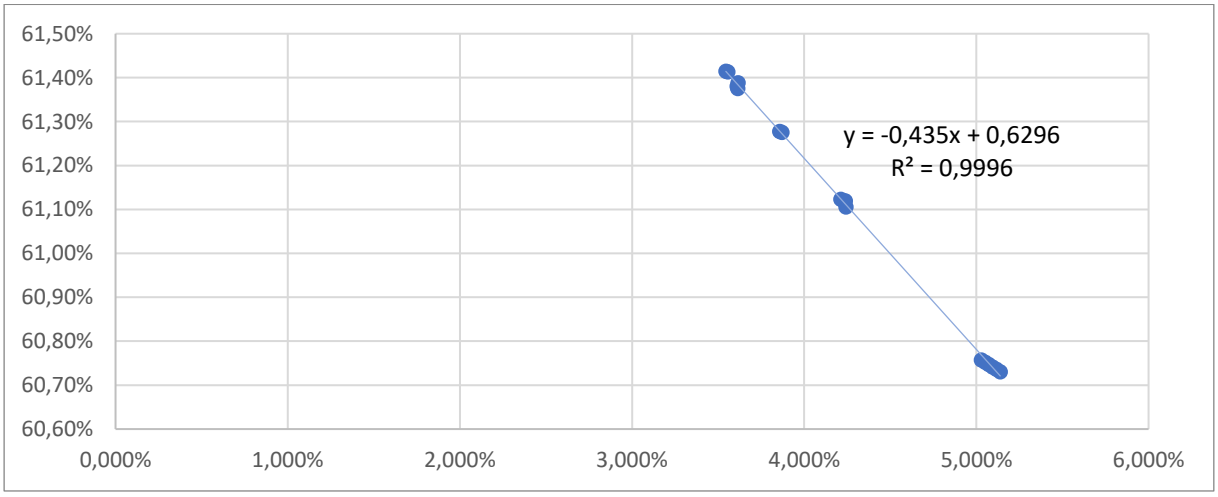


Figure 55 : Rapport entre la production annuelle de résidus déversés dans le parc de Weikuang et la production minérale totale (en %) entre 2000 et 2016 en fonction de la teneur en OTR moyenne (en %). RdtOTR est constant et égal à 10%. Source : autrice

Il a donc été vu qu'avec une teneur et un rendement constant pour la production du Fer, la production de résidus est influencée en premier lieu par l'augmentation de la production, en second lieu par la baisse de la teneur en OTR et en dernier lieu par le rendement de la production d'OTR. Il faut cependant souligner que si le rendement de la production d'OTR a une influence plus faible que la teneur, le rendement peut être amélioré de plusieurs dizaines de %, et donc faire baisser la quantité relative de déchets produits, alors que la teneur en OTR est condamnée à diminuer à l'échelle du gisement et à une amplitude de variation plus faible : de 3,6% elle ne peut que tendre vers 0%.

ii. Thorium dans les déchets produits à Baiyun Ebo

Comme cela a été vu précédemment la principale source de pollution environnementale et une des principales sources d'impact sanitaire dans l'exploitation des terres rares à Baiyun Ebo est la pollution due aux radionucléides présents dans le minerai de Baiyun Ebo. En effet, le minerai est riche en éléments radioactif avec une concentration de 0,01% à 0,05% de ThO_2 et de 0,0005 à 0,002% de U_3O_8 (Qifan et al., 2010). La concentration en uranium est négligée dans la présente étude. La concentration dans le minerai qui est retenue ici est une concentration moyenne de 0,032% de Thorium (Xu et Shi, 2005

Les déchets contaminés au thorium se retrouvent principalement lors de la concentration, et lors de la première étape de traitement chimique du concentré de terres rares, l'attaque acide (Y. Ding et al., 2012; P. Gao et al., 2010).

Pour modéliser le flux de thorium dans les résidus issu de la concentration, la formule suivante est utilisée :

$$PRconcTh_n = PMin_n * TeneurTh * RdtRconcTh \quad (6)$$

Avec :
Teneur Th : teneur du thorium dans le minerai soit 0,032%
RdtRconcTh : rendement permettant de passer du thorium contenu dans le minerai au thorium contenu dans les résidus de concentration du minerai. Ce rendement est de 100% avant 1980 (avant le traitement des terres rares) et de 80,63% après 1980 (Liu et Bongaerts, 2014 in Navaro et Zhao, 2014).

Puis, la pollution en thorium la plus concentrée se trouve au niveau de l'attaque acide (J. Zhang & Edwards, 2013; Zou, Chen, Li, Kai, & Zhenkai, 2016), c'est-à-dire que le thorium se trouve dans le résidu de lixiviation à l'issu de l'attaque acide. Le concentré contient 0,21% thorium (Qifan et al., 2010; Zou et al., 2016) et la quasi-totalité (99%, approximée à 100% ici) de ce thorium se trouve dans le résidu de l'opération de traitement chimique (Findeiß & Schäffer, 2017).

Pour modéliser le flux de thorium dans les résidus issus du traitement chimique, la formule suivante est utilisée :

$$PR\chi Th_n = Teneur\ concTh * PconcOTR_n \quad (7)$$

Avec :
Teneur concTh : teneur du thorium dans le concentré soit 0,21%
$PconcOTR_n$: production de concentré d'OTR pour l'année n. Cette production est de 0 avant 1980 ; et après 1980, est de : $PconcOTR_n = POTR_n/(RdtχOTR*RdtsepOTR) = POTR/(80\%*92\%) = POTR/73{,}60\%$

Les résultats de cette formule (Tableau 35) sont cohérents avec la quantité de thorium en 2005 prévue par Xu et Shi d'environ 300 tonnes (Xu & Shi, 2005).

Tableau 35 : ThO_2 contenu dans les résidus de traitement chimique (calculs autrice) en tonnes

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
$PR\chi Th_n$ (t)	233	231	237	285	301	377	377	380	380	408	411	411	316	301	301	327	332

Ce résidu de traitement chimique a été mélangé depuis la création du parc à résidus (1965) avec les résidus de concentration ce qui induit une dilution du thorium. Depuis 2003 (calculs de l'autrice d'après Qifan et al., 2010) il y aurait un stockage à part de ces résidus de traitement chimique à hauteur d'environ 60 000 tonnes par an de ces déchets (Qifan et al., 2010), contenant donc quelques centaines de tonnes de thorium.

Finalement la quantité totale de thorium rejeté dans le parc à résidu correspond de 1965 à 2002 :

$$PRThWeikuang_n = PRconcTh_n + PR\chi Th_n \qquad (8.1)$$

Et à partir de 2003 :

$$PRThWeikuang_n = PRconcTh_n \qquad (8.2)$$

Les résultats issus de la relation (8) sont présentés dans le Tableau 36 pour les années 2000 à 2016.

Tableau 36 : ThO_2 contenu dans le parc à résidus (calculs autrice) en tonnes

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
PRThWeikuang cumulé	53899	56376	58930	61723	64683	68407	72826	77291	81773
	2009	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	
PRThWeikuang cumulé	86558	91844	97147	101500	105705	109923	114425	118998	

Selon Xu et Shi le gisement sur les 221 412 tonnes de thorium de Baiyun Ebo, 90 000 tonnes étaient contenues dans le parc à résidu en 2004 (Xu & Shi, 2005). Avec environ 65 000 tonnes de thorium contenue dans le parc à résidus, l'estimation réalisée est donc moindre. Cependant, le calcul de la somme totale de thorium prélevée du gisement, c'est-à-dire la production minière cumulée entre 1958 et 2004 (soit 250 millions de tonnes) multipliée par la teneur en thorium du gisement (0,032%) donne 80 000 tonnes de thorium. Ce qui signifie que Xu et Shi ont probablement considérés dans leurs calculs que tout le thorium extrait était contenu dans le parc à résidus, ce qui n'est pas vraisemblable le parc ayant été construit en 1965. D'autre part, Xu et Shi ont probablement considérés que la teneur de thorium avait varié au cours du temps, données auxquelles l'autrice n'a pas accès. Le cumul sur la durée du thorium dans les résidus est donc potentiellement sous-estimé dans notre calcul. Cependant, la comparaison pour les années récentes des résultats obtenus avec la littérature donne de bons résultats. Selon (Qifan et al., 2010) le contenu en thorium du flux de résidus entrant du parc de Weikuang était de 0,048% en 2006. Selon le modèle de production de résidus établi ci-avant la production de résidu en 2006 était de 10,6 millions de tonnes de résidus, ce qui donnerait 5 088 tonnes de thorium produite en 2006 Or, le calcul de PRThWeikuang2006 correspond à 4418 tonnes. L'ordre de grandeur est respecté avec une sous-estimation de la concentration en thorium du parc à résidus.

iii. Terres rares dans les déchets produits à Baiyun Ebo

D'après (Y. Zhou et al., 2017) la plus grosse partie des ressources en terres rares à Baiyun Ebo est sous forme de ressource secondaire stockée dans un barrage à résidu. De même, la CSRE affirme que les résidus du parc de Weikuang constitueraient la plus grande réserve de terres rares du monde (Entretien 17, 2016). L'approche de l'épuisement choisie au chapitre 1 s'intéresse aux pertes le long

de la filière (ou déséconomies selon Kapp), ce paragraphe présente donc la modélisation des terres rares partant dans les résidus de la production. Le paragraphe sur l'évaluation des coûts 2.2.4 discutera de quelle part de cette ressource secondaire contenue dans les déchets peut être considérée comme définitivement perdue et donc comme une « déséconomies » au sens de Kapp.

Les pertes d'OTR au niveau des étapes de traitement chimique et de séparation, étapes dont le rendement est bien supérieur à la concentration (voir paragraphe vi. du point 2.2.2), sont négligées. Les pertes d'OTR dans les déchets sont donc sous-estimées.

Pour modéliser le flux d'OTR dans les résidus de concentration ($PRconcOTR_n$), la formule suivante est utilisée :

$$PRconcOTR_n = EOTR_n - (PconcOTR_n * TeneurconcOTR) \qquad (9)$$

Ce qui d'après la relation (5) donne :

$$PRconcOTR_n = (PMin_n * Teneur\ OTR_n) - (POTR_n / (RdtχOTR * RdtsepOTR))$$

Cette relation donne bien : PRconcOTRn = $EOTR_n$ de 1958 à 1980. C'est-à-dire que la production d'OTR étant nulle de 1958 à 1980 la quantité d'OTR dans le flux de résidus est égale à la quantité d'OTR prélevée. Ces pertes annuelles d'OTR dans les résidus sont représentées sur la Figure 56.

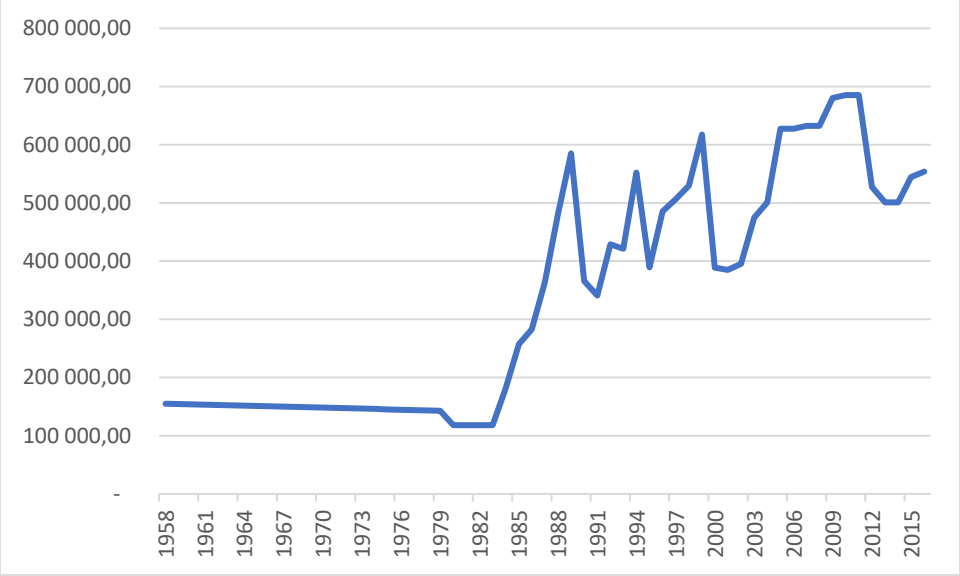


Figure 56 : Masse d'OTR contenue annuellement dans les résidus de concentration ($PRconcOTR_n$) en tonne. Source : autrice

Le barrage de Weikuang n'étant mise en place qu'en 1965 la quantité d'OTR contenue dans le parc à résidu est égale à $PRconcOTR_{1965-n}$, les quantités prélevées avant 1965 étant purement perdues. Les quantités d'OTR cumulées perdues et stockées dans le barrage à résidus sont représentées sur la Figure 57.

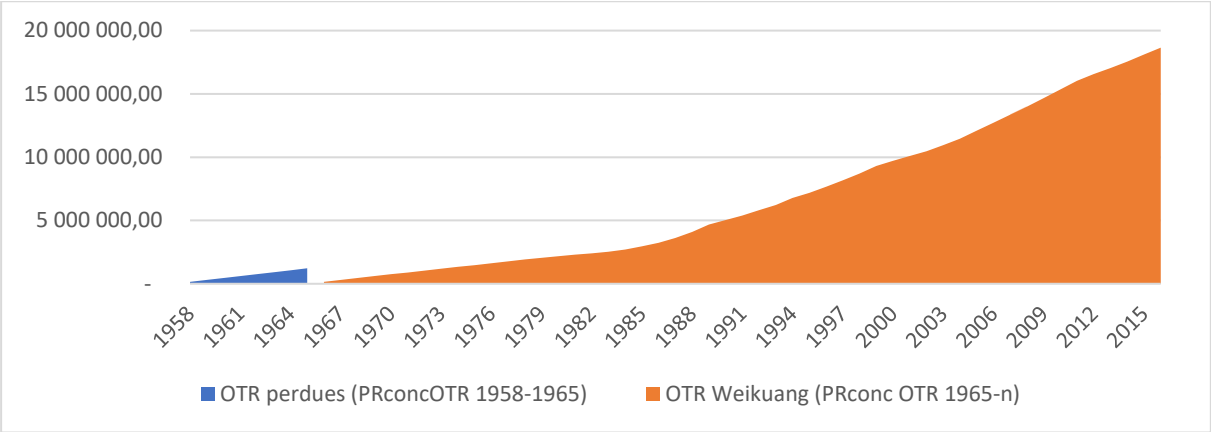


Figure 57 : Masse d'OTR cumulées perdues (en bleu) et stockées dans le parc à résidus de Weikuang (en orange), en tonnes. Source : autrice

Les vérifications des chiffres pour l'accumulation des OTR sur le long terme tendent à montrer le calcul de la masse d'OTR contenue dans Weikuang est surestimée par le modèle. En effet, d'après Xu et Shi, *IL Y AURAIT EN 2004, 9,3 MILLIONS DE TONNES DE TERRES RARES DANS LE PARC A* résidus (Xu & Shi, 2005), notre modèle donne 11,5 millions de tonnes de terres rares soit un écart de 20%. Cet écart de 20% est appréhendé comme la dispersion des OTR du parc à résidus par le vent, dans les eaux souterraines, dans les sédiments (Xu & Shi, 2005).

La teneur moyenne en terres rares dans le parc à résidus ($PRconcOTR_{1965\text{-}n}$/ $PRWeikuang_{1965\text{-}n}$) est présentée sur la Figure 58. Dans notre modèle la teneur du parc à résidus est supérieure à celle du minerai et la teneur du parc à résidus diminue ces dernières années (puisque le rendement en OTR augmente).

Les estimations de teneurs trouvées dans la bibliographie en 2019 correspondent à ces estimations (Xiao, 2019) avec une teneur moyenne d'OTR dans les résidus d'environ 7% d'OTR en 2018.

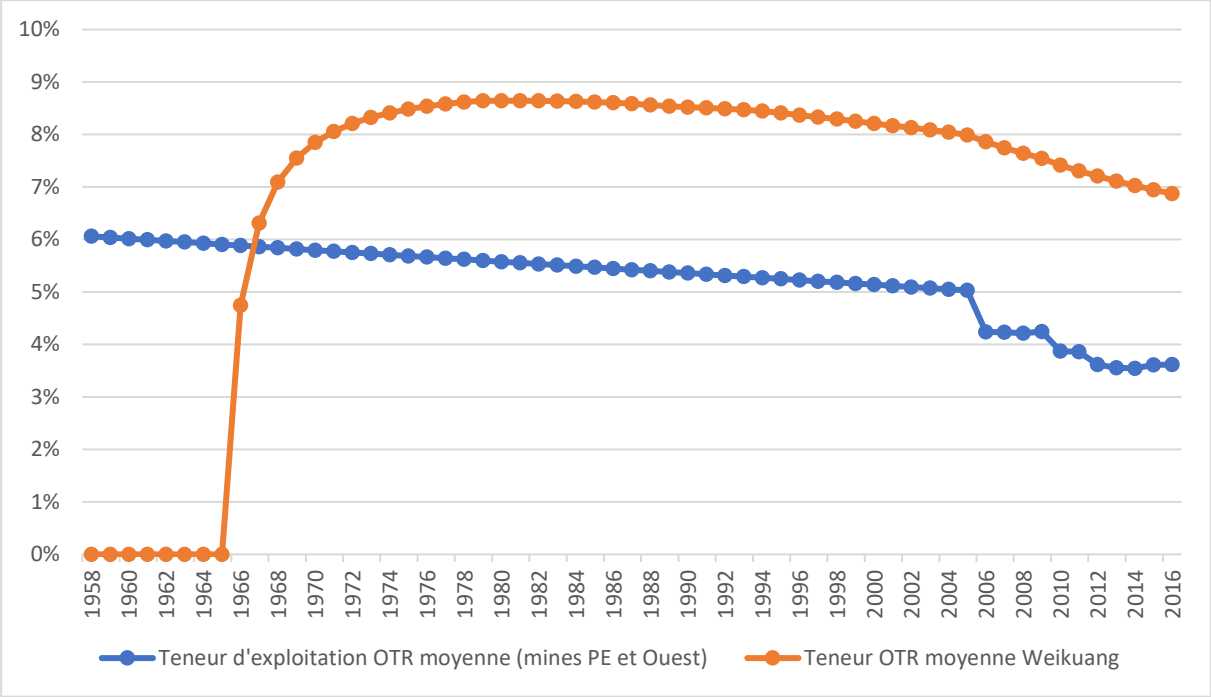


Figure 58 : Teneurs moyennes en OTR (%) d'exploitation des mines PE et Ouest (en bleu) et du parc à résidus de Weikuang (en orange). Source : autrice

Dans ce paragraphe, la quantité de résidus accumulée dans le parc à résidus de Weikuang jusqu'en 2016 a été évaluée à 271 millions de tonnes de résidus, ainsi que la quantité de terres rares (18,6 millions de tonnes) et de thorium (119 milles tonnes) dans ces résidus. Il a été vu que ces estimations étaient compatibles avec les résultats de la littérature. Ainsi le modèle de production de déchets de Baiyun Ebo peut être utilisé pour évaluer les coûts associés à la gestion de ces résidus.

2.2.4. Évaluation des coûts sociaux liés aux déchets miniers de Baiyun Ebo pour l'année 2016 et pour différents scénarii de gestion des déchets

Dans ce paragraphe est évaluée la contribution des phénomènes d'épuisement à l'augmentation de certains coûts sociaux et environnementaux à travers l'étude de la problématique des déchets miniers. Comme établi au chapitre 2, l'évaluation des coûts est une évaluation des pertes et des dommages et non nécessairement une évaluation monétaire. Dans ce paragraphe sont évaluées les dépenses liées aux déchets miniers en termes monétaires et les déséconomies de néodyme en termes massiques.

Les coûts évalués sont des coûts d'abattement (comment éliminer les sources, c'est-à-dire ici la pollution du parc à résidus), d'atténuation (comment mieux gérer cette problématique des déchets) et de prévention (comment prévenir la formation d'une telle quantité de déchets).

Les coûts sociaux évalués correspondent de manière générale à des dépenses d'exploitation et comprennent peu de dépenses d'investissements. Notamment, les infrastructures nécessaires à la dépollution, correspondant à un coût important, ne sont pas évaluées. Deux investissements sont pris en compte : le coût de stockage du thorium comprend des dépenses en capital (construction du lieu de stockage) et le coût d'investissement R&D pour l'amélioration du procédé de traitement du minerai.

De manière générale, les coûts sont présentés en valeur monétaire non actualisée, en partant donc de l'hypothèse que ces coûts sont payés immédiatement sans tenir compte d'un échéancier. La prise en compte de ces coûts immédiats permet de s'affranchir des hypothèses sur le taux d'actualisation à utiliser. Le recours à des coûts non actualisés se justifie également par le fait qu'il existe d'importantes disparités sur les durées pendant lesquelles ces coûts seront supportés selon le type de coût étudié. Seul le coût utilisé pour le stockage du thorium (voir paragraphe v.) est issu d'une étude utilisant un taux d'actualisation.

L'identification des coûts sociaux comme « coûts techniquement évitables » est discutée en fonction des technologies disponibles, de leur possible développement et du choix de leur utilisation pour des raisons techniques et de priorités économiques.

Les coûts sociaux sont ramenés à une tonne d'oxyde de néodyme (voir paragraphe ii).

Dans un premier temps, les coûts sont évalués de manière statique pour l'année 2016, c'est-à-dire sans prendre en compte l'effet des mesures de prévention et d'abattement sur la diminution des coûts. Chaque coût social est calculé en fonction du facteur de dépenses présenté dans les paragraphes i. à v. et du modèle de production de produits de la mine (point 2.2.2) et de déchets (point 2.2.3) présenté ci-avant.

Dans un deuxième temps, plusieurs scénarii de projection dans le temps (2017-2030) sont proposés afin de rendre compte des mesures proposées pour diminuer les coûts sociaux liés aux déchets (amélioration du rendement, traitement du thorium, etc.) et de rendre visible les facteurs influençant ces coûts (rendement, évolution de la teneur, choix du mode d'exploitation des ressources).

i. Allocation des coûts sociaux au néodyme et facteur de conversion

Le système choisi étant la production de déchets à Baiyun Ebo, une partie des coûts sociaux liés aux déchets est liée à la production du fer. Il s'agit donc d'attribuer seulement une part des coûts aux terres rares. C'est le même problème d'allocation que le problème souligné dans les études ACV. Comme Navarro et Zhao (Navarro & Zhao, 2014) le soulignent dans leur ACV sur la production de terres rares, la solution optimale préconisée (ISO 14040) est de redéfinir le système pour prendre en compte uniquement les impacts liés aux terres rares. Cependant cela n'est pas possible ici, ni même souhaitable, car, comme vu dans les paragraphes précédents, les rendements faibles de production de terres rares et donc les pertes et l'augmentation des déchets sont intrinsèquement liés au statut de sous-produits d'une mine de fer, des terres rares.

Le choix qui est fait ici est donc de faire apparaître les coûts des déchets en valeur absolue sans les attribuer au fer ou aux terres rares, et dans un deuxième temps d'allouer ces coûts à la production de terres rares.

Il existe deux méthodes d'allocation : l'allocation massique et économique. Ces deux méthodes ont leurs inconvénients, les deux seront utilisées pour comparaison.

En effet, comme le souligne (Navarro & Zhao, 2014), l'allocation basée sur la masse tend à alourdir la plupart des charges environnementales sur les métaux très abondants, donc ici sur la production de fer en premier lieu et sur le cérium et le lanthane. D'autre part, l'allocation économique est tributaire des prix des terres rares, qui varient considérablement d'un métal à l'autre, et qui sont extrêmement volatiles dans le remps (BRGM, 2015; Fernandez, 2017). De plus, les données de prix pour les terres rares ne sont pas des données officielles : il existe plusieurs marchés et les données historiques sont peu accessibles. Le prix utilisé (voir Tableau 38) n'est pas un prix exceptionnel (lors de la crise des terres rares de 2011 le Nd atteignait 467 000$/tonne), le prix de ces dernières années (post-crise) tournant autour de 55 000$/tonne (BRGM, 2015; Fernandez, 2017).

L'allocation massique est basée sur la masse d'OTR (ou de néodyme) produite à l'année n rapportée à la masse des produits de la mine (OTR et concentré de fer) à l'année n. Pour l'allocation massique du néodyme, la proportion massique des différents oxydes de terres rares est prise de (B. Zhou et al., 2017).

Facteur d'allocation massique OTR : POTR/(POTR+PFe)

Facteur d'allocation massique Nd : PNd/(POTR+PFe)

Tableau 37 : Proportion des différentes terres rares dans le gisement de Baiyun Ebo. Source : Zhou et al., 2017

Lanthane	25,0%
Cerium	50,1%
Praséodyme	5,1%
Néodyme	16,6%
Samarium	1,2%
Autres	2,0%

L'allocation économique est basée sur les prix de terres rares (ou de néodyme) de 2013 (B. Zhou et al., 2017) rapportés aux prix des produits de la mine (OTR et concentré de fer) à l'année n.

Tableau 38 : Prix ($/tonne) OTR de Baotou Iron and Steel Group et concentré de fer (spot price, c.f.r. China, 62% Fe) en 2013

Prix OTR 2013 (Zhou et al., 2013)	$/t	Lanthane	5010
	$/t	Cerium	5117
	$/t	Praséodyme	49 277
	$/t	Néodyme	66 704
	$/t	Samarium	4362
	$/t	Moyenne total OTR	15 4514
Prix moyen Fe 2013 (IndexMundi, 2019)	$/t		135

Le facteur de conversion utilisé entre dollars et RMB est le taux de change officiel de la banque mondiale (RMB par $ US, moyenne pour 2016) : 6,644478.

ii. Coût de stockage des résidus dans le parc à résidus

La gestion minimale de déchets d'exploitation minière contenant des polluants (en l'occurrence entre autres du thorium) est de limiter la dispersion par voie aérienne et dans l'eau souterraine des contaminants. Pour cela, il s'agit de stocker les déchets dans un espace limitant cette dispersion. Pour les résidus d'exploitation minière, ce stockage consiste la plupart du temps à mettre les résidus derrière un barrage, l'eau recouvrant les déchets. Cependant, l'objectif d'éviter la dispersion n'est pas toujours atteint. Notamment, les résidus du Parc de Weikuang ne sont pas entièrement sous eau (Xu & Shi, 2005) et les polluants atteignent tout de même la nappe phréatique.

Le maintien du barrage formant le parc à résidus présente un coût d'atténuation important proportionnel à la taille du barrage. Ainsi, Zhang et al. dans une étude sur la gestion des parcs à résidus des mines de Fer en Chine estiment-ils les coûts d'exploitation annuels des parcs à résidus à 3 à 5 RMB/tonne (S. Zhang et al., 2006).

Est retenu ici le coût de 3 RMB/t, soit 0,45$/t, dans une logique d'estimation a minima du coût social des déchets. Le coût annuel de stockage (voir Tableau 39) est calculé en fonction de la masse totale de résidus accumulés dans le parc à résidus, le coût étant proportionnel à la taille du parc.

Enfin, ce coût est largement sous-estimé, car l'étude ne considère pas la durée de ce coût. En effet, les parcs à résidus étant maintenus sur de très longues durées, le coût d'entretien est virtuellement infini.

iii. Coût d'amélioration du rendement, un coût d'atténuation pour lutter contre les déséconomies

Le paragraphe 2.2.3 a montré l'importance du rendement des terres rares dans la problématique des déchets miniers. Il s'agit donc de voir l'effet sur les coûts des déchets miniers de l'amélioration du rendement de la production des terres rares. Un rendement amélioré permet de limiter la création de déchets, mais permet également de lutter contre les déséconomies, autre coût social de l'épuisement.

Cette étude s'intéresse aux coûts sociaux générés par la filière du néodyme. Cependant, ces coûts sont dépendants des choix économiques réalisés dans la chaîne de valeur de l'acier chinois, les terres rares étant un sous-produit du fer. Ainsi, le choix d'une production de masse avec un rendement faible est lié à la volonté d'avoir une quantité importante de fer disponible à bas coûts (Xiao, 2019; Xu & Shi, 2005). Il est donc intéressant d'observer l'effet sur les coûts d'une amélioration du rendement du fer.

L'investissement en recherche et développement nécessaire à l'amélioration du rendement de la concentration du fer est chiffré par (Xu & Shi, 2005) entre 1 et 2 millions de RMB, pour passer de 70% à 90%, les technologies de concentration du fer étant des technologies très matures. Il est retenu ici l'investissement minimal de 1 millions de RMB, soit 150 501 $.

L'investissement en recherche et développement nécessaire à l'amélioration du rendement des terres rares est considéré comme 10 fois supérieur à celui du fer donc à 1 505 009$. Ce facteur, bien qu'arbitraire, prend en compte le fait que l'industrie des terres rares est beaucoup plus récente et que, bien que de nombreux articles existent sur l'amélioration du rendement du procédé des terres rares à Baiyun Ebo (Y. Ding et al., 2012; P. Gao et al., 2010; Ma et al., 2016; J. Zhang & Edwards, 2013), le procédé n'est pas prêt à être utilisé. L'amélioration du rendement prise en compte est la suivante : Rdt OTR= 77,35% (Zhou et al., 2017).

Ces dépenses de recherche et développement sont amorties sur 15 ans.

iv. Coût de traitement du thorium : réhabilitation du parc à résidus de Weikuang et traitement préventif

Les coûts d'entretien et de surveillance de parc à résidus sont importants, et surtout étalés dans le temps. Ils tendent malheureusement à ne plus être payés au fur et à mesure que le temps passe : une fois l'exploitation terminée, il y a moins de capacité d'investissement, mais les déchets demeurent. Tant que les déchets seront accumulés dans le parc à résidus de Weikuang, il existera un risque majeur : celui de la rupture du barrage et donc du déversement de plus de 270 millions de tonnes de résidus contenant plus de 119 milles tonnes de thorium en 2016 (calculs de l'autrice pour 2016) dans le Fleuve Jaune. Il semble donc primordial de supprimer ce risque.

Cependant, évaluer le coût d'abattement pour éliminer tout risque sanitaire et environnemental lié aux déchets miniers reste un exercice difficile. En effet, pour évaluer un coût social au sens de Kapp, c'est-à-dire pour tenter d'évaluer des dépenses réelles, il s'agirait d'avoir soit une étude de faisabilité et de coûts détaillée sur la réhabilitation du parc à résidus de Baiyun Ebo, soit des dépenses réelles pour un projet de réhabilitation ou de pouvoir faire une analogie avec un projet similaire. Or, l'article de (Xu & Shi, 2005) n'évalue pas les dépenses liées à la dépollution du parc à résidus. La seule estimation citée dans la littérature scientifique sur la dépollution des déchets issus de l'exploitation des terres rares concerne la province du Jiangxi et donc l'exploitation des argiles ioniques dont la pollution est de nature différente (acidification et pollutions aux métaux lourds des sols et des eaux souterraines). Cette estimation s'élève à 38 milliards de yuans (Guo, 2012). Cependant, il s'agit d'une estimation politique de la part du MIIT à la séance inaugurale d'une réunion du CSRE. D'après les informations récoltées lors des entretiens (Entretien 17, 2016) ce n'est pas une estimation basée sur des données scientifiques ou sur un rapport d'expertise, mais une estimation purement théorique. D'après M. Zhang, secrétaire général adjoint de la CSRE le coût de

traitement de la pollution sera très élevé, mais il n'existe pas à ce jour d'estimation du coût de traitement de la pollution (Entretien 17, 2016). En l'absence de telles études, les coûts présentés ici sont soumis à des incertitudes élevées.

De plus, il est difficile de raisonner par analogie, car dans la plupart des cas réels de gestion de résidus miniers, les résidus ne sont pas traités, mais stockés sur une très longue durée ou dispersés. En effet, la problématique majeure des déchets miniers est que ce sont des déchets dilués : la pollution est plutôt en faible concentration (comparée aux déchets des étapes suivantes comme les déchets de traitements chimiques), mais dans des volumes très importants. Si les déchets de Baiyun Ebo atteignaient 270 millions de tonnes de résidus en 2016, les stériles miniers (dans laquelle la concentration en thorium est encore plus faible) atteignaient plus de 560 millions en 2006 (Qifan et al., 2010). Ces volumes importants rendent très difficile un confinement total de la pollution et très coûteuses des solutions de traitement de la pollution. Comme cela a été vu dans le paragraphe 2.1 cela ne signifie pas que ces déchets ne posent pas de problèmes environnementaux et sanitaires. En effet, même si les concentrations en polluants peuvent être proches de celles du milieu naturel, ce qui dans le cas du thorium classe les déchets miniers dans la catégorie des déchets radioactifs de type *Naturally Occurring Radioactive Materials* (NORM), la capacité de dispersion des polluants est considérablement augmentée par la diminution de la granulométrie, l'exposition à des réactions chimiques (mélange avec des intrants chimiques dans le cas des résidus, mais aussi tout simplement oxydation due à l'exposition à l'air libre et aux eaux de pluies) et l'exposition à des facteurs de dispersion (vent, eau) due au stockage en surface.

Ainsi, les techniques habituelles de réhabilitation des parcs à résidus ne semblent pas satisfaisantes pour éliminer les risques de contamination aux radionucléides des terres arables et eaux souterraines. Les méthodes utilisées sont des méthodes dites « physique », chimique, phyto ou bio remédiation. Il existe plusieurs types de phyto-remédiations (Sun et al., 2018). Certaines mesures sont simplement des mesures de prévention aidant à éviter la dispersion des déchets (plantations d'arbres entourant le parc à résidus) et certaines techniques visent à dépolluer les déchets grâces à des plantes hyperaccumulatrices. Ce sont cependant des procédés en développement, et il n'existe pas d'exemple de dépollution de substances radioactives par ces méthodes à la connaissance de l'autrice. La bioremédiation n'est pas adaptée à ce type de déchets. La méthode physique consiste la plupart du temps à étaler les résidus sur la surface du sol ou à les disposer proches de la surface et les recouvrir d'une couche de terre arable. Cette méthode est souvent préconisée pour son bas coût et pour sa capacité de dilution de la pollution, parfois considérée comme une « bonne pratique »[114] (Chen, Yao, & Tian, 2016; Findeiß & Schäffer, 2017; IAEA, 2013b). Notamment, l'objectif de dilution a été recherché à Baiyun Ebo en mélangeant les déchets de traitements chimique avec les résidus de concentration à Baiyun Ebo (Findeiß & Schäffer, 2017). Certains auteurs mettent même en avant cette technique pour récupérer l'usage agricole des sols (Chen et al., 2016). En dehors du fait que le site de Baiyun Ebo contient des volumes très importants et que la surface à recouvrir serait conséquente, cette technique semble à proscrire en raison de la migration des polluants dans les plantes et les eaux souterraines (Findeiß & Schäffer, 2017). Une bonne pratique communément acceptée dans la gestion des sites et sols pollués au-delà du domaine spécifiquement minier est justement d'éviter la dilution de la pollution pour en faciliter la gestion et la surveillance. En effet, les méthodes de dilution aggravent encore le problème principal de la pollution minière. Elles rendent considérablement plus difficile et coûteux de retraiter les déchets, notamment dans le cas d'une diminution des coûts de techniques de dépollution. L'industrie de Baiyun Ebo est d'ailleurs revenue de ce principe, puique dorénavant la séparation du thorium des

[114] Il convient de noter qu'il était encore considéré comme « bonne pratique » il y a quelques années le déversement massif de résidus, notamment des résidus radioactifs de l'exploitation des phosphogypses dans les cours d'eau, les lacs et les océans, aujourd'hui interdit (IAEA, 2013). Il est raisonnable de penser que les techniques de dilution terrestres, si elles ont un impact immédiat moins dévastateur sur les écosystèmes, disparaîtront, elles aussi, des techniques de gestion des déchets considérées comme des bonnes pratiques.

résidus est préconisée (Qifan et al., 2010; Xu & Shi, 2005). Cela ne laisse que la méthode chimique, c'est-à-dire le traitement des déchets pour en neutraliser les impacts.

Selon (Findeiß & Schäffer, 2017), le stockage des déchets contaminés avec du thorium en intérieur est une bonne solution, bien qu'elle ne soit pas pérenne. Cependant étant donnés les volumes considérés, pour stocker le thorium contenu dans les déchets, il s'agit de le séparer du reste des résidus.

Il est proposé ici comme solution de remédiation de dépolluer les résidus, c'est-à-dire de séparer le thorium des résidus, afin de rendre ces résidus moins dangereux. Pour cela, il faut raisonner par analogie, car bien qu'il existe des travaux expérimentaux sur ce sujet, il n'existe pas de données spécifiques sur les coûts de séparation du thorium dans les résidus de Baiyun Ebo. En effet, certains auteurs indiquent que les technologies d'extraction du thorium n'ont jamais été appliquées à l'échelle industrielle (Qifan et al., 2010) et que la récupération du thorium pose problème économiquement (Zhu, Pranolo, & Cheng, 2015; Zou et al., 2016). L'exploitation des résidus pour la valorisation du thorium (PRconcTh) n'était pas à l'ordre du jour au moment des entretiens en 2016 (Entretien 15 et 17, 2016), le thorium ayant une valeur commerciale limitée. La possibilité de traitement des résidus reste cependant crédible, car si à Baiyun Ebo, le passage de la recherche expérimentale au pilote industriel concernant la prise en charge de la question des déchets peine à s'établir, ce n'est pas le cas de toutes les exploitations de terres rares en Chine. Ainsi, Longzhong Heavy Industry disposerait d'un ensemble complet de systèmes de décharge à sec de résidus et aurait obtenu des résultats dans le traitement des résidus (Xiao, 2019). L'article de Xiao souligne enfin que de nouvelles techniques sont possibles pour le traitement des déchets, mais qu'il s'agit d'une question de choix de la part du gouvernement et de l'entreprise (Xiao, 2019).

De manière plus générale, il n'existe pas, à la connaissance de l'autrice, de données sur les coûts d'exploitation du thorium en général (Ault, Gosen, Krahn, & Croff, 2016). Cependant, un coût peut être envisagé par analogie avec l'exploitation de l'uranium. Pour Ault et ses collaborateurs (Ault et al., 2016), si le thorium est exploité comme produit principal (ce qui n'est pas le cas ici), les coûts d'exploitation seraient similaires à ceux de l'exploitation minière de l'uranium. L'analogie est prolongée ici en considérant que le coût de traitement du thorium à partir des résidus de l'exploitation de Baiyun Ebo est similaire au coût de traitement de l'uranium comme sous-produits des phosphates. Ce coût de traitement de l'uranium à partir des phosphates est pris de la revue effectuée par (Kim, G. Eggert, W. Carlsen, & W. Dixon, 2016). Ce coût ne prend pas en compte les étapes minières, mais seulement les étapes additionnelles pour obtenir de l'uranium (l'uranium étant un sous-produit le coût des étapes minières est attribué aux phosphates). Cette analogie paraît sensée pour au moins trois raisons : le thorium est un actinide tout comme l'uranium, le thorium de Baiyun Ebo est contenu principalement dans les monazites qui est minéral phosphaté (voir Annexe 2), enfin l'uranium dans les phosphates pris en compte par (Kim et al., 2016) se trouve à une concentration de quelques centaines de ppm (70 à 220 ppm soit 0,0145% en moyenne) ce qui est plus faible, mais d'un ordre de grandeur similaire à la concentration du thorium de Baiyun Ebo (0,032%).

D'après (Kim et al., 2016), les coûts d'exploitation estimés de l'extraction par solvant s'élèvent à 32 USD par livre d'U_3O_8 produite et ceux liés à l'échange d'ions, à 18 USD par livre produite. Le coût de 32 USD/lb est retenu, car Kim et ses collaborateurs précisent que l'extraction par échange d'ions est peu adaptée à des produits contenant du fer (ce qui est le cas de Baiyun Ebo) et que c'est une technologie encore sujette à développement. De plus, d'après (Ault et al., 2016), les développements pour extraire le thorium des minerais de terres rares en Chine se tournent principalement vers des techniques d'extraction par solvant. Le rendement du procédé à 32 USD/lb est de 95%.

Ce qui donne :

Coût par tonne de thorium entrant dans le procédé = (32 $/0,4536)*1000*95% = 67 021 $/tonne de ThO_2

Si ce traitement de séparation du thorium des résidus est appliqué aux résidus en sortie de traitement de la concentration du minerai de Baiyun Ebo ce coût représente le coût total du traitement.

En revanche, s'il s'agit de traiter les résidus accumulés dans le parc de Weikuang pour dépollution, alors il faut ajouter à cela un coût qui est le coût d'extraction des déchets du parc à résidus. L'hypothèse est faite que ce coût est similaire au coût d'opération de la partie minière de la production des terres rares. D'après (Sykes, 2013) le coût de production d'une tonne d'OTR toutes opérations confondues est de 5000 $/tonne OTR en Chine.

Ce qui donne un coût de production moyen de 5000*6%*10%= 30$/tonne de minerai. Ceci est confirmé pour l'année 2013 par (Y. Zhou et al., 2017) qui témoigne d'un coût total d'opération à Baiyun Ebo de 3,5 milliards de RMB. Ce qui donnne un coût d'opération de : 3,5 milliard/16,3 millions de tonnes de minerai = 215 RMB/tonne de minerai soit 32 $ /tonne de minerai.

D'après (Sykes, 2013) le coût de production attribuable aux seules opérations minières sur les terres rares est en moyenne de 25%.

Ce qui donne un coût d'opération pour les seules opérations minières à 7,5$/tonne minerai pour les seules opérations minières.

Dans le cas où l'on traite les résidus de weikuang, les résidus deviennent le « minerai », le coût d'extraction est donc de 7,5$/tonne de résidus traités.

Finalement, le coût de traitement de thorium est donc :

a. Coût de traitement préventif en sortie de procédé : Coût de traitement = 67 021$/tonne de Th contenu dans les résidus

b. Coût de dépollution des anciens résidus : Coût de traitement (67 021$/tonne de Th contenu dans les résidus) +7,5$/tonne de résidus traités.

Il a été vu dans le paragraphe sur le thorium dans les déchets (ii) que les résidus de traitement chimique des OTR étaient également pollués par du thorium avec une concentration plus forte en thorium et un tonnage plus faible que les résidus de concentration. Ce qui rend l'extraction du thorium dans ces résidus plus aisée. Ainsi, l'article de Xu et Shi (Xu & Shi, 2005) mentionne-t-il des « technologies très avancées pour séparer le thorium » pour obtenir 300 tonnes par an de thorium à un coût de 10 000 à 20 000 RMB/tonne de thorium. Les coûts mentionnés par Xu et Shi correspondent donc au coût de séparation du thorium à l'étape de traitement chimique. Les résidus du traitement chimique contenant environ 300 tonnes/an de thorium (voir $PR_{\chi}Th$ dans le Tableau 35). En effet, il est possible pour cette étape d'améliorer le traitement chimique pour que le thorium aille dans le lixiviat et fasse l'objet d'une étape supplémentaire de séparation afin d'obtenir un sous-produit de thorium à stocker ou valoriser (Qi, 2018, p. 83,88; Xu & Shi, 2005; Zou et al., 2016).

Le coût exprimé par Xu et Shi de 10 000 à 20 000 RMB/tonne de thorium (Xu & Shi, 2005) est donc retenu comme le coût de séparation du thorium dans les déchets de traitement chimique des oxydes de terres rares. Soit 1505$/tonne pour la fourchette basse.

v. Coût de mise en stockage du thorium

Le thorium n'étant pas actuellement valorisable commercialement (Ault et al.,2016) dans l'immédiat, le traitement des déchets par séparation du thorium rend nécessaire de prévoir un stockage adapté à son caractère de produit radioactif de faible activité.

Tout stockage de déchets radioactifs de faible activité comporte au moins les coûts suivants : choix et aménagement du site, construction, exploitation, fermeture, et fin de la phase de surveillance active (restrictions d'accès, contrôles, actions correctives, etc.), qui selon les pays est prévue pour durer entre 100 et 300 ans (OCDE, 1999).

En l'absence de données de coûts exhaustives et récentes sur le stockage de surface pour des déchets de faible activité en Chine, un coût de stockage est établi à partir de la publication de l'OCDE (OCDE, 1999). Il est fait une analogie avec le projet d'El Cabril en Espagne qui prévoit un stockage pour des déchets radioactifs de type NORM et *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials* (TENORM). Malheureusement, le coût fourni dans l'étude est un coût actualisé (taux d'actualisation entre 2 et 3,5% selon les dépenses) et l'échéancier de dépenses n'étant pas disponible dans l'étude il n'a pas été possible de remonter aux coûts effectifs dépensés lors des premières années du projet.

Le stockage d'El Cabril (OCDE, 1999) à une capacité de stockage de 100 000 m^3 et un coût total (comprenant le coût d'exploitation, le coût des activités de surveillance et le coût de construction de l'espace de stockage) de 126,6 millions de dollars pour 100 000 m^3, soit 1 266 $/$m^3$, soit 126,6$/tonne de thorium (l'oxyde de thorium ThO_2 ayant une masse volumique de 10 t/m^3).

Le coût annuel lié au stockage du thorium est un coût proportionnel au nouvel apport de thorium dans le stockage. Ainsi, contrairement au coût calculé pour le parc à résidus, ce coût n'est pas proportionnel à la masse totale de thorium accumulée dans le stockage, mais à la masse mise en stockage à l'année n. Lorsque l'apport en thorium cesse dans le stockage, il n'y a donc plus de coût à payer, contrairement au coût de stockage du parc à résidu, qui continue indéfiniment. En effet, la valeur calculée à la tonne à partir du projet El Cabril étant une valeur actualisée, elle prend déjà en considération les coûts futurs d'entretien et de surveillance.

vi. Déséconomies

Pour l'année 2016 et pour les différents scénarii envisagés sont évaluées les « pertes inutiles et irrécupérables » de néodyme par tonne de néodyme produit, soit les déséconomies.

Comme cela a été vu précédemment, l'idée de déséconomies (W. Kapp, 1963) correspond à l'idée d'une perte, d'un « gâchis » techniquement évitable. Avec une acception large de ce concept, quasiment l'ensemble des pertes d'OTR entre la mine et la production des oxydes de terres rares (voir la Figure 45) pourrait être considérées comme des déséconomies puisque même les déchets stockés, dont une réexploitation future peut être envisagée, devront faire l'objet d'une réextraction, d'un nouveau traitement, engendrant nécessairement de nouvelles dépenses d'énergies. Cependant le concept de pertes « techniquement évitables » est délicat. En effet, il est difficile de distinguer, surtout sur des longues périodes passées, la part d'arbitrage économique et la part d'impossibilité technique dans le choix des procédés utilisés.

Il est donc proposé de calculer les déséconomies « strictes » c'est-à-dire la part irrécupérable des ressources perdues, en faisant l'hypothèse optimiste (voir discussion paragraphe ix.) que les déchets pourront être réexploités pour en extraire les terres rares.

Il a été vu que le parc à résidus ne constituait pas un confinement satisfaisant, notamment avec le problème des résidus qui ne sont pas sous eau et sont dispersés par les vents (Xu et Shi, 2005). Ainsi, le paragraphe 2.2.3 montrait que d'après Xu et Shi, il y aurait 9,3 millions de tonnes de terres rares dans le parc à résidus en 2004 (Xu & Shi, 2005), notre modèle donnant 11,5 millions de tonnes de

terres rares soit un écart de 20%. Cet écart de 20% est appréhendé comme la part des terres rares dispersée, soit les déséconomies. Il est donc considéré que 20% des terres rares entrant dans un parc à résidus sont dispersées et perdues.

Soit :

$$\text{Déséconomies } OTR_n = 20\% \, (PROTRconc_n + 20\% \, PROTR\chi_n) = 20\%((PMin_n * TeneurOTR_n) - 80\% \, (POTR_n/(Rdt\chi OTR * RdtSepOTR))) \qquad (10)$$

vii. Coûts sociaux liés aux déchets pour l'année 2016

Les coûts précédemment décrits sont évalués de manière statique pour l'année 2016, c'est-à-dire sans prendre en compte l'effet des mesures de prévention et d'abattement sur la diminution des coûts. Chaque coût social est calculé en fonction du facteur de dépense présenté dans les paragraphes i. à v. et du modèle de production de produits de la mine (point 2.2.2) et de déchets (point 2.2.3) présenté ci-avant.

Pour ce qui est du coût de traitement et stockage du thorium, deux coûts sont calculés : un coût de prévention sur les résidus de concentration et de traitement chimique produits pendant l'année 2016 pour séparer le thorium de ces résidus et les stocker, ainsi qu' un coût correspondant à la dépollution du parc à résidu de Weikuang.

Pour la dépollution totale du parc à résidus, la quantité de résidus cumulés dans le parc de Weikuang fin 2015 était de 260,5 millions de résidus et s'élève à 1,9 milliards de dollars pour l'extraction des résidus et 7,7 milliards de dollars pour le traitement du thorium. Soit un coût total de 9,6 milliards de dollars. Cependant, il n'est pas techniquement faisable de dépolluer en une année une telle quantité de déchets. Pour la dépollution, il est nécessaire de construire une usine de traitement (dont le coût est négligé) et de fixer une capacité de traitement. Pour obtenir un échelonnement du coût de dépollution sur 15 ans, la capacité de traitement d'anciens résidus serait de 17,4 millions de tonnes par an si l'on considère la pollution accumulée de 1965 à 2015. Ce qui reste crédible, la capacité des unités de traitement du minerai de Baiyun Ebo étant d'une capacité similaire.

Finalement pour l'année 2016, la Figure 60 et le Tableau 39 rendent compte des coûts sociaux évalués. L'appellation « mesures préventives » fait référence à tous les coûts qui ne sont pas des coûts de traitement des pollutions antérieures.

Sans surprise, le coût de dépollution de l'ancien parc à résidus est le coût le plus élevé, avec un coût annuel de 642 millions de dollars (extraction et séparation du thorium), suivi par le coût de dépollution des résidus de concentration nouvellement créés sur l'année 2016. Le troisième coût le plus élevé est le coût de stockage des résidus. Pour ramener ces coûts liés aux déchets de Baiyun Ebo aux seules TR et Nd, une allocation est faite (Figure 59) à partir de l'estimation basse de ces coûts sociaux. L'allocation massique présente des coûts dérisoires pour les coûts sociaux liés aux terres rares (0,95% du coût total) et au néodyme (0,16% du coût total) puisque l'allocation est faite sur la base de la production d'oxydes de terres rares et que cette production est minime par rapport à la production de fer (teneur 6 fois plus concentrée, rendement 7 fois meilleur). En revanche le coût élevé des terres rares amène l'allocation économique à attribuer une part importante du coût des déchets aux terres rares (52%) et au néodyme (37,43%).

Pour rappel le prix du néodyme en 2013 étant de 66 704 $/tonne et le coût social minimal lié aux résidus de Baiyun Ebo alloué par l'allocation économique au néodyme de 37 759$/tonne de néodyme produit. Ce coût est très important (57% du prix actuel). En effet, les seuls coûts sociaux évalués ici étant les coûts d'abattement et de prévention liés aux déchets, il semble raisonnable de penser que la prise en compte totale des coûts sociaux et environnementaux vient questionner la rentabilité de la production minière.

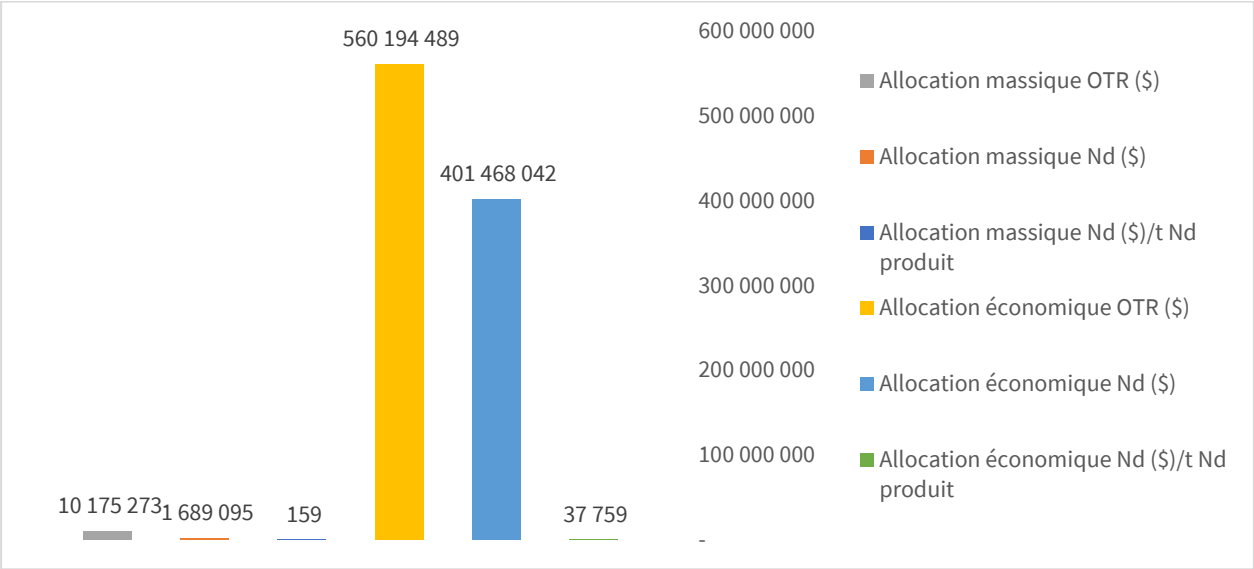


Figure 59 : Coûts sociaux liés aux résidus de Baiyun Ebo pour l'année 2016 allocation massique (à gauche) et allocation économique (à droite). Source : autrice

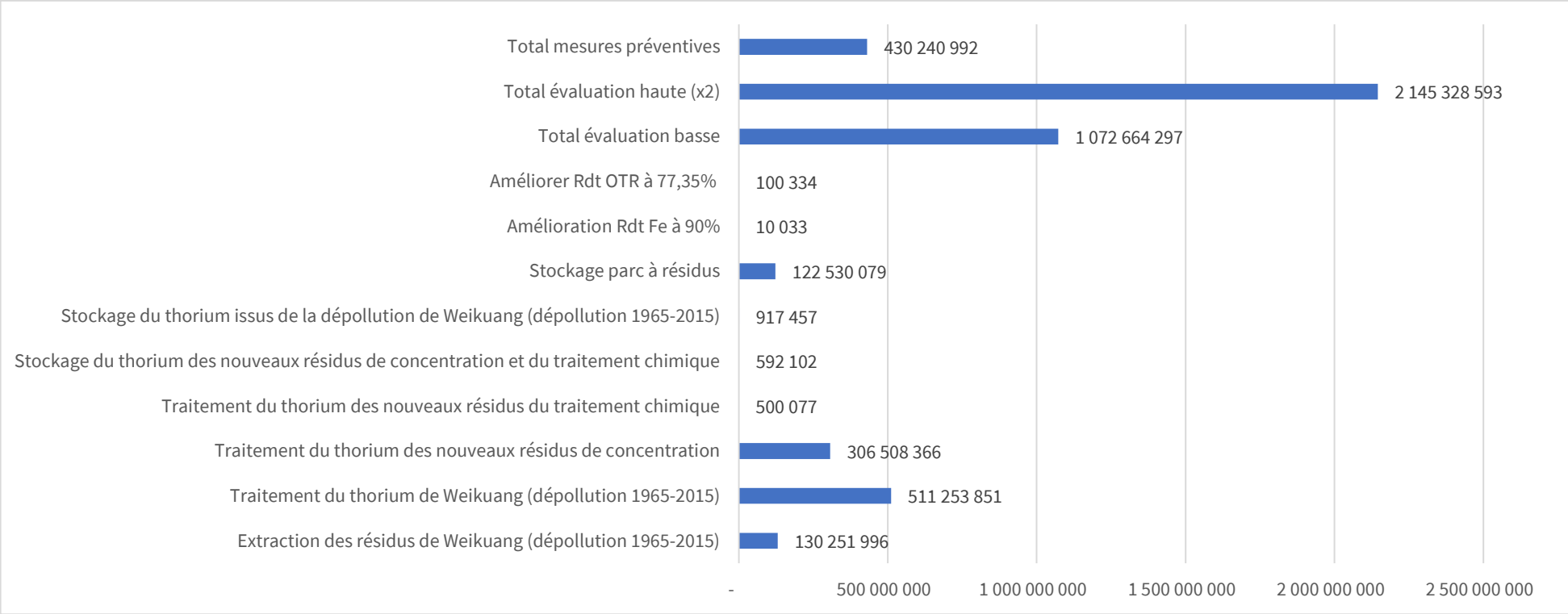


Figure 60 : Coûts sociaux associés à la production de résidus de concentration du minerai et au traitement chimique des terres rares à Baiyun Ebo en 2016 ($). Source : autrice

s

Tableau 39 : Évaluation des coûts sociaux liés aux résidus miniers et de traitement chimique pour l'année 2016 à Baiyun Ebo

Coût de séparer le thorium des résidus	**CU**		Coût total jusqu'en 2015 ($)	Amortissement (années)	Coût 2016 ($)
Extraction des résidus de Weikuang (dépollution 1965-2015)	7,5	$/t Résidus	1953779947	15	130251996
Traitement du thorium de Weikuang (dépollution 1965-2015)	67021	$/t ThO_2	7668807764	15	511253851
Traitement du thorium des nouveaux résidus de concentration	67021	$/t ThO_2			306508366
Traitement du thorium des nouveaux résidus du traitement chimique	1505	$/t ThO_2			500077
Coût de stockage du thorium					
Stockage du thorium des nouveaux résidus de concentration et du traitement chimique	127	$/t ThO_2			592102
Stockage du thorium issus de la dépollution de Weikuang (dépollution 1965-2015)	127	$/t ThO_2	14486163	15	917457
Coût de stockage dans le parc à résidus actuel et le nouveau parc à résidus					
Stockage parc à résidus	0,4515	$/t Résidus cumulés			122530079
Dépenses pour faire baisser les déséconomies et le coût de gestion des déchets					
Amélioration Rdt Fe à 90%	150 501	$ (R&D)	150501	15	10033
Améliorer Rdt OTR à 77,35%	1 505 009	$ (R&D)	1 505 009	15	100334
Total évaluation basse					**1 072 664 297**
Total évaluation haute (x2)					**2 145 328 593**
Total mesures préventives					**430 240 992**

viii. Scénarii d'évolution des coûts et calcul de la part du coût social des déchets liée à l'épuisement

Ce paragraphe propose une vue dynamique des coûts annuels projetés de 2017 à 2030 avec 6 scénarii :

Scénario 1 : ***Business as usual***[115] **(PE et Ouest)**. La production minérale totale (des deux mines) est constante et Rdt OTR est constant. Le rapport PMin PE/PMin Ouest est constant.

Scénario 2 : ***Business as usual*** **(Ouest)**. La production minérale totale (des deux mines) est constante et Rdt OTR est constant. Seule la mine Ouest est en fonctionnement.

Scénario 3 : ***Business as usual*** **(PE).** La production minérale totale (des deux mines) est constante et Rdt OTR est constant. Seule la mine PE est en fonctionnement.

Scénario 4 : **Amélioration rendement Fer**. La production minérale totale (des deux mines) est constante et le rapport PMin PE/PMin Ouest est constant. Le rendement Fe est amélioré à 90%

Scénario 5 : **Amélioration rendement OTR.** La production minérale totale (des deux mines) est constante et le rapport PMin PE/PMin POuest est constant. Le rendement OTR est amélioré à 77,35 %

Scénario 6 : **Source secondaire et améliorations technologiques.** La production minière est stoppée. Le parc à résidus est considéré comme une mine avec des coûts de production et rendements optimaux.

L'hypothèse est faite pour tous les scénarii de la mise en place du procédé de séparation du thorium des déchets issus de la concentration et du traitement chimique et de leur stockage. Le parc à résidus de Weikuang n'est plus alimenté, et les nouveaux produits sont stockés dans un nouveau parc à résidus, avec des déchets quasiment dépourvus de thorium. En effet, même si les résidus de la production d'OTR sont rendus « inertes », ils nécessiteront tout de même d'être stockés dans un nouvel espace de stockage afin de pouvoir récupérer ultérieurement les terres rares, le fer et le niobium contenus dans ces déchets.

Comme pour l'année 2016, les coûts de R&D et les coûts de dépollution de la pollution historique sont amortis sur 15 ans. La pollution historique prend en compte la pollution accumulée dans le parc de Weikuang de 1965 à 2016, ce qui donne une quantité de résidus traités de 18,1 millions de tonnes par an.

Les scénarii se basent sur les relations établies dans le paragraphe 2.2.3. L'évolution de la teneur en OTR de la mine PE est donc une prolongation de la régression linéaire établie à ce paragraphe (Figure 40). La teneur de la mine Ouest est toujours considérée comme constante et les relations entre les variables ne changent pas, sauf contre-indication dans le scénario. Les scénarii induisent l'introduction de nouvelles variables. Pour les scénarii 1 à 5 (voir Figure 61), il est considéré que la production minérale totale de Baiyun Ebo est stable et égale à la production minérale de 2016 et que le parc à résidus de Weikuang est dépollué au rythme de 18,1 millions de tonnes par an. Une unité de traitement pour le thorium traite les résidus issus de Weikuang et des mines de Baiyun Ebo. Le thorium issu de la dépollution de Weikuang, de la dépollution des résidus de Baiyun Ebo et du traitement chimique sont stockés dans un espace de stockage pour le thorium. Les résidus dépollués sont stockés dans un nouveau parc à résidus.

[115] Les scénarii 1 à 3 sont nommés « *business as usual* », car les facteurs de production (rendement, type d'exploitation et de procédés, etc.) ne changent pas. Cependant ce sont déjà des scénarii optimistes en ce qui concerne les coûts sociaux des déchets puisque la production annuelle cesse d'augmenter et que le thorium des résidus est traité, ce qui n'était pas le cas en 2016.

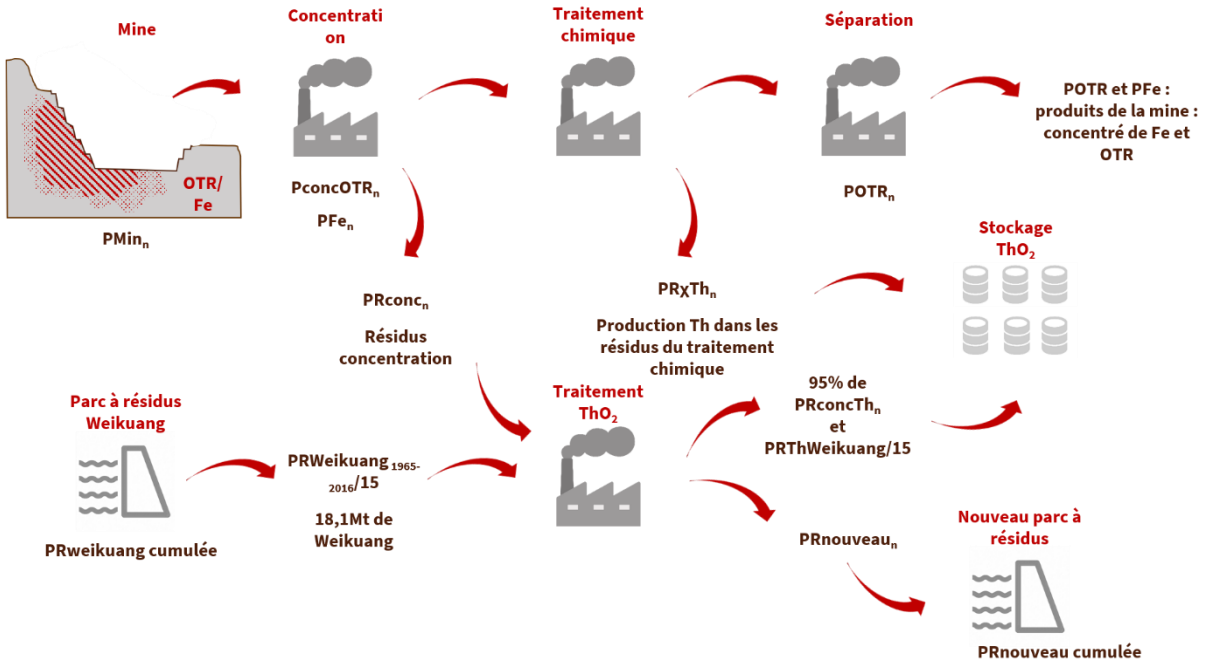


Figure 61 : Schéma présentant les scénarii 1 à 5. Source : autrice

Les variables sont les mêmes que dans le paragraphe 2.2.3, avec :

PRconc$_n$: la masse de résidus de concentration : PRconc$_n$ = *PMin$_n$-PconcOTR$_n$- PconcFe$_n$*
PRnouveau$_n$: la quantité de résidus ajoutée dans le nouveau parc à l'année n, soit :
PRnouveau$_n$ = (PRconc$_n$ + PRweikuang $_{1965-2016}$/15) – 95% * (PRconcTh$_n$ + PRThWeikuang$_{1965-2016}$/15)
PRnouveau cumulée : la quantité cumulée de résidu dans le nouveau parc
PRWeikuang cumulée : la quantité restante de résidus dans l'ancien parc de Weikuang :
PRWeikuang cumulée = PRWeikuang$_{1965-2016}$ -x (PRWeikuang$_{1965-2016/}$15)
x le nombre d'année à partir du début de la dépollution (1=2017)

Les différents coûts dans les scénarii 1 à 5 sont calculés comme suit (voir Tableau 40).

Tableau 40 : Mode de calcul des coûts pour les scénarii 1 à 5

	CU		Multiplié par
Coût de séparer le thorium des résidus			
Extraction des résidus de Weikuang (dépollution 1965-2016)	7,5	$/t de résidu	$PRWeikuang_{1965-2016/}15$
Traitement du thorium de Weikuang (dépollution 1965-2016)	67 021	$/t ThO_2	$PRThWeikuang_{1965-2016}/15$
Traitement du thorium des nouveaux résidus de concentration	67 021	$/t ThO_2	$PRconcTh_n$
Traitement du thorium des nouveaux résidus du traitement chimique	1 505	$/t ThO_2	$PR\chi Th_n$
Coût de stockage du thorium			
Stockage du thorium des nouveaux résidus de concentration et du traitement chimique	127	$/t ThO_2	$(95\% * PRconcTh_n) + PR\chi Th_n$
Stockage du thorium de la dépollution de Weikuang (dépollution 1965-2016)	127	$/t ThO_2	$95\% * PRThWeikuang_{1965-2016}/15$
Coût de stockage dans le parc à résidus actuel et le nouveau parc à résidus			
Stockage parc à résidus	0,4515	$/t Résidus cumulés	PRnouveau cumulée + PRWeikuang cumulée
Dépenses pour faire baisser les déséconomies et le coût de gestion des déchets (scénarii 4 et 5 uniquement)			
Améliorer Rdt OTR à 77,35%	1 505 009	$ (R&D)	1/15
Amélioration Rdt Fe à 90%	150 501	$ (R&D)	1/15
Déséconomies OTR			
20% des terres rares qui entre dans les parcs à résidus sont considérées comme perdues	20%	t	$PROTRconc_n + 20\% PROTR\chi_n) = 20\%((PMin*TeneurOTR) - 80\% (POTR/(Rdt\chi OTR*RdtSepOTR)))$

Le calcul des coûts ainsi établi génére des coûts annuels fixes pour les sénarii 1 à 5 présentés dans le Tableau 41. C'est pourquoi l'évolution de ces coûts n'est pas présentée pour chaque scénario.

Tableau 41 : Coûts fixes scénarii 1 à 5

	Coût annuel 2017-2030 pour scénarii 1 à 5 ($)	Coût annuel cumulé 2017-2030 pour scénarii 1 à 5 ($)
Extraction des résidus de Weikuang (dépollution 1965-2016)	135 691 399	1 899 679 588
Traitement du thorium de Weikuang (dépollution 1965-2016)	531 687 742	7 443 628 387
Stockage du thorium de Weikuang (dépollution 1965-2016)	954 126	13 357 764
	Coût annuel 2017-2030 pour scénarii 4 et 5 ($)	**Coût annuel cumulé 2017-2030 pour scénarii 4 et 5 ($)**
Améliorer Rdt OTR à 77,35%	100 334	1 505 009
Amélioration Rdt Fe à 90%	10 033	150 501

Pour les scénarii 1 à 3 les facteurs utilisés pour obtenir les masses produites d'OTR, de concentré de Fe, et de déchets sont les mêmes que pour l'année 2016 du modèle de production et sont constants. Ces facteurs sont rappelés dans le (Tableau 42).

Tableau 42 : Facteurs utilisés pour le scénario 1 à 3

Rdt OTR	10%
Rdt Fe	70%
RdtχOTR*RdtsepOTR	74%
Teneur OTR du concentré	55%
RdtconcFe PE	37,5%
RdtconcFe Ouest	36,6%
RdtRconcTh	80,6%
Rdt traitement Th	95,0%

Scénario 1 : *Business as usual* (PE et Ouest)

Dans le scénario 1, la production minérale totale (des deux mines) et le rapport PMin PE/PMin Ouest sont constants et égaux à ceux de 2016. La production d'OTR est d'environ 60 milles tonnes par an et les déséconomies en OTR sont d'environ 109 milles tonnes par an (Figure 62). La production et les déséconomies en OTR diminuent lentement avec la teneur en OTR. En ce qui concerne les déchets, la production de résidus de concentration (PRconc) augmente lentement avec la diminution de la teneur en OTR et la production de thorium issu du traitement chimique des terres rares (PRχTh) diminue légèrement avec la teneur, cela étant dû à la diminution de la quantité d'OTR traitée (Figure 63).

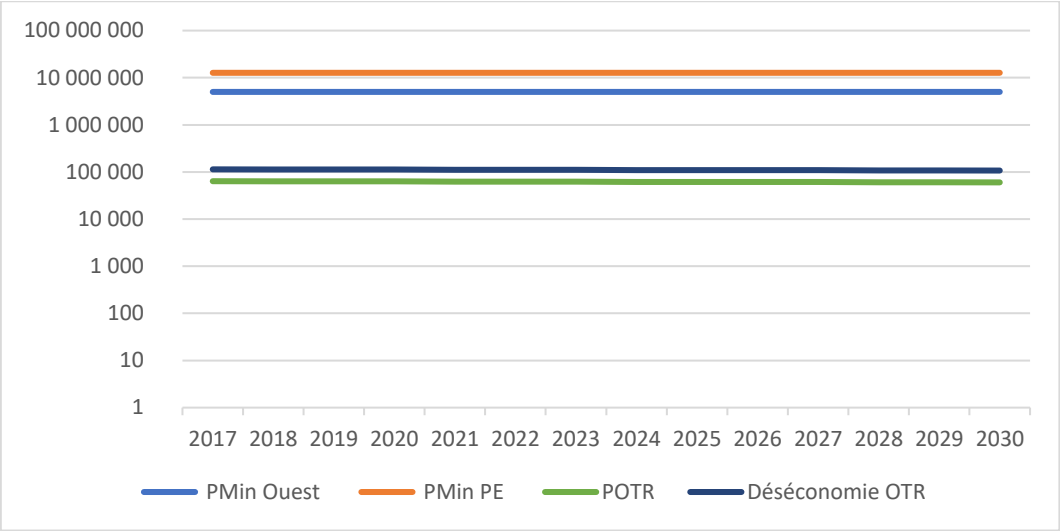


Figure 62 : Production annuelle pour le scénario 1 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice

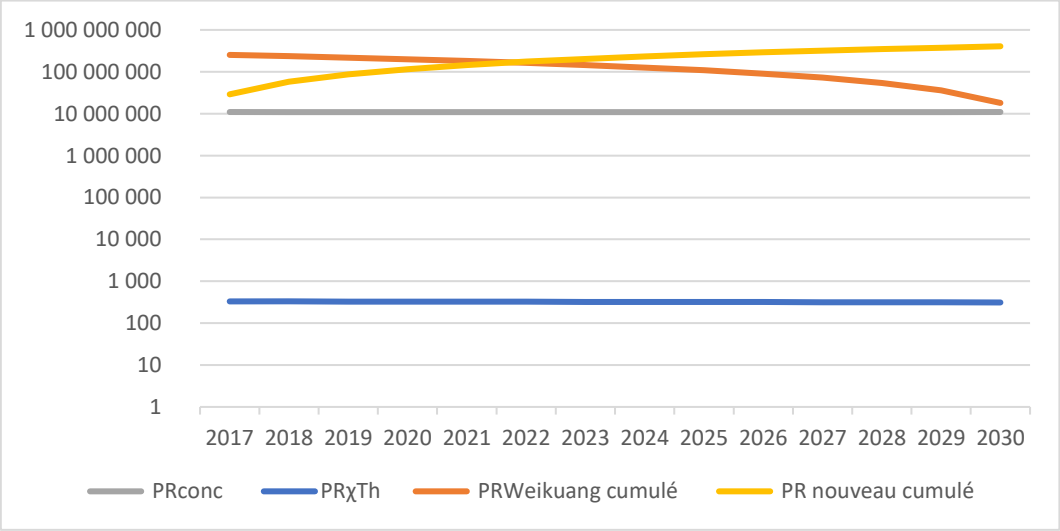


Figure 63 : Production annuelle de déchets dans le scénario 1 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice

Les coûts sociaux obtenus pour ce scénario sont exposés dans le Tableau 41 pour les coûts fixes et la part évolutive des coûts est présentée sur la Figure 64. Le coût total du scénario cumulé entre 2017 et 2030 est de 15,9 milliards de dollars. En 2030, le coût de gestion annuel des résidus stockés dans les parcs à résidus (Weikuang et nouveau parc) s'élève à 191,8 millions de dollars (pour 18,1 millions de tonnes restantes dans Weikuang et 406,7 millions de tonnes décontaminées du thorium dans le nouveau parc à résidus).

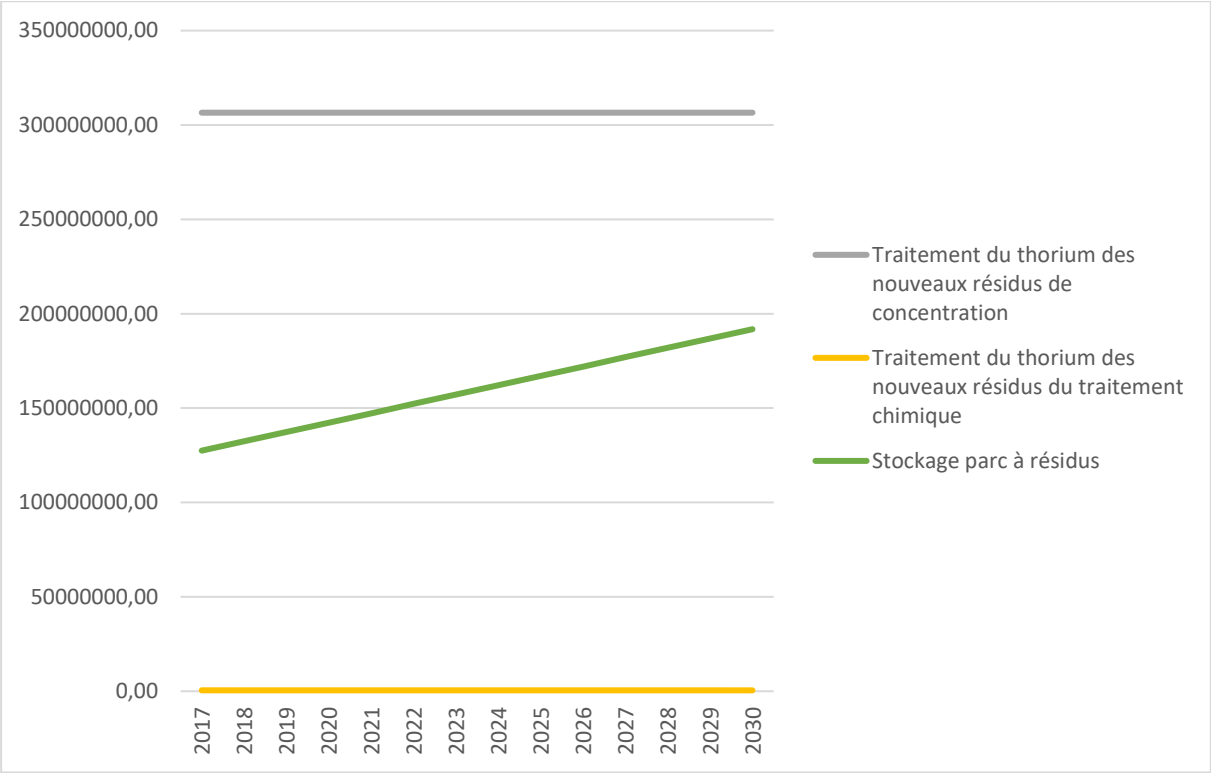


Figure 64 : Évolution annuelle des coûts sociaux variables liés aux déchets, Scénario 1 ($). Source : autrice

Scénario 2 : Business as usual (Ouest)

Dans ce scénario la production minérale totale est constante et équivalente à celle de 2016, mais seule la mine ouest est en fonctionnement (PMin=PMin Ouest). La production d'OTR et les déséconomies en OTR sont très faibles, respectivement d'environ 11 milles tonnes par an et 20 milles tonnes par an (Figure 65). Elles sont constantes puisque la teneur en OTR ne varie pas et est très faible. En ce qui concerne les déchets, la production de résidus de concentration (PRconc) et la production de thorium issu du traitement chimique des terres rares (PRχTh) sont constantes (Figure 66).

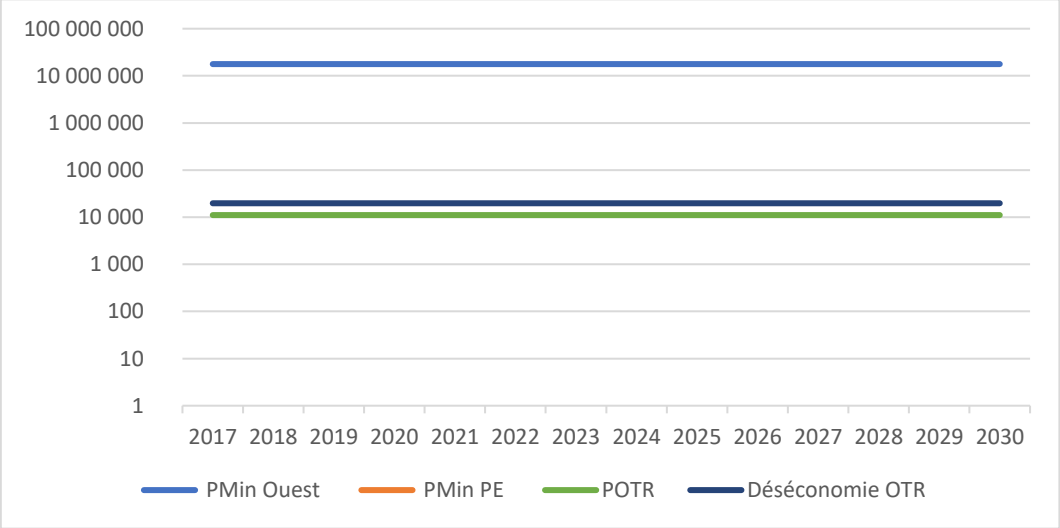


Figure 65 : Production annuelle dans le scénario 2 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice

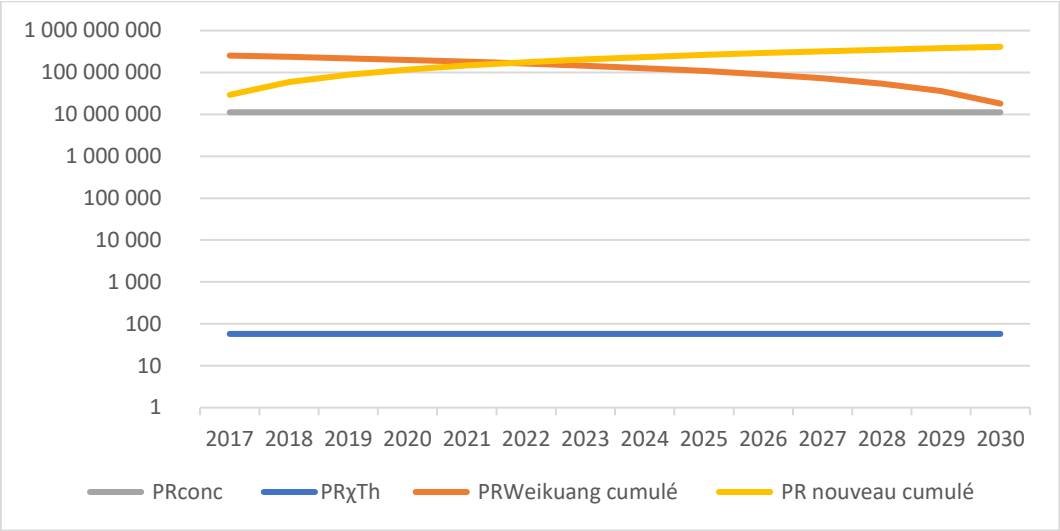


Figure 66 : Production annuelle de déchets dans le scénario 2 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice

Les coûts sociaux obtenus pour le scénario 2 sont exposés dans le Tableau 41 pour les coûts fixes et la part évolutive des coûts est présentée sur la Figure 67. Le coût total du scénario cumulé entre 2017 et 2030 est de 15,9 milliards de dollars. En 2030, le coût de gestion annuel des résidus stockés dans les parcs à résidus (Weikuang et nouveau parc) s'élève à 193,4 millions de dollars.

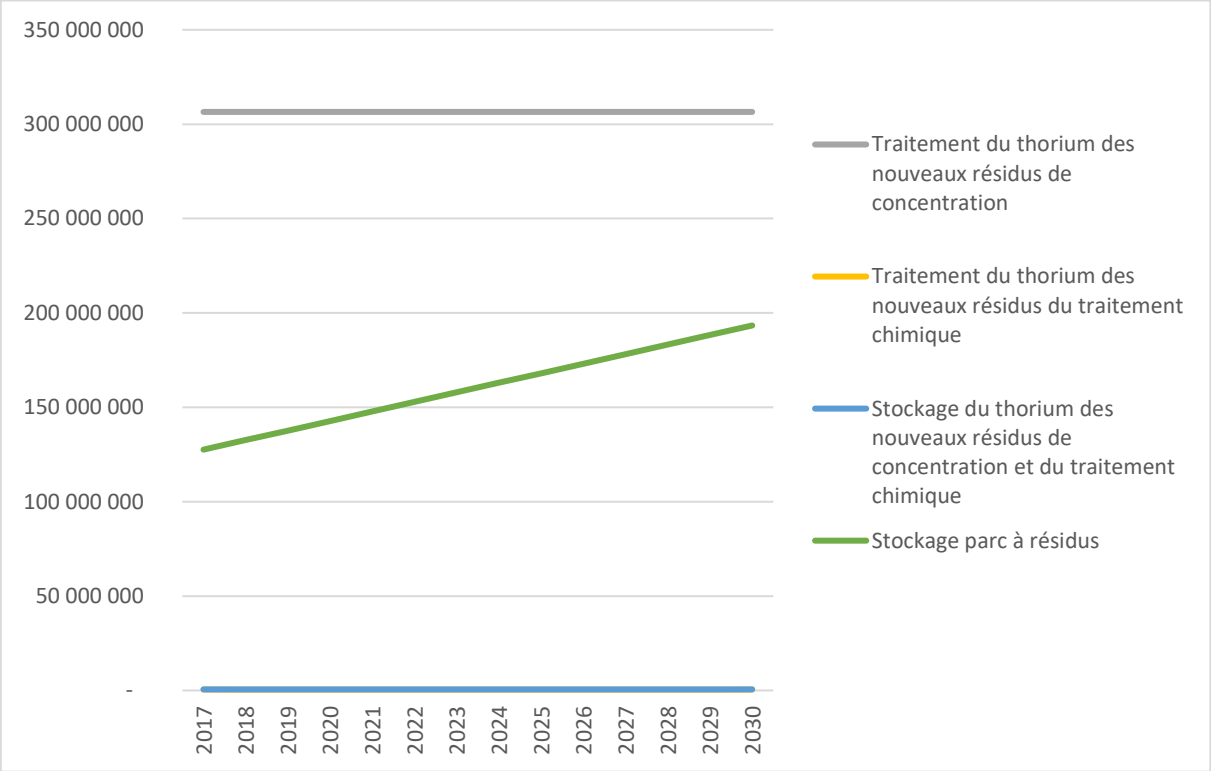


Figure 67 : Évolution annuelle des coûts sociaux variables liés aux déchets, Scénario 2 ($). Source : autrice

Le scénario 2 donne donc naissance à des coûts qui peuvent être considérés comme identiques à ceux du scénario 1. La très légère hausse en valeur absolue (5,6 millions d'euros) est due au stockage plus important de résidus de concentration dans le scénario 2. En effet la mine ouest a la même teneur en fer que la mine Principale-Est, mais présente une teneur en OTR beaucoup plus basse :

0,625% pour la mine Ouest et une teneur tournant autour de 3,5% à partir de 2017 pour la mine Principale-Est. Cette baisse de teneur en terres rares par rapport au scénario 1 engendre un léger surplus de résidus à gérer.

Ce scénario est donc indicatif de l'effet sur les coûts sociaux des déchets de la baisse de teneur en terres rares. Ainsi le passage d'une partie du gisement riche en OTR à une partie plus pauvre augmente les coûts de gestion du parc à résidus, avec un effet négligeable à court terme. Cependant, les coûts de stockage (thorium et résidus) sont les seuls coûts qui sont maintenus après la fermeture de la mine pendant une durée indéterminée. L'effet d'une légère baisse de teneur n'est donc visible qu'à long terme.

Néanmoins, il est à noter que la production de terres rares étant très faible, les pertes de terres rares sont nettement diminuées (Figure 62 et Figure 65). Ainsi, le scénario 1 provoque-t-il des déséconomies passant de 109 milles tonnes à 20 milles tonnes. La proportion de déséconomies par tonne d'OTR produite restant la même pour les deux scénarii (1,78 tonne de Nd perdu/tonne de Nd produit), puisque les rendements sont les mêmes. C'est pour ces faibles pertes en valeur absolue que l'ouverture de la mine ouest était préconisée par (Xu et Shi, 2005) dans leur appel pour préserver les ressources en terres rares. Il s'agissait pour eux de gagner du temps, sans perdre d'emplois en maintenant la production de fer, pour développer un procédé plus efficient pour récupérer les terres rares et plus propre en séparant le thorium. Cependant, la projection réalisée montre que ce scénario, s'il est satisfaisant pour préserver la ressource, n'est pas satisfaisant en termes de coûts associés aux déchets.

De plus, si ce scénario était réellement mis en place il générerait un défaut de production en OTR. Or, une partie de la chaîne de valeur de valorisation des terres rares étant implantée à Baotou ; il est très probable que le traitement chimique et la séparation continueraient leur production impliquant une importation conséquente de concentrés de terres rares du sud de la Chine et du Sichuan. Comme cela a été le cas avec l'importation de concentrés du nord de la Chine dans le sud lors de la fermeture de sites dans le sud de la Chine. Les pertes dans les autres provinces sont réputées moins élevées (les terres rares étant le produit principal), mais il s'agirait de vérifier cette hypothèse, et les coûts sociaux, sanitaires et environnementaux du sud de la Chine sont conséquents (voir paragraphe 2.1). Il y a donc un risque non négligeable que ce scénario génère des effets de compensation avec des déséconomies et des coûts sociaux externalisés sur d'autres sites.

Scénario 3 : *Business as usual* (PE)

Dans ce scénario la production minérale totale est constante et équivalente à celle de 2016, mais seule la mine P-E est en fonctionnement (PMin=PMin PE). Ce scénario montre avant tout que les ressources en OTR de la mine PE sont épuisées avant 2030, à la fin de l'année 2026. Dans notre scénario, la mine ouest prend le relai en 2027 (Figure 68). Cela confirme que pour maintenir une production d'OTR importante (environ 60% de la production chinoise) à Baotou, il faut trouver une alternative à l'exploitation de la mine PE dans les prochaines années. En effet, le scénario 2 montre que l'exploitation de la mine Ouest dans les conditions actuelles de production (Rdt OTR faible capacité de production d'environ 15 millions de tonnes de minerai) donne une production faible (environ 10% de la production chinoise).

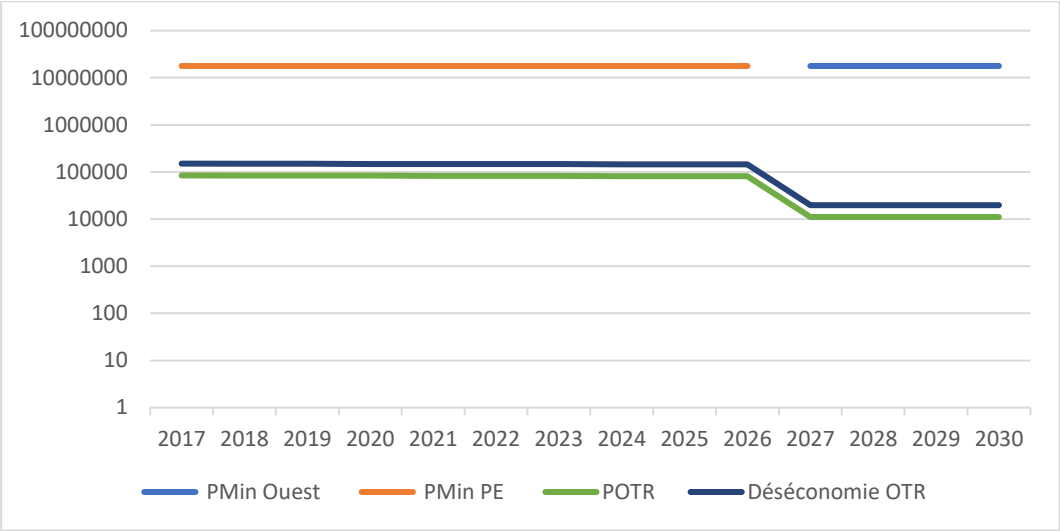


Figure 68 : Production annuelle pour le scénario 3 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice

Le coût total du scénario cumulé entre 2017 et 2030 est de 15,9 milliards de dollars, c'est-à-dire un coût similaire à celui du scénario 1. Ceci est dû au fait que finalement le scénario 3 est lui aussi un mélange de production de la mine PE et Ouest. De même en 2030, le coût de gestion annuel des résidus stockés dans les parcs à résidus (Weikuang et nouveau parc) s'élève à 191,8 millions de dollars, comme pour le scénario 1.

Scénario 4 : Amélioration rendement fer

Dans ce scénario, la production minérale totale et le rapport PMin PE/PMin Ouest sont constants et équivalents à ceux de 2016. Cependant, dans ce scénario des investissements sont pris en compte qui conduisent à l'amélioration du rendement de la production du fer (Rdt Fe) à 90% (Xu et Shi, 2005). La production d'OTR et les déséconomies en OTR sont exactement égales au scénario 1. La production de concentré de fer est augmentée. En ce qui concerne les déchets, la production de résidus de concentration (PRconc) est inférieure au scénario 1 (Figure 69) du fait du prélèvement plus important de concentré de fer. Le scénario 1 produisait environ 10,97 millions de tonnes de résidus de concentration annuellement, et le scénario 4 environ 8,97 millions de tonnes.

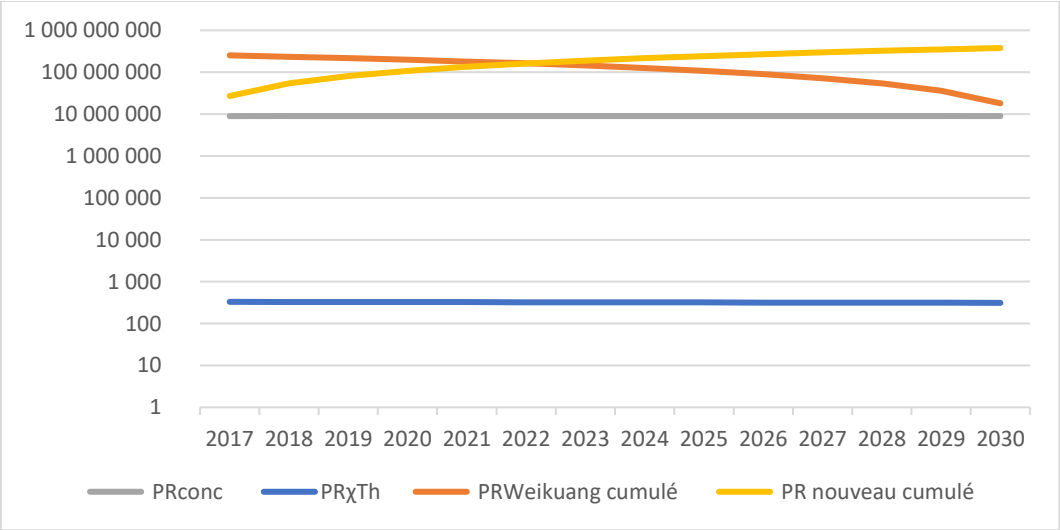


Figure 69 : Production annuelle de déchets pour le scénario 4 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice

Le coût total du scénario 4 cumulé entre 2017 et 2030 est de 15,8 milliards de dollars, c'est-à-dire un coût légèrement inférieur (de 94 millions de dollars) à celui du scénario 1. Ceci est attribuable à 100% au coût de stockage des résidus en parc à résidus avec des économies de plus de 95 millions de dollars de 2017 à 2030 par rapport au scénario 1 (le scénario 4 ayant des dépenses d'investissement supplémentaires par rapport au scénario 1).

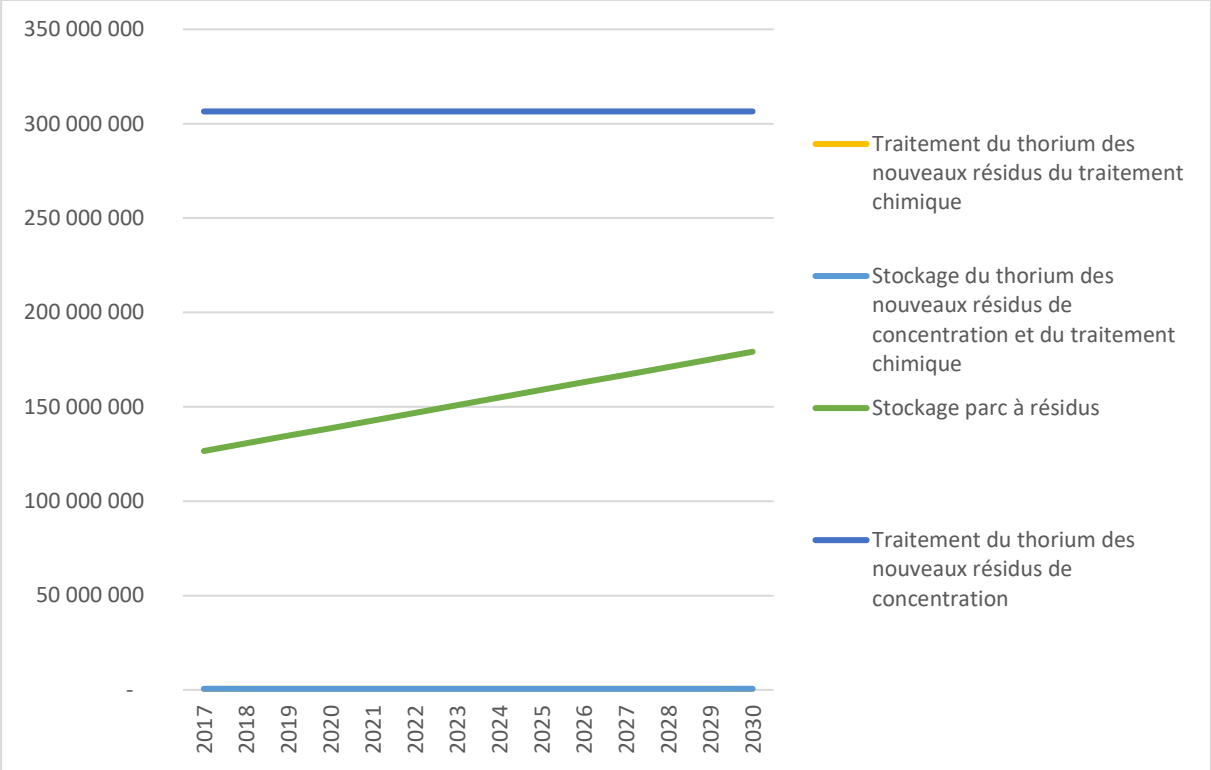


Figure 70 : Évolution annuelle des coûts sociaux variables liés aux déchets, Scénario 4 ($).
Source : autrice

Scénario 5 : Amélioration rendement OTR

Dans ce scénario la production minérale totale et le rapport PMin PE/PMin Ouest sont constants et équivalents à ceux de 2016. Cependant, dans ce scénario des investissements sont pris en compte qui conduisent à l'amélioration du rendement de la production d'OTR à 77,35 % (Zhou et al., 2017). Il faut rappeler que l'investissement nécessaire à l'amélioration du rendement de la production d'OTR est le coût social le plus incertain utilisé dans cette modélisation, l'autrice n'ayant pas connaissance d'estimation du coût d'un tel investissement. Du fait de ce rendement élevé, la production en terres rares est nettement plus élevée que dans les scénarii précédents avec une production de 493 milles tonnes en 2017 qui décroit jusqu'à 465 milles tonnes en 2030 du fait de la baisse de teneur en OTR (Figure 71). Les déséconomies sont également considérablement diminuées : si l'on atteint des déséconomies de l'ordre de 20 000 tonnes (similaires au scénario 2), elles ont considérablement diminué rapportées à la production (0,04 tonne de Nd perdu/tonne de Nd produit pour un rapport d'un 1,78 dans les scénarii 1 à 4). En ce qui concerne les déchets, la production de résidus de concentration (PRconc) est très légèrement inférieure au scénario 1 (Figure 72) du fait du prélèvement plus important de concentré d'OTR. En revanche la production de thorium issu du traitement chimique des terres rares (PRχTh) est multipliée par 8 par rapport au scénario 1 (environ 2500 tonnes par an au lieu de 330), car issue de l'étape de la concentration des terres rares.

L'augmentation du rendement d'OTR conduit à une erreur dans le modèle. En effet, avec l'augmentation de la production de concentré d'OTR, la somme du thorium dans les déchets est supérieure à la quantité de thorium prélevée dans le gisement (PMin*Teneur Th). Ceci est dû au facteur RdtRconcTh de 80,6% (Tableau 42) pris pour calculer la quantité de thorium passant dans les résidus de concentration. Ce facteur diminue en réalité avec l'augmentation du rendement OTR. Pour corriger cela, en l'absence de connaissances sur l'évolution de RdtRconcTh en fonction de Rdt OTR, l'hypothèse suivante est prise pour les scénarii 5 et 6 : PRconcTh = (PMin*Teneur Th) – PRχTh.

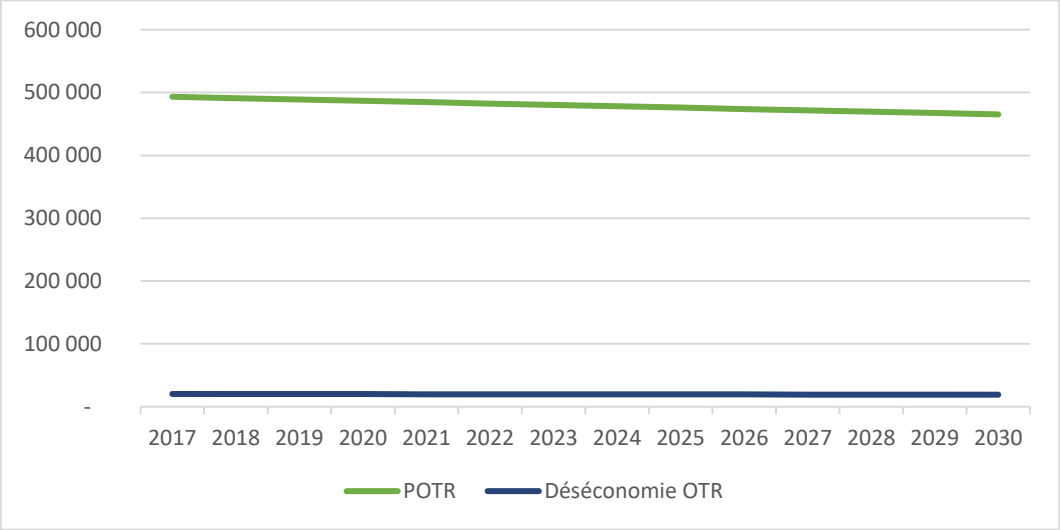


Figure 71 : Production d'OTR et déséconomies pour le scénario 5 (tonnes). Source : autrice

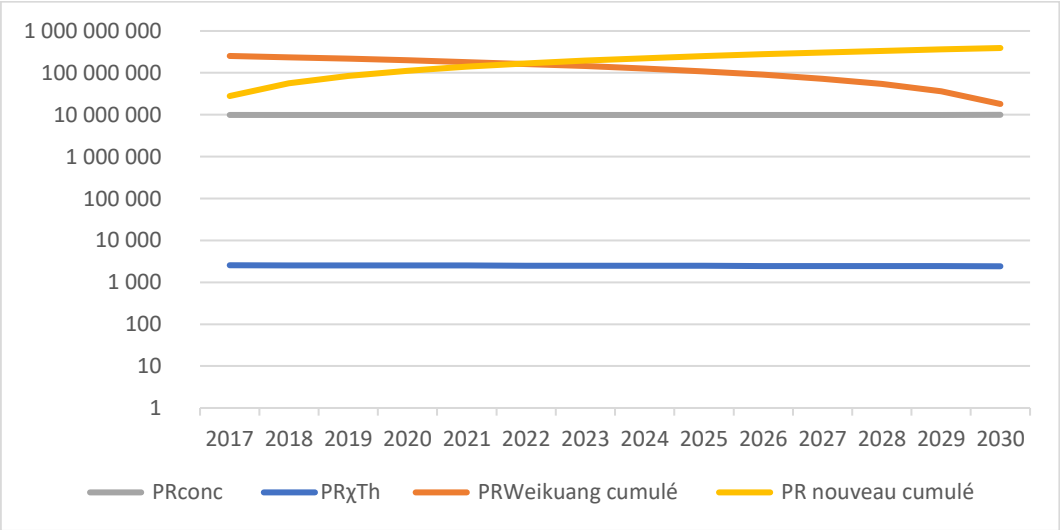


Figure 72 : Production annuelle de déchets pour le scénario 5 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice

Le coût total du scénario 5 cumulé entre 2017 et 2030 est de 14,6 milliards de dollars. C'est-à-dire un coût inférieur de 1,3 milliard à celui du scénario 1, principalement en raison du fait que le thorium est traité à l'étape de concentration des terres rares, traitement qui a un coût moins élevé que le traitement du thorium dans les résidus (1,3 milliard de dollars supplémentaires sur ce coût). En 2030, le stockage dans le parc à résidus est de 185,3 millions de dollars (pour 18,1 millions de tonnes

restantes dans Weikuang et 392 millions de tonnes décontaminées du thorium dans le nouveau parc à résidus) avec un coût évité par rapport au scénario 1 de 49 millions de dollars sur toute la période.

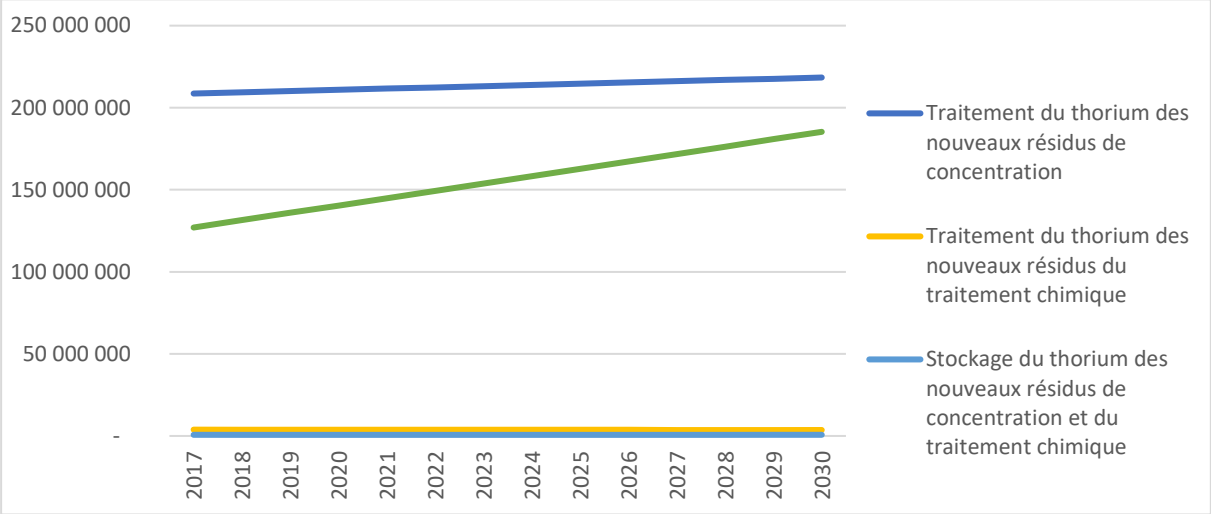


Figure 73 : Évolution annuelle des coûts sociaux variables liés aux déchets, Scénario 5 ($). Source : autrice

Scénario 6 : Source secondaire et améliorations technologiques

Dans ce scénario la production minière est stoppée et le parc à résidus est considéré comme une mine avec des coûts de production et rendements optimaux (voir Figure 74), c'est-à-dire que les 18,1 millions de tonnes par an extraites de Weikuang ne sont pas seulement traitées pour séparer le thorium, mais aussi pour valoriser le fer et les terres rares de ces déchets.

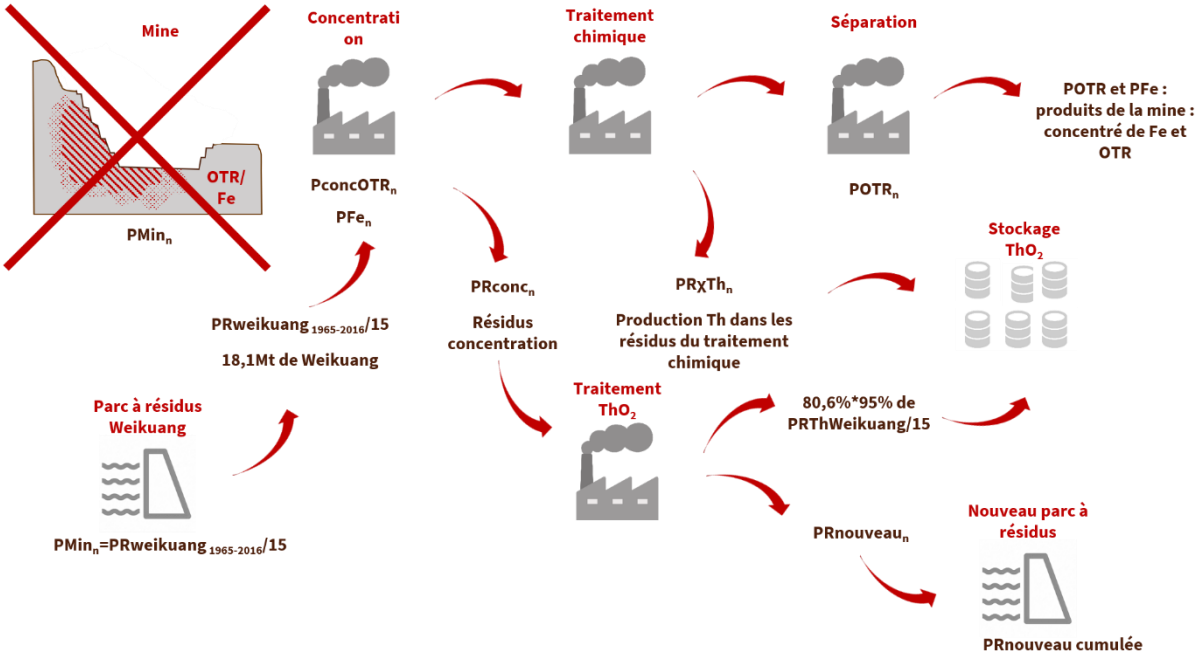


Figure 74 : Schéma présentant le scénario 6. Source : autrice

Les variables sont les mêmes que dans le paragraphe 2.2.3, avec

$PRconc_n$: la masse de résidus de concentration : $PRconc_n = PMin_n - PconcOTR_n - PconcFe_n$
$PRnouveau_n$: la masse de résidus ajoutée dans le nouveau parc à l'année n, soit :
$PRnouveau_n = PRconc_n – 95\% * PRconcTh_n$
PRnouveau cumulée : la masse cumulée de résidu dans le nouveau parc
PRWeikuang cumulée : la masse restante de résidus dans l'ancien parc de Weikuang :
PRWeikuang cumulée = $PRWeikuang_{1965-2016}$ - x *($PRWeikuang_{1965-2016}$/15)
x le nombre d'années à partir du début de la dépollution (1=2017)

Tableau 43 : Mode de calcul des coûts pour le scénario 6

	CU		Multiplié par
Coût de séparer le thorium des résidus			
Coût de traitement du thorium des nouveaux résidus de concentration issus de l'exploitation de Weikuang	67 021	$/t ThO_2	$PRconcTh_n$= ($PRThWeikuang_{1965-2016}$/15)*80,6%
Coût de traitement du thorium des nouveaux résidus du traitement chimique issus de l'exploitation de Weikuang	1 505	$/t ThO_2	$PRχTh_n$
Coût de stockage du thorium			
Stockage du thorium des nouveaux résidus de concentration et du traitement chimique	127	$/t ThO_2	(95% * $PRconcTh_n$) + $PRχTh_n$
Coût de stockage dans le parc à résidus actuel et le nouveau parc à résidus			
Stockage parc à résidus	0,4515	$/t Résidus cumulés	PRnouveau cumulée + PRWeikuang cumulée
Dépenses pour faire baisser les déséconomies et le coût de gestion des déchets (scénarii 4 et 5 uniquement)			
Améliorer Rdt OTR à 77,35%	1 505 009	$ (R&D)	1/15
Amélioration Rdt Fe à 90%	150 501	$ (R&D)	1/15
Déséconomies OTR			
20% des terres rares qui entre dans les parcs à résidus sont considérées comme perdues	20%	t	$PROTRconc_n$ +20% $PROTRχ_n$) = 20%((PMin*TeneurOTR) -80% (POTR/(RdtχOTR*RdtSepOTR)))

Le choix de ce scénario correspond à l'idée de transformer le parc à résidus en une exploitation « intégrée » (Wang et al., 2019), c'est-à-dire en mettant au point un procédé permettant de valoriser avec de forts rendements plusieurs éléments. Cette idée de valorisation des résidus est une idée courante pour réduire la quantité de résidus à stocker (Waggitt, 2011) et pour pouvoir amortir le coût de la dépollution (Wang et al., 2019). Il s'agit d'ajouter des étapes de concentration en plus des étapes actuelles. C'est une hypothèse très optimiste (sous-estimation des coûts), car les procédés minéralurgiques et hydrométallurgiques ne seraient pas les mêmes et qu'il est souvent délicat de réutiliser des résidus (granulométrie fine rendant délicate la séparation du fer et des OTR, risques de déstabilisation de la digue, …). La faisabilité de ce scénario génère cependant des controverses qui seront traitées dans le point suivant.

Il est proposé de s'inspirer de l'article de Wang et du concept de procédé intégré qui y est cité. Cependant d'après notre revue bibliographique les rendements proposés sont trop optimistes. Il n'est notamment pas possible d'atteindre le rendement optimal pour tous les produits en même temps. Il est donc proposé de s'appuyer sur l'article de Zhou et al. 2017 qui propose de récupérer le fer, les terres rares avec un nouveau procédé hydrométallurgique avec les rendements suivants :

Rdt OTR= 77,35% (Zhou et al., 2017)

Rdt Fe=77,8% (Zhou et al., 2017)

Les facteurs utilisés pour construire le scénario sont présentés dans le Tableau 44. Le calcul de RdtconcFe est réalisé à partir de la formule (4) à partir du nouveau rendement du fer. Les teneurs en Fe et Th sont calculées à partir des quantités de fer et de thorium contenues dans Weikuang en 2016 d'après le modèle de production des déchets présentés au paragraphe 2.2.3.

Tableau 44 : Facteurs utilisés pour le scénario 6

Rdt OTR	**77,35%**
Rdt Fe	77%
RdtχOTR*RdtsepOTR	74%
Teneur OTR du concentré	55%
RdtconcFe	16,1%
RdtTh	95,0%
Teneur Fe Weikuang	13,0%
Teneur Th Weikuang	0,044%
Teneur OTR Weikuang	6,87%

Dans ce scénario, les coûts d'extraction ne sont plus pris en compte puisqu'il s'agit d'exploiter les déchets et non de les dépolluer, ce n'est donc plus un coût social, mais un coût d'opération.

Pour le scénario 6, la masse de matière première exploitée issue de Weikuang est égale à 18,1 millions de tonnes (soit PMin=18,1 millions de tonnes). La masse est donc un peu plus élevée que PMin dans les précédents scénarii. De plus, comme le montre le Tableau 44, la teneur en OTR du parc à résidus est nettement plus élevée que la teneur moyenne en OTR des deux mines pour les années 2017-2030 (tournant autour de 3,5%), tout comme la teneur en thorium. Seul le fer qui a été exploité avec un meilleur rendement depuis le début de l'exploitation se trouve en faible quantité dans les résidus avec une teneur de 16,1% seulement.

Ces facteurs combinés à un rendement multiplié par 7,7 conduisent à une production de terres rares considérable soit961 923 tonnes par an (Figure 75). Pour rappel, la production chinoise atteignait 130 000 tonnes par an pendant le pic de production de 2010. Cela signifie que ce scénario demanderait des dépenses de capitaux considérables pour augmenter ainsi la capacité de production.

Les déséconomies sont également dérisoires en comparaison de la production, égales à 39 606 tonnes par an, soit 0,04 tonne de néodyme perdu par tonne de néodyme produit (ratio similaire au scénario 5).

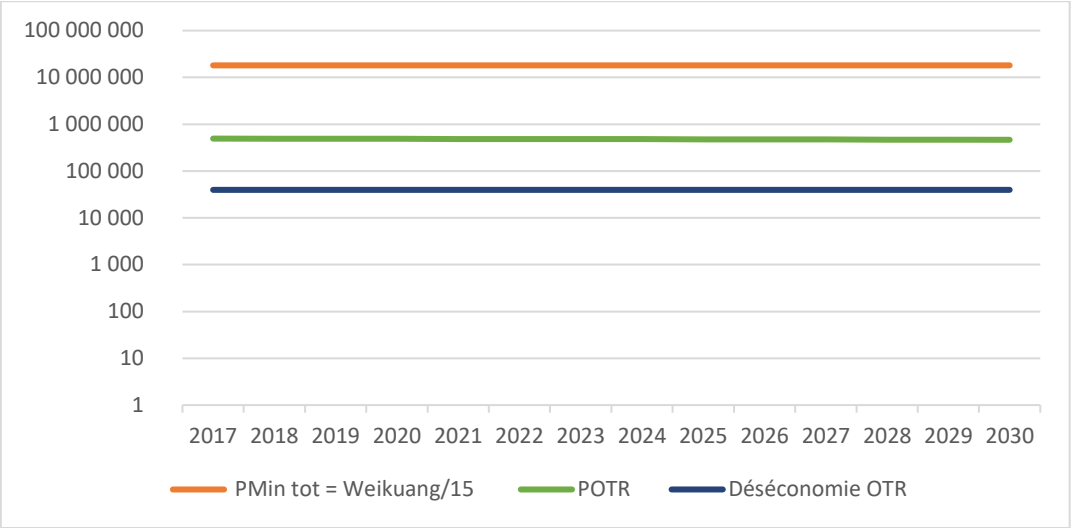


Figure 75 : Production annuelle pour le scénario 6 (échelle logarithmique, en tonnes). Source : autrice

C'est le seul scénario qui fait baisser notablement les coûts totaux cumulés liés aux déchets de production avec un coût cumulé de 2017 à 2030 de 4,35 milliards de dollars, comparé à des coûts proches de 16 milliards de dollars pour tous les autres scénarii (voir Tableau 46 et Figure 79 ci-après). Cela est dû à plusieurs facteurs :

- Le coût d'extraction des résidus n'est plus compté comme coût social puisqu'il s'agit d'une opération commerciale : 1,9 milliards de dollars de coûts cumulés entre 2017 à 2030 évités par rapport aux scénarii 1 à 5 (Tableau 41).
- Le thorium contenu dans le parc de Weikuang est traité en grande partie à l'étape de traitement chimique des OTR au lieu de l'étape de concentration (voir Figure 74) : 7,4 milliards de dollars en coûts cumulés pour les scénarii 1 à 5 pour le traitement des résidus de Weikuang (Tableau 41), alors que dans le scénario 6 le thorium de Weikuang est traité au niveau de la concentration pour un coût de 2,76 milliards de dollars et pour 105 millions de dollars au niveau du traitement chimique pour un coût total de 2,87 milliards, soit 4,5 milliards de dollars d'économies sur 2017-2030.
- Le couplage de la dépollution et de la production qui permet de diminuer la masse traitée et d'éviter le coût de traitement de nouveaux résidus issus de la mine : au moins 3 milliards de dollars économisés sur le traitement des résidus sur toute la période (coût du traitement des résidus de concentration et traitement chimique pour le scénario 5). Cela permet également de stocker moins de thorium (9,8 millions de dollars économisés par rapport au scénario 5 sur toute la période).
- Ce couplage dépollution/production et l'augmentation des rendements qui permet de faire diminuer le coût de stockage des résidus dans le parc. Les économies réalisées sont de 722 millions de dollars sur la période 2017-2030 par rapport au scénario 5. Ce n'est pas le poste d'économies le plus important à court terme, mais cela est important pour le long terme.

En effet, le scénario 6 a évidemment pour avantage de faire réellement réduire le volume total de résidus stockés dans le parc à résidus (Figure 76). En effet, en 2030 dans le scénario 6 le nouveau parc à résidus contient environ 180 millions de tonnes pour près de 400 millions de tonnes dans tous les autres scénarii (de 1 à 5 : 406, 410, 406, 378 et 392 millions de tonnes). Cela permet de faire diminuer le coût de stockage des résidus (Figure 77) à 89 millions de dollars en 2030, bien plus faible que dans tous les autres scénarii (avec pour le scénario 4, le deuxième meilleur scénario sur ce plan,

179 millions de dollars en 2030). Cela laisse présager des coûts de long terme nettement plus faibles que les autres scénarii. Les coûts fixes pour ce scénario sont présentés dans le Tableau 45.

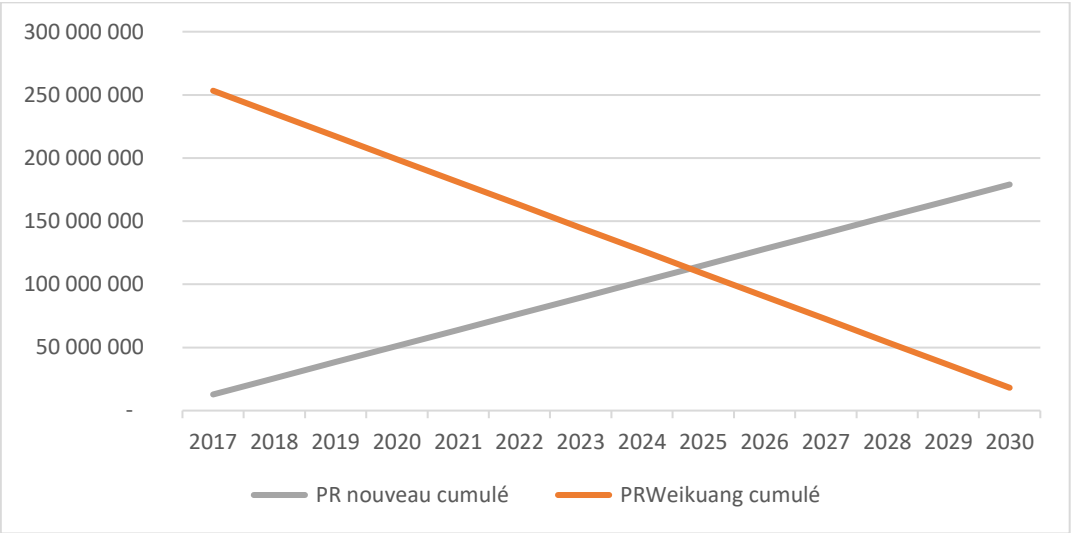


Figure 76 : Accumulation de résidus dans les parcs à résidus pour le scénario 6 (tonnes). Source : autrice

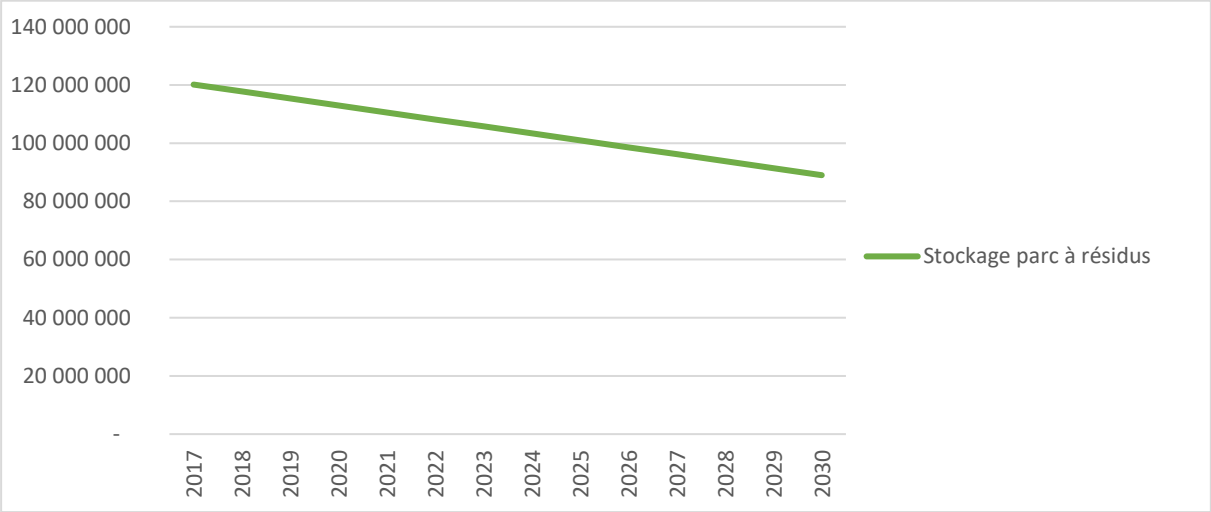


Figure 77 : Évolution annuelle des coûts sociaux liés au stockage en parc à résidus, Scénario 6 ($). Source : autrice

Tableau 45 : Coûts fixes scénario 6

	Coût annuel 2017-2030 pour scénario 6($)
Coût de traitement du thorium des résidus de concentration issus de l'exploitation de Weikuang	197 240 749
Coût de traitement du thorium des résidus du traitement chimique	7 510 317
Stockage du thorium des nouveaux résidus de concentration et du traitement chimique	985 714
Améliorer Rdt OTR à 77,35%	100 334
Amélioration Rdt Fe à 77,8%	10 033

ix. Comparaison des différents scénarii et conclusion sur le lien entre épuisement et coûts sociaux

Allocation des coûts sociaux liés aux déchets au néodyme

Comme cela a été vu au début du point 2.2.4, les coûts sociaux calculés précédemment sont ici attribués à la production de néodyme.

L'allocation massique attribue environ 1% des coûts aux OTR, sauf pour le scénario 2 (allocation diminuée à 0,2%) et les scénarii 5 et 6 où l'augmentation de la production d'OTR conduit cette allocation à respectivement environ 6,7% et 25%.

L'allocation économique attribue environ 50% des coûts aux OTR, sauf pour le scénario 2 (allocation diminuée à 16%) et les scénarii 5 et 6 où l'augmentation de la production d'OTR conduit cette allocation à respectivement environ 90% et 97%.

Cela traduit bien le statut de sous-produit, en quantité faible, mais à haute valeur ajoutée des OTR à Baiyun Ebo. Il peut paraître étonnant qu'avec la moitié de la valeur économique attribuée aux terres rares, la priorité accordée par les industriels à l'amélioration de l'efficience du procédé soit si faible. Pour rappel (voir paragraphe i. ci-avant), l'allocation économique pour les terres rares est réalisée sur la base des prix de 2013, or ces prix sont fortement volatiles : selon (BRGM, 2015) l'écart de prix maximal de 2002-2003 à la crise de 2011 pour le dysprosium est de 32 $/kg à 3 410 $/kg, soit une multiplication par un facteur 106 (un « record absolu » de volatilité) et le prix du néodyme sur la même période passe de 6,67$/kg à 467 $/kg, soit une multiplication par un facteur 70. Or, si le fer a également un prix volatile (comme tous les métaux), cette volatilité est moins forte avec un écart maximal de 2002-2003 par rapport au pic de 2008 de 31$ à 197$ soit une multiplication du prix par 5 (IndexMundi, 2019). Le fer est donc plus susceptible d'apporter un revenu stable pour les activités minières. De plus, la priorité mise sur l'obtention du fer est un choix industriel qui est d'abord lié à la volonté d'obtenir de l'acier à bas prix. Ainsi, d'après Ma Pengqi, ancien directeur du *Baotou Rare Earth* Research *Institute* (Xiao, 2019), si l'avenir de l'industrie à long terme à Baotou est lié aux terres rares, le groupe Baotou Iron & Steel utilise aujourd'hui d'anciennes technologies avec un rendement faible, car la priorité du groupe est la production de masse d'acier. Afin de maintenir l'activité du groupe, il s'agit de maintenir la quantité de minerai traité. Si l'extraction de minerai de fer est réduite, il devient nécessaire pour maintenir le même niveau de production d'acier d'importer du minerai plus coûteux de l'étranger et donc les coûts augmentent. Afin de maintenir un coût bas du minerai de fer pour la production de l'acier, les terres rares sont gaspillées. Enfin, Ma Pengqi (Xiao, 2019) souligne que la surproduction de terres rares chinoises par rapport à la demande mondiale semble pousser à ce que la compagnie comme la municipalité ne se préoccupent pas des pertes engendrées par le procédé actuel. Pour Ma Pengqi (Xiao, 2019), il s'agit de la cause sous-jacente des problèmes environnementaux liés au bassin de résidus.

Les deux types d'allocations (Figure 78) confirment que les 3 premiers scénarii ne sont pas des scénarii performants en termes de coûts sociaux des déchets, et soulignent que le scénario 6 est le meilleur scénario en termes de coûts sociaux liés aux déchets. Le scénario 4 est plus performant que le scénario 5 avec l'allocation massique, mais cela est uniquement dû au fait qu'il y a peu de terres rares produites dans ce scénario, ce qui rend ce scénario quelque peu obsolète dans la recherche d'une source d'approvisionnement plus soutenable en terres rares.

Dans la suite de l'analyse, les résultats de l'allocation économique seront utilisés.

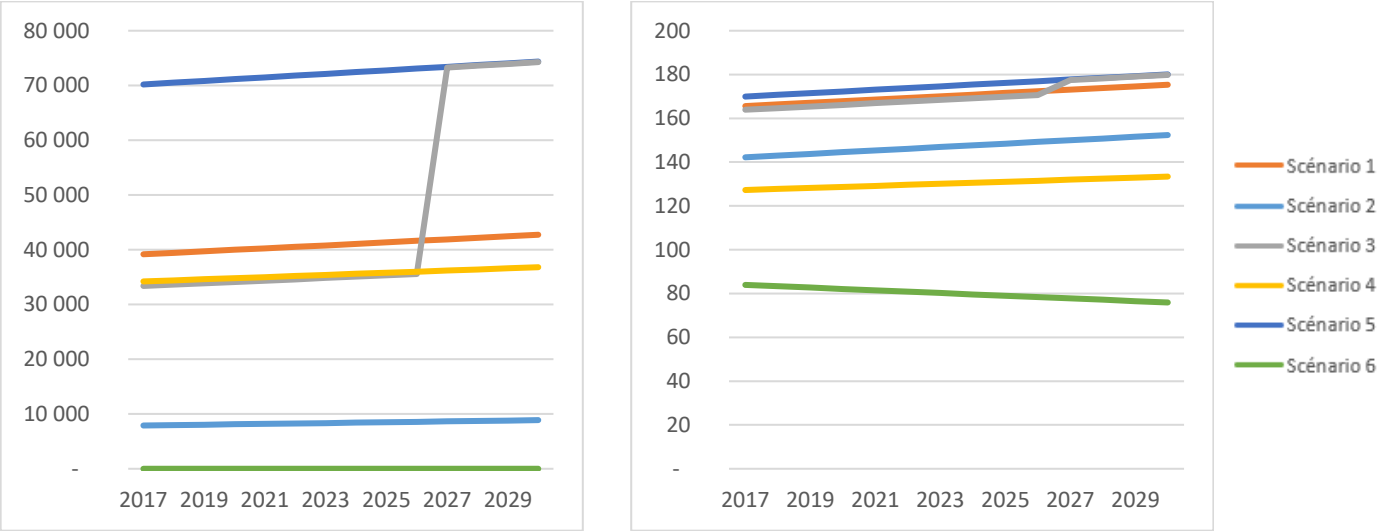


Figure 78 : Évolution 2017-2030 du total des coûts sociaux liés aux déchets par tonne de néodyme produit ($/tonne de Nd produit). Source : autrice

Allocation économique à gauche et allocation massique à droite

Comparaison des différents scénarii

La présentation des différents scénarii a permis de voir qu'à production minière constante (scénarii 1 à 5) les coûts sociaux cumulés de 2017 à 2030 liés aux déchets miniers sont très élevés et ne diffèrent pas d'un scénario à l'autre (Tableau 46). Les scénarii 1 à 5 ont également montré que la diminution de la teneur en OTR n'avait pas d'impact majeur sur les coûts sociaux, en particulier le scénario 2 avec une teneur plus faible en OTR qui génère un surcoût négligeable par rapport au scénario 1, du moins à court terme. Le scénario 3 montre l'importance de trouver une alternative à la mine PE pour le maintien d'un niveau de production des terres rares équivalent à celui de 2016, la mine PE étant vouée à s'épuiser rapidement.

Tableau 46 : Comparaison des coûts sociaux 2017 à 2030 pour les différents scénarii

2017 - 2030	Coûts sociaux cumulés (milliards de $)	Moyenne du coût annuel $/t Nd produit, Estimation basse	Moyenne du coût annuel $/t Nd produit, Estimation haute	Déséconomies (t Nd perdu/t Nd produit)
Scénario 1	15, 9	40 939	81 878	1,78
Scénario 2	15,9	72 274	144 548	1,78
Scénario 3	15,9	45 709	91 419	1,78
Scénario 4	15,8	35 502	71 004	1,78
Scénario 5	14,6	8 385	16 770	0,04
Scénario 6	4,4	0,2	0,3	0,04

Le Tableau 46 propose une fourchette de coûts associés aux déchets allant du coût minimal calculé précédemment à deux fois ce coût. En effet, l'estimation réalisée pour les coûts sociaux d'abattement et de prévention liés aux déchets miniers est une estimation à minima, ne prenant pas en compte le coût du capital à investir pour prendre en charge les opérations de dépollution, et faisant le choix de retenir le coût le plus faible quand des fourchettes étaient proposées par les auteurs (traitement du thorium à la phase de traitement chimique, stockage des résidus dans le parc à résidu, investissements à réaliser pour obtenir un meilleur rendement).

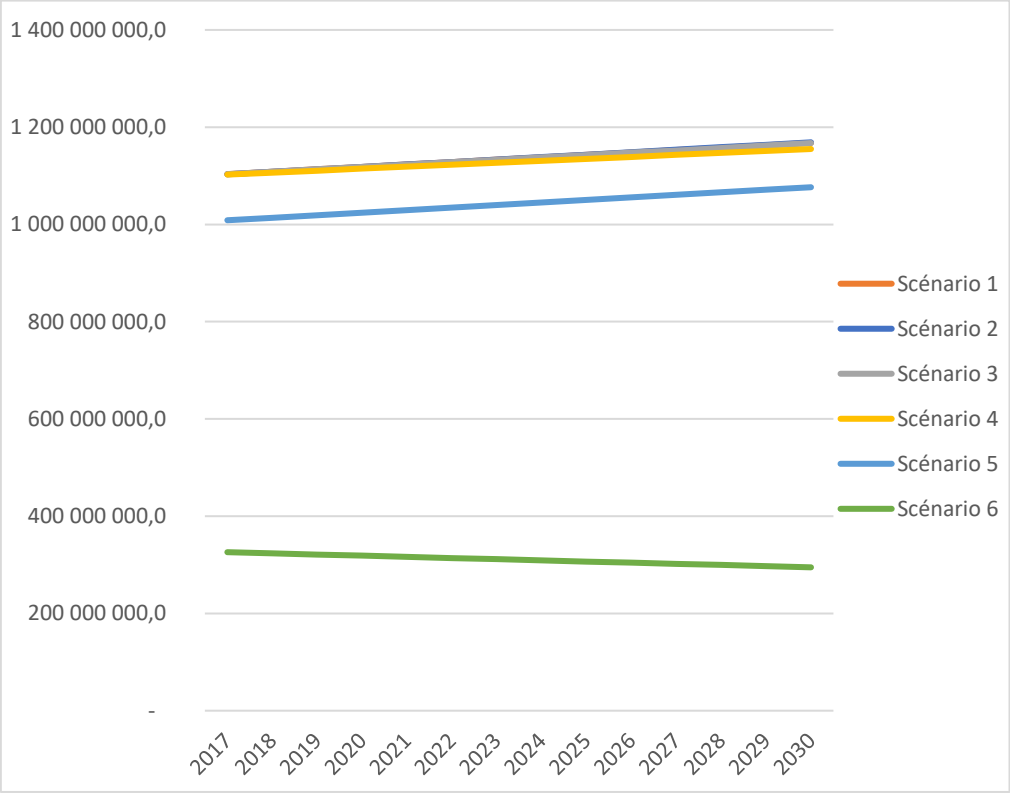


Figure 79 : Évolution 2017-2030 du total annuel des coûts sociaux liés aux déchets en valeur absolue (en $). Source : autrice

À rendement constant (scénarii 1 à 3), le scénario 2 permet d'éviter des déséconomies d'OTR en valeur absolue (voir Figure 80), du fait de la faible teneur en OTR du gisement Ouest. Notamment, il permet de maintenir une production minière en minerai de fer (et donc le bassin d'emplois minier) en attendant d'améliorer le rendement du procédé actuel de concentration du minerai, voire de développer un procédé pour exploiter les terres rares à partir des résidus. C'est pourquoi l'ouverture de la mine Ouest a été proposée par certains auteurs (Xu & Shi, 2005) comme possible transition vers une exploitation des terres rares plus efficiente. La mise en place d'un procédé plus efficient doit rester suffisamment rapide pour ne pas générer des effets de compensation trop importants.

L'augmentation des rendements permet de faire diminuer les coûts sociaux totaux liés aux déchets (Figure 79).

L'augmentation du rendement du fer (scénario 4) permet une diminution très faible du coût total du scénario cumulé entre 2017 et 2030 de 94 millions de dollars par rapport au scénario 1 du fait de la diminution du parc à résidus. Si cela a un effet négligeable sur les coûts sociaux cumulés des déchets à moyen terme (Tableau 46), cela permet de diminuer les coûts futurs avec un coût de gestion du parc à résidus qui subsistera après fermeture de la mine (Figure 81).

L'augmentation du rendement en terres rares (scénario 5), bien que plus difficile à mettre en place d'un point de vue industriel (et donc plus coûteuse), permet à la fois de faire diminuer substantiellement les déséconomies (voir Figure 80) et les coûts sociaux cumulés associés aux déchets (Tableau 46) à moyen terme. En effet, la dépollution des déchets est moins chère, car le thorium est traité à l'étape de concentration des terres rares, traitement qui a un coût moins élevé que le traitement du thorium dans les résidus du traitement chimique.

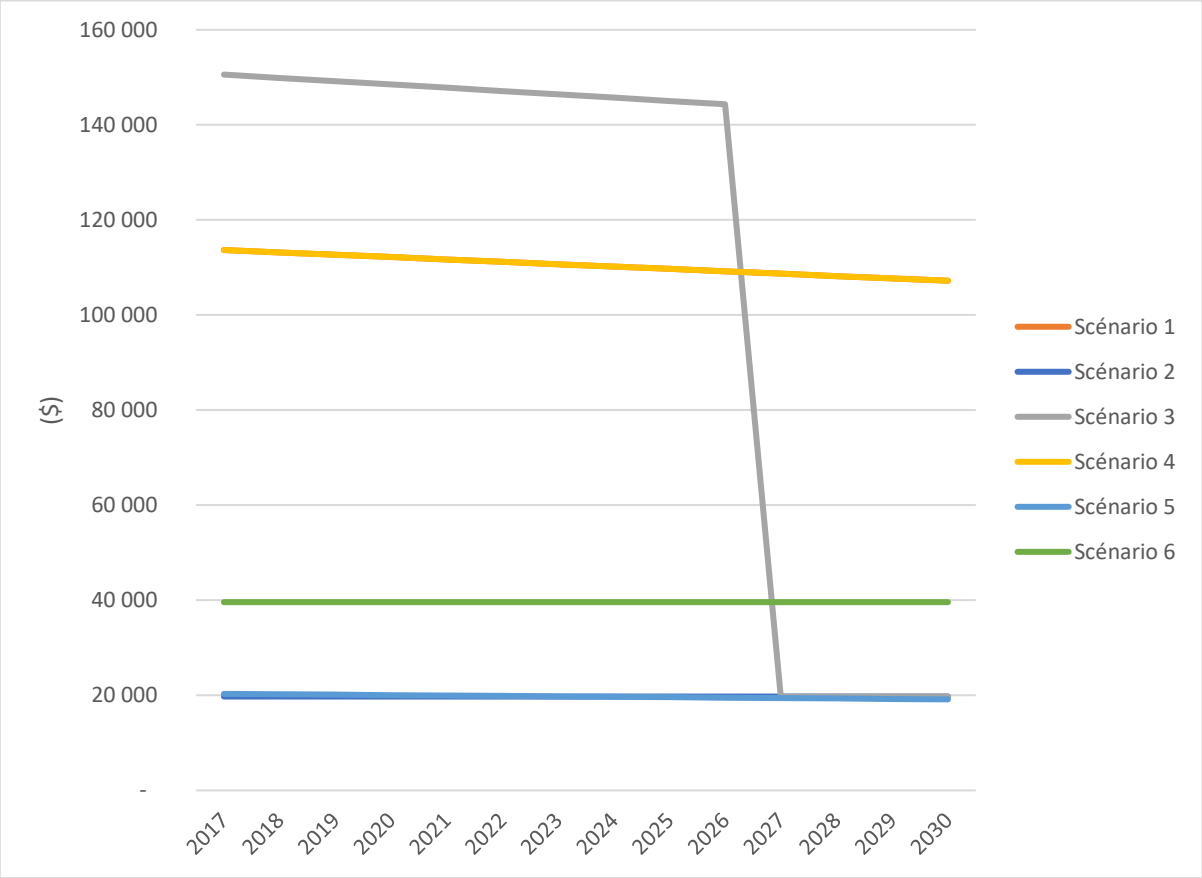


Figure 80 : Déséconomies en OTR selon les différents scénarii (en tonne). Source : autrice

Cela montre que la diminution des déséconomies générées lors de la production a un impact supérieur à la diminution de la teneur en OTR dans notre cas. Cette diminution a un double impact sur les coûts sociaux liés aux déchets : un impact direct puisqu'elle diminue la masse de déchets produits et donc le coût de gestion des déchets, et un impact indirect puisqu'à quantité égale de minerai extrait, les productions de terres rares et de fer sont plus importantes et cela induit donc une extraction moins importante pour satisfaire la demande.

L'analyse des différents scénarii montre que seul le scénario 6 permet de réellement diminuer la valeur absolue des coûts sociaux liés aux résidus de production des terres rares à moyen terme (Tableau 46) et long terme. A long terme, en effet, le couplage de la dépollution et de l'extraction des matières valorisables dans les résidus permet de faire diminuer les coûts sociaux liés aux déchets par diminution substantielle de la masse de résidus stockés (Figure 81).

Le traitement des OTR réalisé de manière concomitante avec la dépollution du thorium permet de faire baisser le coût de dépollution du thorium (voir l'analyse des scénarii 5 et 6). Cette conclusion est vraie sous réserve que le coût avancé par (Xu et Shi, 2005) pour la dépollution du thorium dans les résidus de traitement chimique et l'analogie avec la séparation de l'uranium comme sous-produits de l'acide phosphorique (Kim et al., 2016) soient vérifiés.

Ces deux dernières observations conduisent à penser qu'il est peu pertinent d'envisager un projet de dépollution des résidus par extraction dans le parc à résidus de Weikuang et traitement du thorium sans le coupler à l'extraction des matières valorisables de ces résidus. Une analyse des coûts environnementaux et notamment du coût énergétique de telles opérations viendrait probablement renforcer ce constat.

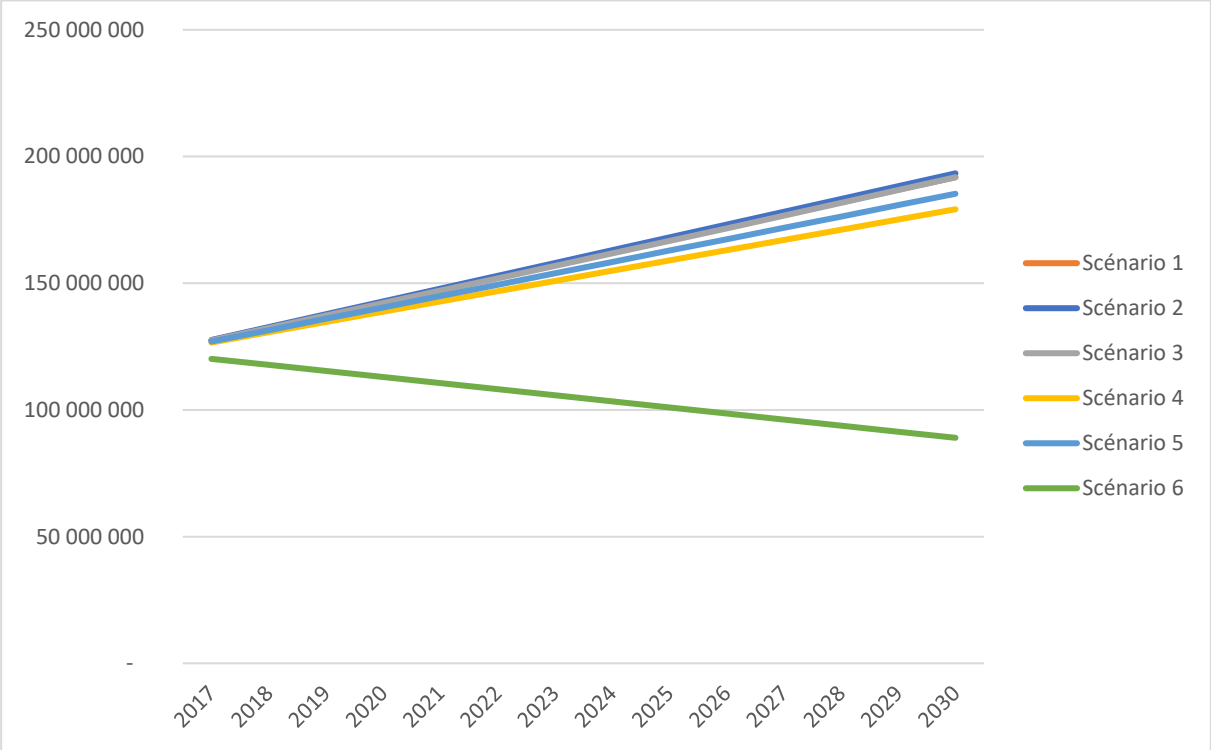


Figure 81 : Coût annuel du stockage dans le parc de Weikuang et le nouveau parc à résidu ($).
Source : autrice

Enfin, le scénario 6 peut être considéré comme un scénario « idéal » - dans le sens du meilleur scénario techniquement envisageable, bien que sa faisabilité soit encore à prouver - en termes de

gestion des déchets et d'exploitation des ressources secondaires liées à la mine. En ce sens les coûts sociaux évalués dans le scénario 6 peuvent être considérés comme les coûts sociaux irréductibles liés aux déchets dans le cadre d'une production extractive à Baiyun Ebo

La différence entre le scénario 6 et le scénario 1 peut être considérée comme les coûts d'abattement et de prévention liés aux déchets, dans le sens de Kapp, c'est-à-dire des coûts « techniquement évitables ».

A moyen terme, les coûts sociaux du scénario 6 étant négligeables (voir Tableau 46 et Tableau 47), cela revient à des coûts sociaux annuels moyens liés aux déchets à Baiyun Ebo de 40 938 $/t de néodyme produit à 81 877$/t de néodyme produit sur la période.

Soit à un pourcentage du prix de la ressource (2013) de 61 à 123 % (voir ci-après l'explication sur le calcul de ce pourcentage).

Les déséconomies de l'exploitation du néodyme, liées à une absence de prise en charge du phénomène d'épuisement peuvent donc être considérées être de 1,74 tonne de Nd/tonne de Nd produit.

La rentabilité de l'exploitation minière questionnée du point de vue de la soutenabilité

Enfin l'allocation économique (Figure 78) réalisée avec les prix de 2013 (B. Zhou et al., 2017) est utilisée pour comparer les coûts annuels obtenus par tonne de Néodyme par rapport au prix de marché du néodyme en 2013 (Tableau 47). L'allocation massique ne paraît pas pertinente pour cet objectif, car elle attribue un coût élevé au fer, qui est une matière première moins chère, et un coût faible aux terres rares qui ont une plus forte valeur ajoutée.

Cette comparaison est faite à titre purement indicatif pour comparer les différents scénarii et illustrer la problématique de la rentabilité, d'un point de vue sociale et environnementale des opérations minières. En effet, cela permet de voir que lorsque des mesures sont prises pour endiguer autant que possible (sans pour autant supprimer) les impacts des déchets miniers, sans remettre en question le modèle d'exploitation minière actuelles (scénarii 1 à 3), on voit nettement que la rentabilité de l'exploitation est mise à mal (Tableau 47). Seul le scénario 6, qui ne relève plus d'une exploitation minière classique, mais de l'exploitation des déchets miniers, semble générer des coûts sociaux qui pourraient être soutenables. C'est-à-dire, un scénario limitant la génération d'impacts sociaux et environnementaux et limitant les coûts générés pour endiguer ces impacts. Ces coûts devant être pris en charge sur le très long terme comme l'exige la problématique des déchets miniers.

Néanmoins, comme cela a été développé dans le chapitre 2, les coûts d'abattement et de prévention calculés ne constituent pas une indication du « vrai prix » de la ressource. La prise en charge de ces coûts ne se fait pas nécessairement via une augmentation du prix de revente, plusieurs questions se posent quant à la prise en charge de ces coûts (par quels acteurs ? selon quelle modalité ?) et seront discutées au paragraphe xii.

Tableau 47 : Part du prix du néodyme (prix de 2013) que représente les coûts sociaux annuels moyens (2017-2030) des déchets attribués au néodyme par l'allocation économique

	Moyenne du coût annuel $/t Nd produit	**Moyenne du coût annuel $/t Nd produit**	**Pourcentage du prix 2013 (66 703$/t)**	**Pourcentage du prix 2013 (66 703$/t)**
	Estimation basse	**Estimation haute**	**Estimation basse**	**Estimation haute**
Scénario 1	40 939	81 878	61%	123%
Scénario 2	72 274	144 548	108%	217%
Scénario 3	45 710	91 419	69%	137%
Scénario 4	35 502	71 004	53%	106%
Scénario 5	8 385	16 770	13%	25%
Scénario 6	0,2	0,3	0%	0%

Il faut rappeler que l'investissement nécessaire à l'amélioration du rendement de la production d'OTR utilisé dans le scénario 5 et 6 est le coût social le plus incertain utilisé dans cette modélisation, l'autrice n'ayant pas connaissance d'estimations du coût d'un tel investissement. Cependant, en multipliant par 1000 l'investissement nécessaire pour améliorer le rendement des terres rares (passant d'1,5 million de dollars à 1,5 milliard de dollars), cela change d'1% la part du prix du néodyme en 2013 que représentent les coûts sociaux des déchets attribués au néodyme par l'allocation économique. Autrement dit, les coûts sociaux évités sont tellement importants dans ces scénarii que le résultat est peu sensible à l'investissement de départ.

Part des coûts sociaux des déchets de l'exploitation du néodyme liée à l'épuisement

Il s'agit enfin d'étudier la part du coût social des déchets liée à l'épuisement.

Pour rappel, l'épuisement a été défini dans le chapitre 1 comme deux phénomènes conjoints, continus et irréversibles : la perte de quantité (déséconomies) et de qualité (diminution des teneurs du gisement et difficultés du recyclage) de la ressource au fur et à mesure de son utilisation dans notre économie d'une part ; et comme un démultiplicateur d'impacts environnementaux, sanitaires et sociaux des filières de matières premières minérales d'autre part. Il s'agissait ici de regarder le lien entre la perte de quantité et de la qualité et la démultiplication des coûts sociaux et environnementaux de la production et d'évaluer les déséconomies de l'exploitation du néodyme.

De plus, il a été vu que, dans ce cas d'étude précis, la baisse de la teneur du gisement a un effet négligeable sur le coût social des déchets liés à l'exploitation minière. Les difficultés de recyclage n'étant pas étudiée dans le périmètre de cette étude, il peut être considéré que la question de l'épuisement se résume ici à la question des déséconomies.

Dans ce cadre, le scénario 5 peut être considéré comme un scénario où le phénomène d'épuisement est réduit autant que techniquement possible, en conservant les autres paramètres d'exploitation égaux à ceux du scénario 1 (Business as usual). En effet, dans le scénario 5 la production minérale totale et le rapport PMin PE/PMin Ouest sont constants et équivalents à ceux de 2016, mais des investissements sont pris en compte qui conduisent à améliorer autant que possible le rendement de la production d'OTR à 77,35 %. Dans ce scénario, les déséconomies sont donc réduites autant que possible pour la production minière d'OTR.

Il peut donc être estimé que l'augmentation du coût social de l'exploitation du néodyme liée à l'épuisement de la ressource correspond à la différence de coût social lié aux déchets dans le scénario 1 (*business as usual*) et dans le scénario 5 de minimisation de l'épuisement de la ressource (voir Tableau 48).

Cela correspond donc à un coût moyen annuel de 32 554 $/t de néodyme produit à 65 108 $/t de néodyme produit.

Soit à un pourcentage du prix de la ressource (2013) de 48 à 98%.

Les déséconomies de l'exploitation du néodyme, liées à une absence de prise en charge du phénomène d'épuisement peuvent donc être considérées être de 1,74 tonne de Nd/tonne de Nd produit.

Tableau 48 : Part du coût social de l'exploitation minière du néodyme liée à l'épuisement de la ressource

2017 - 2030	Moyenne du coût annuel $/t Nd produit, Estimation basse	Moyenne du coût annuel $/t Nd produit, Estimation haute	Pourcentage du prix 2013 (66 703$/t), Estimation basse	Pourcentage du prix 2013 (66 703$/t), Estimation haute	Déséconomies (t Nd perdu/t Nd produit)
Scénario 1	40 939	81 878	61%	123%	1,78
Scénario 5	8 385	16 770	13%	25%	0,04
Coût social de l'épuisement (Scénario 1 - Scénario 5)	32 554	65 108	48%	98%	1,74

Il a été vu dans les paragraphes précédents que la dynamique d'épuisement des ressources au niveau de Baiyun Ebo influait sur les coûts sociaux liés aux déchets miniers du site principalement à travers la diminution quantitative de la ressource (déséconomies) ; la diminution qualitative de la ressource (baisse de la teneur) jouant peu sur les coûts sociaux liés aux déchets. Pourtant, dans le chapitre 1 (paragraphe 3.2.2. du chapitre 1) la revue de la littérature (pour l'or G. M. Mudd, 2007b; pour le cuivre, les mines plomb–zinc–argent, le nickel en Australie G. M. Mudd, 2007a; pour le nickel Kemp & Wiseman, 2004; pour le nickel Gavin M. Mudd, 2010; pour l'or Terry Norgate & Haque, 2012; Prior et al., 2012; Giurco, McLellan, Franks, Nansai, & Prior, 2014; pour le cuivre Memary, Giurco, Mudd, & Mason, 2012) montrait un impact conséquent de la diminution de la teneur sur la production de déchets et d'impacts environnementaux associés. Cependant, dans ces études, cet impact est étudié à long terme (sur plus de 150 ans) sur des données aggrégées, sur des métaux qui sont majoritairement des grands métaux industriels (voir Tableau 6 du chapitre 1 pour le rappel de la définition) et des produits principaux des mines : cuivre, nickel, plomb, zinc (l'or pouvant être un co-produit).

Le faible impact de la teneur sur l'augmentation des coûts peut s'expliquer par le fait qu'il s'agit d'un sous-produit avec des quantités produites très faibles par rapport à la production de concentré de fer et des teneurs qui sont faibles dès l'ouverture de la mine en 1958.

Il serait intéressant de voir si le profil établi ici pour le néodyme est généralisable pour la plupart des petits métaux (voir Tableau 6 du chapitre 1 pour le rappel de la définition) dont le néodyme fait partie. En effet, les petits métaux sont souvent présents en faible teneur dans les gisements et très souvent des coproduits ou sous-produits d'autres métaux. L'article de Nassar et de ses collaborateurs (Nassar, Graedel, & Harper, 2015) qui s'intéresse aux interdépendances de l'approvisionnement en métaux souligne ainsi que dans beaucoup de cas les petits métaux du fait

de leur statut de co-produits sont produits par des procédés peu efficients[116]. Cela semble aller dans le sens de l'hypothèse selon laquelle au regard de la problématique d'épuisement des ressources posée au chapitre 1 le facteur le plus important pour les petits métaux serait les pertes le long des chaînes de valeur et particulièrement au niveau minier. Hypothèse qui mériterait de plus amples recherches afin de mieux cerner les problématiques d'épuisement spécifiques à ces ressources.

Enfin, l'impact de la diminution des teneurs n'est pas inexistant et peut conduire à une augmentation conséquente des coûts si les effets d'échelle sont considérés : échelle mondiale et non locale (les argiles ioniques qui prendront le relai de la fin de la mine PE ont des teneurs de 0,2% soit 3 fois plus faibles encore que la mine Ouest par exemple, et à plus long terme encore le modèle de Skinner pourrait être utilisé), projection dans le temps plus longue pour les coûts (maintien des coûts de stockage sur 300 ans par exemple). Cet impact pourrait être investigué dans des recherches futures.

x. Réalisme du scénario 6 de valorisation des ressources secondaires

Le réalisme du scénario 6 est discuté ici sur deux plans : la possibilité réelle d'exploiter les résidus pour leur contenu en matériaux de valeur, et la possibilité de le faire avec des rendements élevés.

Le fait de vouloir résoudre le problème des résidus par l'exploitation des matériaux de valeur contenus dans ces résidus est une idée courante (Waggitt, 2011) qui se heurte souvent au peu de valeur des déchets miniers et aux effets d'échelle : le procédé ne peut pas être rentable pour de petites quantités. Ce sont à priori deux écueils qui sont évités à Baiyun Ebo. Cependant, l'espoir de couvrir les frais de réhabilitation par l'exploitation des éléments de valeur reste une hypothèse incertaine et discutée.

En 2016, lors des entretiens menés en Chine, la récupération des terres rares dans les déchets miniers de Baotou semblait une opportunité intéressante pour la CSRE (Entretien 17, 2016) qui mettait en avant ces déchets comme la plus grande réserve de terres rares du monde. Les procédés de récupération de terres rares dans les résidus feraient l'objet de recherches fructueuses en Chine avec l'obtention de concentrés à 50% (Entretien 17, 2016). D'autres scientifiques travaillent sur des méthodes pour extraire des terres rares des résidus à Baiyun Ebo : Yu Xiulan, Zhang Yong, et Ma Pengqi qui travaillait sur la méthode intégrée ou « circuit fermé en cascade ». Cependant, aujourd'hui il n'existe pas d'infrastructure pour mettre en place le nouveau procédé et la recherche sur ces sujets est encore expérimentale (Xiao, 2019). En effet, l'entretien (Entretien 17, 2016) soulignait que le procédé le plus au point était la récupération du mischmétal, ce qui constitue la ressource ayant le moins de valeur parmi les produits OTR. Il n'existe pas d'évaluation des coûts de la mise en place de ce procédé. Pour la CSRE, le traitement des déchets pouvait donc attendre, la Chine n'ayant pas de problème de ressources à court terme.

D'un autre côté cette exploitation est mise en avant par certains acteurs de l'industrie comme une opération très lucrative, sans qu'il soit possible d'évaluer qu'elle est la part d'effet d'annonce. Ainsi en 2019, la valeur d'exploitation des résidus de Baiyun Ebo serait évaluée par certains acteurs de l'industrie entre « 1 000 milliards de yuans et 10 000 milliards de yuans […] Même si le calcul dépasse 80 milliards de yuans, il atteint 1/30 du PIB de la Chine, dépassant ainsi le PIB de nombreux petits pays » (Xiao, 2019). Cependant les évaluations varient grandement puisque même un membre du

[116] (Nassar, Graedel, & Harper, 2015) « Le moyen le plus prometteur d'augmenter l'offre en métaux compagnons, si on le souhaite, est d'augmenter le taux de récupération des compagnons dans les minerais métalliques hôtes. Pour diverses raisons technologiques et financières, ainsi que pour la demande variée de métaux compagnons, ces taux sont généralement assez bas. Bien que les informations sur l'efficacité des processus soient généralement confidentielles, nous constatons que l'efficacité de la récupération de certains métaux compagnons peut être aussi faible que 10% […]. L'amélioration de ces taux nécessiterait des dépenses en capital, et la demande en métaux parallèles pourrait ne pas générer un retour sur investissement insuffisant, du moins à court terme. »

groupe d'experts ayant conseillé le gouvernement municipal de Baotou considère que 80 milliards de yuan (la fourchette basse) est encore une estimation trop optimiste (Xiao, 2019). Il est possible que la capacité technique de récupération des terres rares dans les déchets soit surestimée par l'industrie dans un but spéculatif. Quoiqu'il *EN SOIT, UNE DES PREUVES DE LA VALEUR ECONOMIQUE DE CE PARC A RESIDUS EST QU'IL A ETE L'OBJET RECENT D'UNE DISPUTE ENTRE COMPAGNIES CHINOISES AFIN DE DETERMINER LE PROPRIETAIRE DU PARC* (Xiao, 2019).

Pour (Moran-Palacios et al., 2019), un des problèmes potentiels du traitement des déchets dans une visée de récupération des terres rares ou plus généralement de production, est que cela crée de nouveaux déchets. C'est pourquoi la méthode intégrée paraît une approche intéressante pour réellement réduire la quantité de déchets produits et a été sélectionnée. Cependant, la question du type de nouveaux déchets produits et de leur dangerosité reste entière et dépendante des procédés utilisés. Une première étude menée sur Baiyun Ebo estime que la pollution générée par le traitement des résidus serait moins importante que par le minerai de Baiyun Ebo (Y. Zhou et al., 2017)

La question de la possibilité d'améliorer les rendements est un point important : elle détermine la part possible d'amélioration technologique pour diminuer les coûts associés aux problématiques d'épuisement des ressources. Dans leur article sur les risques d'approvisionnement en métaux liés au statut de sous-produits, les auteurs (Nassar et al., 2015) considèrent que les faibles rendements dans la production des sous-produits et co-produits constituent un potentiel levier technologique pour résoudre les questions d'approvisionnement. Le parallèle peut être fait pour les questions d'épuisement et de coûts sociaux et environnementaux de la production. En effet, il a été vu dans le paragraphe précédent que l'amélioration des rendements de la production de fer et d'OTR permettait de diminuer les déséconomies et les coûts associés aux déchets. Cependant, l'amélioration du rendement se heurte à des problématiques techniques et économiques. Ainsi, pour plusieurs auteurs, afin de régler à la source le problème de la pollution liée aux déchets miniers, il s'agit de revoir totalement les priorités de la production. Sur ce sujet, le témoignage du professeur Xue Feng de l'Université des sciences et de la technologie de Mongolie-Intérieure (Xiao, 2019), participant à la recherche sur la pollution par les terres rares et le recyclage des déchets miniers et métallurgiques depuis de nombreuses années, est éclairant. D'après lui, pour augmenter le rendement dans l'obtention des terres rares et diminuer la pollution des rédisus, il ne s'agit pas d'améliorer les procédés de concentration après la séparation avec le fer, mais de changer les priorités de Baotou Iron and Steel Group. Pour lui, les terres rares et le niobium doivent être raffinées en premier et le fer en second. Dans la situation actuelle, Baosteel prend d'abord le fer, puis les terres rares avec un très mauvais rendement. Pour lui, l'inversion des priorités correspondrait mieux à la valeur des terres rares comparée à celle du fer (Xiao, 2019). Il propose que Baotou Iron and Steel Group réduise la quantité de minerai brut exploité et la quantité de terres rares produite, afin de protéger les ressources en terres rares (Xiao, 2019). En effet, si l'exploitation minière était effectuée pour obtenir des terres rares en priorité, elle pourrait durer de nombreuses années et d'autres éléments pourraient être utilisés. Cela diviserait probablement l'extraction par trois (Xiao, 2019).

Ces témoignages tendent à montrer que le scénario 6 est effectivement optimiste à court terme. Notamment, il semble difficile aujourd'hui d'obtenir des rendements élevés dans l'exploitation des résidus sur les terres rares et le fer. La recherche semble manquer de moyens pour développer des procédés en ce sens. Un scénario plus réaliste serait la diminution progressive de la production minière à court terme comme proposée par Xue Feng (Xiao, 2019), l'exploitation des mines avec un rendement amélioré pour le fer comme proposée par Xu et Shi (Xu et Shi, 2005), et la mise en place d'un procédé le plus intégré possible qui privilégierait l'extraction des OTR et du Niobium pour exploiter les résidus ; soit un mélange des scénarios 4 (mais avec une production minière diminuée) et 6.

xi. Perspective de long terme et taux d'actualisation

Dans l'évaluation des coûts sociaux liés aux déchets, les effets de très long terme du choix de la gestion de la ressource et des déchets qui en découlent n'ont pas été discutés. En effet, quel que soit le scénario choisi pour exploiter les ressources de Baiyun Ebo, des déchets qui demandent une gestion demeurent à la fin. Il serait donc intéressant de se projeter sur du très long terme (300 ans) pour évaluer le coût des différents scénarii. Comme cela a été souligné, la production de résidus de concentration conduit à des coûts qui sont éternels : soit la surveillance et le stockage sont assurés dans de bonnes conditions et les coûts sont payés directement, soit les déchets sont abandonnés ce qui déclenche des coûts de dommages sur l'environnement et la société qui sont payés indirectement. Les scénarii minimisant le volume des résidus (scénario 4, 5 et surtout 6), sont des scénarii favorables pour les générations futures permettant de minimiser les coûts de gestion des déchets après fermeture du site.

Si une telle projection était faite, cela nécessiterait de se pencher sur la question du taux d'actualisation. En effet, le paragraphe 3.1.2. du chapitre 1 discute du taux d'actualisation à utiliser pour favoriser une gestion soutenable des ressources. Il a été vu qu'un taux d'actualisation faible voire nul est généralement considéré comme favorisant une gestion durable des ressources, puisqu'elle attribue aux coûts futurs (ou recettes futures) la même valeur qu'un coût actuel. Ainsi, dans le cas de la gestion des déchets, le choix d'un taux d'actualisation élevé pour évaluer les investissements dans des procédés plus efficients ou de meilleures techniques de gestion des déchets conduirait à minimiser le coût de gestion à long terme des déchets et à limiter l'investissement pour une meilleure gestion des ressources en terres rares.

Cependant, dans le paragraphe 3.1.2. du chapitre 1 il a été également vu que, dans certains cas, un faible taux d'actualisation pouvait favoriser la surexploitation des ressources naturelles (Norgaard, 1992) et donc un épuisement plus rapide. Ainsi, dans notre cas un taux d'actualisation faible tend à favoriser cet investissement et conduit apparemment effectivement à une exploitation plus efficace et donc plus rapide des ressources : dans les scénarii 5 et 6 la production annuelle de terres rares atteint respectivement plus de 400 et 900 milles tonnes par an, alors que la production historique n'a jamais dépassé 80 000 tonnes d'OTR à Baiyun Ebo. Mais cette contribution à l'épuisement n'est qu'apparente. En effet, en reprenant la définition de l'épuisement précédemment établie, il peut être souligné que pour les scénarii 4 et 5, l'amélioration du rendement de production des OTR permet à production minérale égale de produire plus d'OTR. Le gisement peut donc être exploité moins vite, et la qualité de la ressource (teneur) diminue moins rapidement. Les pertes quantitatives (déséconomies) liées au stockage des OTR avec les déchets sont également moins importantes. La mise en garde de Norgaard ne semble donc pas s'appliquer ici.

xii. Prise en charge des coûts et dépenses publiques

L'alerte sur le rythme d'épuisement des ressources en terres rares et les mauvais rendements utilisés, émise notamment par Xu et Shi (Xu & Shi, 2005) a été entendue par le gouvernement chinois. Elle n'a néanmoins pas pu permettre la mise en place d'une politique d'économie des ressources d'ampleur, comme le passage à l'exploitation des résidus de production, l'industrie s'y étant opposée (Wübbeke, 2013). En revanche, des objectifs intermédiaires comme l'augmentation des rendements de la production ont été acceptés (Wübbeke, 2013), ou la mise en place des droits à polluer pour l'industrie des terres rares en 2011 (Pothen & Fink, 2015). Le gouvernement a également augmenté les recettes de l'état liées à la production de terres rares en augmentant la taxe sur la production des terres rares en 2011 (Pothen & Fink, 2015). D'après Pothen et Fink, ces taxes représenteraient 20% des coûts d'opération des terres rares en Chine, tandis que d'après l'évaluation des externalités de Zhou ces taxes représentent 12,5% des coûts à Baiyun Ebo. Pothen et Fink qualifient cette taxe de pigouvienne, cependant cette taxe est indexée sur la production de terres rares et non sur les pertes de terres rares ou la pollution générée, cela peut donc difficilement être considéré comme une prise en compte directe des externalités.

Par ailleurs, si le gouvernement chinois a augmenté les recettes liées à la production de terres rares, il a également réalisé des dépenses importantes dans ce domaine. Le gouvernement chinois a investi des fonds publics dans la restructuration de la production de terres rares en 6 consortiums, qui a notamment pour but de reprendre le contrôle sur la production des terres rares, de gagner en efficacité et de faciliter la prise en charge des problèmes liés aux déchets de production. En effet, les avantages environnementaux de l'organisation de la production en consortiums seraient de réduire le nombre d'entreprises à contrôler, et que les grandes entreprises disposent de plus de capitaux et d'une plus grande flexibilité financière pour investir dans des technologies coûteuses de traitement des déchets (Wübbeke 2013). Il y a donc eu des dépenses publiques visant à établir des consortiums et donc en partie consacrées à l'augmentation du rendement et à payer les coûts sociaux des déchets de la production des terres rares, mais les données sur ces coûts ne sont pas disponibles à la connaissance de l'autrice.

De plus, le gouvernement chinois a subventionné la mise en place de procédés pour la restauration écologique des résidus de l'industrie minière chinoise à hauteur de 2,73 milliards de RMB de 2009 à 2013, sans que l'on connaisse la part de ces dépenses attribuée à l'industrie des terres rares. Enfin, les gouvernements locaux et les entreprises associées à ces gouvernements ont investi 24 milliards de RMB sur la même période, sans qu'il soit précisé quelle est la part de la prise en charge par les gouvernements locaux (Chen et al., 2016). Il s'agit donc là d'une dépense publique complémentaire sur les coûts sociaux des déchets miniers associés à l'épuisement des ressources.

En 2013, la contribution de l'industrie minière des terres rares de Baiyun Ebo aux dépenses de l'état était de 33,3 million de RMB pour la pollution générée et de 489,39 millions de RMB en taxes pour la production des terres rares (B. Zhou et al., 2017). S'il n'est pas possible de dire, au vu du manque de données sur les dépenses publiques associées à la lutte contre l'épuisement à Baiyun Ebo, quelle part des dépenses publiques réelles ces contributions recouvrent, il est possible d'affirmer que ces contributions sont bien en deçà du coût social lié à la gestion des déchets de Baiyun Ebo en 2016, estimé par l'autrice entre 1,1 et 2,1 milliards de dollars en 2016, soit entre 6,6 milliards de RMB et 3,3 milliards de RMB (voir Tableau 39).

xiii. Discussion par rapport à l'évaluation des externalités liées à la déplétion à Baiyun Ebo

Une étude a été réalisée en 2017 évaluant les externalités liées à l'exploitation des terres rares à Baiyun Ebo en 2017 (B. Zhou et al., 2017). Cette étude évalue les externalités liées à la consommation des ressources non renouvelables que sont les terres rares, soit les « dommages aux ressources naturelles que sont les ressources en terres rares ». Elle utilise pour cela l'approche par les bénéfices nets[117], qui est un proxy[118] de la rente de rareté Hotellinienne (da Motta, 1994). L'idée est donc bien ici d'utiliser le concept hotellinien et que le coût de l'épuisement corresponde à la rente de rareté. Pour rappel, chez Hotelling, sous certaines conditions, le prix de la ressource reflète le revenu qui pourrait être tiré par les exploitants de la ressource s'ils décidaient de ne pas exploiter la ressource et de faire fructifier leur rente de rareté sur les marchés financiers afin de financer les investissements nécessaires au développement de produits de substitution. Comme cela a été vu au chapitre 1, il s'agit donc d'une approche en soutenabilité faible. Sans discuter la crédibilité des hypothèses sous-jacentes à cette approche (substituabilité des ressources en terres rares dans les applications, prix reflets de la rente de rareté, etc.), il est à noter que si les bénéfices nets moyens correspondent au coût à investir pour trouver un substitut à la ressource, alors ce coût vient s'ajouter aux coûts suivants : l'augmentation des coûts sociaux de production liés à la déplétion, les pertes de ressources en terres rares, et les dépenses publiques liées à la lutte contre l'épuisement des ressources. Coûts qui ne sont pas évalués dans l'approche hotellinienne ou dans l'article de Zhou et de ses collaborateurs.

Ceci explique donc le différentiel de résultat obtenu, avec l'article de Zhou et de ses collaborateurs qui estiment le coût de l'épuisement de la ressource à Baiyun Ebo en 2013 à 3 199 RMB/tonne OTR soit 516 $/tonne OTR, soit 222,8 $/t de néodyme avec une allocation économique (B. Zhou et al., 2017), soit 0,34% du prix du néodyme en 2013.

En comparaison, l'estimation réalisée dans cette thèse donne les résultats suivants : une augmentation des coûts sociaux liée à l'épuisement qui se situe entre 32 554 $/t de néodyme produit à 65 108 $/t de néodyme produit, soit un pourcentage du prix de la ressource (2013) de 48 à 98% (voir Tableau 48).

Cela correspond à une estimation 146 à 292 fois plus élevée que celle de Zhou et ses collaborateurs. A cette augmentation des coûts sociaux vient s'ajouter les pertes inutiles et irrécupérables de réserves, soit les déséconomies, qui sont en moyenne de 1,74 tonne de Nd/tonne de Nd produit et les dépenses publiques pour pallier l'épuisement de la ressource qui n'ont pas pu être évaluées en détails ici. La redéfinition de l'épuisement comme un phénomène continu et irréversible contribuant à l'augmentation des impacts sociaux et environnementaux, plutôt que comme un problème d'allocation du revenu de l'exploitation des ressources dans le temps conduit donc à une évaluation des coûts liés à cet épuisement bien supérieure. Elle amène également à des conclusions différentes quant à la viabilité actuelle du modèle économique de l'exploitation à grande échelle des ressources non-renouvelables.

[117] L'article mentionne l'approche par les coûts d'usage, mais la « user cost approach » fait habituellement référence à l'approche développée par El Serafy construite à partir du concept Keynesien de coût d'usage. Or cette approche considère que le coût de la dépréciation lié à l'épuisement correspond à seulement une partie des bénéfices nets. Or ici ce sont bien les bénéfices nets moyens qui sont considérés comme le coût de l'épuisement.

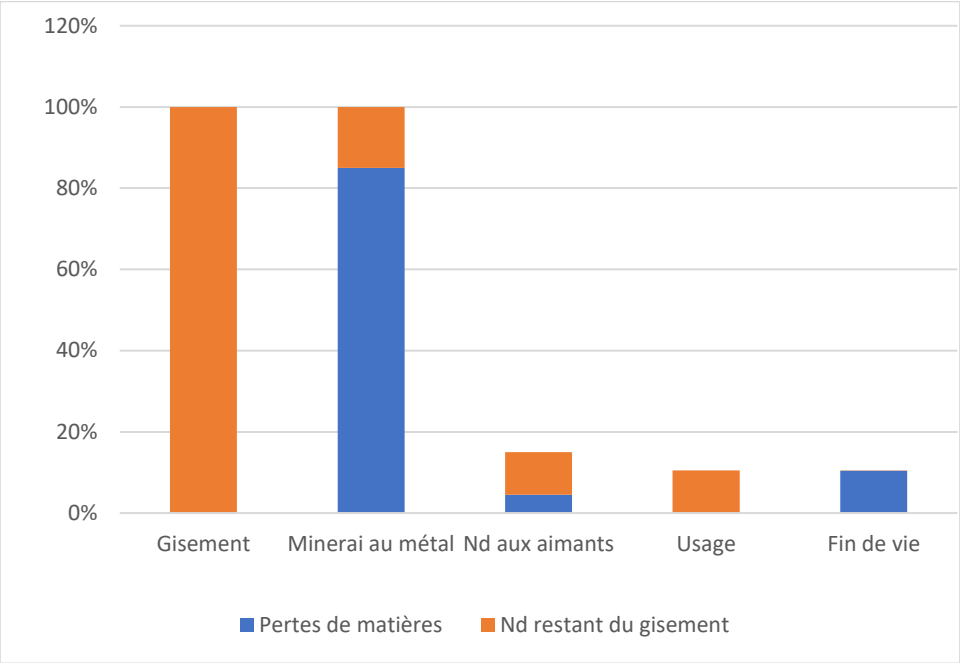
[118] Ce sont en réalité les bénéfices nets moyens qui sont utilisés : la rente devrait être mesurée par le prix moins le coût marginal de la dernière unité produite, mais comme ces coûts sont difficiles à mesurer en pratique les coûts moyens sont utilisés (da Motta, 1994).

2.2.5. Comparaison avec les déséconomies dans la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B recyclé

Il a été vu dans les paragraphes précédents que les déchets miniers étaient un enjeu majeur pour étudier les coûts sociaux liés à l'épuisement dans la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B. Le principal problème étant le volume de déchets à gérer et leurs teneurs en thorium ou métaux lourds. Comme cela a été vu au paragraphe 1.4, le procédé actuel de recyclage des aimants en fin de vie consiste à réintroduire les aimants au niveau du traitement chimique. En utilisant comme matière première des aimants Nd-Fe-B contenant déjà 24 à 30% de terres rares et pas de thorium, il est donc tout à fait raisonnable de faire l'hypothèse que la problématique des déchets miniers (issus principalement de l'étape de concentration) disparaît et que la dangerosité des déchets de la chaîne de valeur dans son ensemble diminue fortement.

Concernant les déséconomies, elles sont évaluées pour la chaîne de valeur actuelle (minière) par Sprecher et ses collaborateurs (Sprecher et al., 2014) dans leur comparaison de la production primaire et secondaire des aimants Nd-Fe-B. Leurs données confirment des pertes en terres rares majeures à l'étape de concentration[119] (voir Figure 82) et des pertes mineures sur le reste du procédé de fabrication des aimants.

[119] Avec une hypothèse de 50% du rendement sur l'étape de concentration ce qui semble optimiste par rapport à la revue de la littératture effectuée ici (voir paragraphe 2.2.2.).



Etapes	Gisement	Minerai au métal	Du métal aux aimants	Usage des aimants	Fin de vie
Source d'information pour le rendement		Sources diverses (voir paragraphe 2.2)	Sprecher et al., 2014 (pertes au broyage et découpage)	Hypothèse (pertes négligeables)	Graedel, et al., 2011 ; Ekins et al., 2017
Rendement/taux de recyclage		15%	70%		1%
Pertes de matières		85%	5%	0%	10%
Nd restant du gisement	100%	15%	11%	11%	0%

Figure 82 : Pertes de néodyme en pourcentage le long de la chaîne globale de valeur, depuis l'extraction à Baiyun Ebo au recyclage des aimants. Source : autrice

La Figure 82 montre qu'actuellement avec un taux de recyclage quasi nul, les pertes de matières en fin de vie sont importantes. Pourtant, Sprecher et ses collaborateurs affirment que le procédé de recyclage pourrait avoir un rendement de 70%. Venant confirmer cette hypothèse, les entretiens ont montré (Entretien 22 et 23, 2016) que le recyclage des aimants en 2016 se faisait avec un rendement d'environ 60% pour la transformation en OTR, bien supérieur à la production minière d'OTR. Ce qui montre que la voie de recyclage des aimants par réintroduction dans la chaîne de valeur au niveau du traitement chimique (*acid roasting*) aurait un impact moindre en termes de déséconomies que l'extraction minière actuelle.

Cependant, le paragraphe 1.4 soulignait également la nécessité dans ce type de procédé de recyclage de mélanger les aimants en fin de vie et du minerai de terres rares. Il semblerait donc qu'il y ait des limitations à la diminution de l'épuisement de la ressource qui peut être pratiquée avec le procédé industriel actuel de recyclage des aimants.

L'étude de Sprecher et ses collaborateurs écarte la technique de recyclage par déchiquetage pour son inefficacité et propose une autre voie de recyclage (Binnemans et al., 2013 in Sprecher et al., 2014) : le démontage associé à l'introduction des aimants au niveau de la décrépitation. C'est donc le même procédé utilisé que pour les aimants défectueux au paragraphe 1.4. Ils montrent que cette technique diminue énormément les impacts environnementaux de la production, de la même façon que l'autre voie de recyclage, parce que les étapes les plus impactantes en amont de la chaîne sont évitées. Les pertes ne sont pas évaluées pour ce scénario, mais sont considérées comme négligeables. Cependant, comme vu dans le paragraphe 1.4, cette méthode conduit à des aimants de plus basse qualité que les aimants recyclés, c'est donc une voie de recyclage qui a également ses limites. Un nouveau procédé serait en développement aux États-Unis pour améliorer la qualité de cette voie de recyclage (Entretien 23, 2016).

La deuxième partie de cette étude de cas a donc identifié de nombreux et importants enjeux sociaux, sanitaires et environnementaux liés à la chaîne de valeur du néodyme et a également souligné la difficulté à obtenir des données de terrains en Chine sur ces enjeux. Parmi les enjeux identifiés, les coûts sociaux associés à la gestion des déchets sur le site de Baiyun Ebo sont apparus à la fois comme un enjeu central quant à la question de l'épuisement et comme un objet d'évaluation réaliste au vu des données disponibles.

Pour faire une estimation des coûts de l'épuisement associés aux déchets, l'ampleur des phénomènes d'épuisement physiques à Baiyun Ebo a été évaluée. Il a été vu que la teneur en OTR du gisement de Baiyun Ebo était en diminution. Cette diminution de la teneur et la vitesse d'épuisement du gisement est d'autant plus forte que le rythme d'extraction s'intensifie. D'après les calculs effectués sur la base de données de la littérature sur la production d'OTR chinoise et les teneurs du gisement de Baiyun Ebo, la production de déchets à Baiyun Ebo est théoriquement influencée en premier lieu par l'augmentation de la production, en second lieu par la baisse de la teneur en OTR et en dernier lieu par le rendement de la production d'OTR. Cependant, dans la pratique le rendement de la production d'OTR peut être multiplié par 7, alors que la teneur en OTR est condamnée à diminuer à l'échelle du gisement et à une amplitude de variation plus faible : de 3,6% elle ne peut que tendre vers 0%. Ainsi, le rendement de la production d'OTR, qui est seulement de 10% aujourd'hui à Baiyun Ebo, a en réalité une importance déterminante sur les coûts sociaux associés aux déchets. Non seulement l'inefficacité du procédé en termes de récupération de terres rares conduit à des pertes de ressources et gaspille de l'énergie, mais participe aussi à l'augmentation du volume de déchets et donc des coûts sociaux qui y sont associés.

En 2016, d'après nos calculs, la quantité de résidus accumulée dans le parc à résidus de Weikuang était de 271 millions de tonnes de résidus, représentant près de 4% des 7,5 milliards de tonnes de résidus de la production de Fer accumulés en Chine (Tang, Li, Ni, & Fan, 2019). La quantité de terres rares accumulée dans le parc était de 18,6 millions de tonnes (soit 117 ans de la production chinoise en 2016) et celle de thorium de 119 milles tonnes dans ces résidus. Il a été vu que ces estimations étaient compatibles avec les résultats de la littérature et pouvait être utilisées pour évaluer les coûts associés à la gestion de ces résidus.

Les coûts sociaux associés aux déchets ont été évalués pour 2016 et pour différents scénarii de gestion des déchets. Ces scénarii ont été proposés se basant sur les modèles de production et de déchets établis par l'autrice et en proposant de prendre en compte des actions d'atténuation de l'épuisement, c'est-à-dire visant à retarder la diminution de la teneur et à limiter les pertes en OTR (augmentation du rendement, exploitation de la mine Ouest), ainsi que des actions de remédiation liées à la pollution en thorium. Ces scénarii ont permis d'attribuer la part de l'augmentation du coût social des déchets de l'exploitation du néodyme à l'épuisement en calculant la différence entre le coût social lié aux déchets dans le scénario 1 (business as usual) et dans le scénario 5 de

minimisation de l'épuisement de la ressource. Cette différence est proche du coût social du scénario 1, les coûts sociaux liés aux déchets dans le scénario 5 étant bien inférieurs.

Cette augmentation des coûts sociaux liée à l'épuisement serait donc sur la période de 2017 à 2030 d'un coût moyen annuel de 32 554 $/t de néodyme produit à 65 108 $/t de néodyme produit, soit à un pourcentage par rapport au prix de la ressource en 2013 de 48 à 98%. Cela correspond à une estimation 146 à 292 fois plus élevée que l'évaluation des « dommages aux ressources naturelles que sont les ressources en terres rares » réalisée dans l'étude sur les externalités de Zhou et ses collaborateurs (B. Zhou et al., 2017). La redéfinition de l'épuisement comme un phénomène continu et irréversible contribuant à l'augmentation des impacts sociaux et environnementaux, plutôt que comme un problème d'allocation du revenu de l'exploitation des ressources dans le temps conduit donc à une évaluation des coûts liés à cet épuisement bien supérieure. A cette augmentation des coûts sociaux vient s'ajouter les pertes inutiles et irrécupérables de réserves, soit les déséconomies, qui sont en moyenne de 1,74 tonne de Nd/tonne de Nd produit et les dépenses publiques pour pallier l'épuisement de la ressource qui n'ont pas pu être évaluées en détails ici.

Des pistes futures de recherches ont été dégagées : vérifier l'hypothèse selon laquelle la prévalence de la question du rendement et des déséconomies par rapport à celle de la teneur est généralisable pour la plupart des petits métaux, approfondir la question des dépenses publiques liées à l'épuisement du néodyme, prendre en considération les impacts du stockage des déchets à très long terme (au moins 300 ans).

Enfin, il a été vu que la dynamique d'épuisement des ressources au niveau de Baiyun Ebo influait sur les coûts sociaux liés aux déchets miniers du site plus par les déséconomies (le rendement) que par la diminution qualitative de la ressource (baisse de la teneur). Le faible impact de la teneur sur l'augmentation des coûts peut s'expliquer par le fait qu'il s'agit d'un sous-produit avec des quantités produites très faibles par rapport à la production de concentré de fer, et par les teneurs qui sont faibles dès l'ouverture de la mine en 1958. Cette constatation conduit à cibler l'amélioration des rendements de l'OTR et du fer comme une priorité pour diminuer l'épuisement, associée à l'exploitation des résidus de la production pour arrêter d'engendrer de nouvelles pertes et déchets. Une autre piste pour diminuer le phénomène d'épuisement et les impacts associés est le recyclage des aimants Nd-Fe-B en fin de vie via les méthodes actuelles de réintroduction des déchets dans le procédé de production des terres rares ou de fabrication d'aimants Nd-Fe-B. Si l'exploitation des déchets miniers et les deux voies de recyclage évoquées semblent être en capacité de faire baisser significativement les coûts sociaux liés à l'épuisement, ces trois pistes ont leur limitations techniques (difficulté d'avoir simultanément des bons rendements pour le fer et les OTR, dépendance à la production primaire et *downcycling*) et font face à des freins organisationnels et économiques qui sont rappelés dans le paragraphe suivant.

3. Lien entre les coûts sociaux de l'épuisement et l'organisation de la chaîne globale de valeur des aimants Nd-Fe-B

Cette troisième partie vise à faire le lien entre les coûts sociaux de l'épuisement étudiés dans la deuxième partie de ce chapitre et l'organisation de la chaîne globale de valeur des aimants Nd-Fe-B étudiée dans la première partie.

Il a été vu que les déchets constituent un enjeu charnière ou « intermédiaire » entre les facteurs contribuant à l'épuisement et les enjeux sanitaires et environnementaux de la production, ainsi que pour les enjeux sociaux liés à l'usage des terres (voir Figure 38). La partie 2 a montré que les pertes de matières constituaient un facteur déterminant de l'augmentation des coûts sociaux et environnementaux de la production. Or dans la première partie, nos entretiens ont confirmé que la recherche des coûts de production les plus bas, associée à la surproduction, était le modèle économique dominant de la filière et rendait difficile pour les acteurs de sortir de cette logique (voir

Figure 83). Cette surproduction est également liée à un surinvestissement dans les équipements de production - ce que Kapp classe dans la catégorie des déséconomies comme vu dans le chapitre 2- les fabricants d'aimants évoquant dans les entretiens des capacités de production de l'ordre du double de la production réelle. Cette recherche d'une production massive à bas coûts est autant issue d'une stratégie chinoise de monopole sur la production de terres rares afin de descendre dans la chaîne de valeur vers les industries aval de la production de terres rares que de la décision des pays industrialisés de renoncer aux premières étapes les plus polluantes de la production et de se fournir en matières premières à bas prix en Chine (voir Figure 83). La première partie a également souligné le caractère autorenforçant ou verrouillé de ce modèle : la surproduction engendre un prix bas, dans ce contexte les grands fabricants d'aimants sont renforcés, grâce à leur capacité à réaliser un chiffre d'affaires important avec une faible rentabilité et une production de masse (économies d'échelles), créant une causalité circulaire sous la forme d'une boucle de surproduction (voir en jaune sur la Figure 83). Par ailleurs, ces prix bas conduisent les petits fabricants d'aimants à externaliser des étapes de production telle que la découpe des aimants, favorisent l'utilisation d'un procédé de faible rendement dans la production des terres rares et conduisent à l'absence d'initiatives de recyclage et d'écoconception par les industries consommatrices, et finalement à des pertes importantes de matières. Ces pertes augmentent la production nécessaire pour satisfaire la demande, il y a donc là aussi un phénomène de causalité circulaire poussant à la surproduction (voir en jaune Figure 83). La surproduction chinoise de terres rares par rapport à la demande mondiale semble pousser à ce que la compagnie comme la municipalité ne se préoccupent pas des pertes engendrées par le procédé actuel (Xiao, 2019).

La partie 2 a montré, en plus des dynamiques déjà identifiées au paragraphe 1.4, que cette surproduction était liée à l'imbrication de la production des terres rares avec la filière de l'acier (voir Figure 83), qui a un impact considérable en termes de déséconomies et de coûts sociaux. Ainsi, comme le souligne Ma Pengqi[120] (Xiao, 2019), le mauvais rendement du procédé en terres rares et les pertes s'expliquent car « le groupe Baotou Iron & Steel utilise des technologies anciennes pour réaliser des bénéfices ». D'après lui, « s'il peut paraître évident que l'avenir de l'industrie à long terme à Baotou est lié aux terres rares, le traitement actuel à Baiyun Ebo ne repose pas sur la valeur ajoutée des terres rares », mais principalement sur l'obtention du fer en grande quantité. En effet, l'activité de Baotou Iron and Steel Group est basée sur la production de masse d'acier. Afin de maintenir l'activité, il s'agit pour Baotou Iron and Steel Group de maintenir la quantité de minerai traité (Xu & Shi, 2005). Si l'extraction de minerai de fer est réduite, il devient nécessaire d'importer du minerai plus coûteux de l'étranger et donc les coûts de production du fer augmentent (Xiao, 2019). Afin de maintenir un coût bas du minerai de fer pour la production de l'acier, les terres rares sont donc gaspillées.

[120] Ancien directeur du *Baotou Rare Earth* Research *Institute*

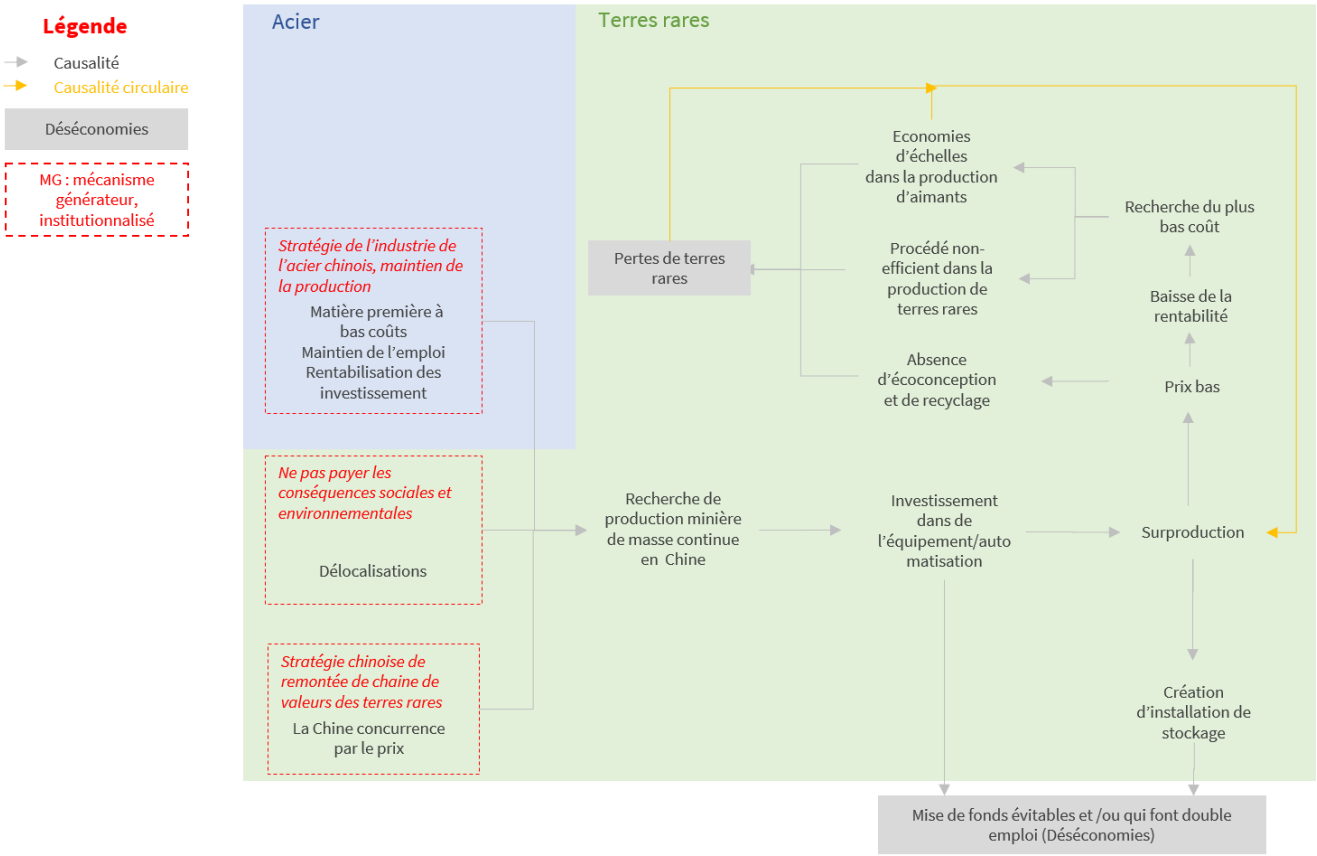


Figure 83 : Les déséconomies, un processus cumulatif qui tend à accélérer le taux d'utilisation de la ressource et les pertes de néodyme. Source : autrice

Les caractéristiques de la chaîne de valeur que sont la recherche d'un bas coût de production associée à une production massive et un verrouillage par le bas des fabricants d'aimants Nd-Fe-B sont donc à l'œuvre pour augmenter les coûts sociaux de l'épuisement de la chaîne de valeur Nd-Fe-B. Ces caractéristiques de la chaîne sont des freins au changement vers une logique plus économe en ressource, générant moins de déchets et donc de coûts sociaux. En effet, les solutions envisagées que sont l'amélioration des rendements de l'OTR et du fer pour diminuer l'épuisement, l'augmentation du recyclage des aimants Nd-Fe-B en fin de vie, et le traitement des déchets déjà produits sont des solutions qui sont techniquement faisables et qui permettent de diminuer les coûts sociaux et les pertes en terres rares. La faisabilité de l'exploitation des résidus est, elle, plus sujette à controverse. Si ces dépenses ne sont pas réalisées aujourd'hui c'est tout d'abord parce que les coûts sociaux ne sont pris en charge par aucun acteur. Ces coûts sociaux sont l'ensemble des dommages présentés au début de la deuxième partie et les déséconomies à l'œuvre de la filière, mais ces coûts n'impactent pas économiquement les industries productrices à court terme. Celles-ci n'ont donc aucun intérêt économique à mettre en place des mesures qui feraient rentrer dans leurs coûts des problématiques qui sont actuellement reportées sur la société. En revanche, il pourrait être surprenant que les exploitants de Baiyun Ebo ne se préoccupent pas d'améliorer le rendement de la production des terres rares, ce qui pourrait avoir un intérêt économique pour l'entreprise. Ceci s'explique par le fait que la production de l'acier et des terres rares relève d'un même acteur, l'entreprise Baotou Iron and Steel Group dont la priorité est clairement la production de fer à bas coût comme vu ci-avant. L'ampleur des coûts sociaux liés à l'épuisement est donc due à l'absence d'incitation ou d'obligation de prise en charge de ces coûts, mais aussi à l'organisation de la chaîne de valeur du néodyme, pilotée en grande partie par un acteur dont la stratégie industrielle est basée sur la production de masse à bas coût de fer pour l'industrie de l'acier.

4. Discussion sur les résultats du cas d'étude sur les coûts sociaux et environnementaux du néodyme et sur la méthodologie utilisée

Cette dernière partie présente une discussion des résultats de l'étude de cas sur trois aspects. Tout d'abord, il s'agit de discuter de la réduction et de la possible prise en charge de ces coûts sociaux. En effet, toute évaluation de coûts sociaux (au sens de Kapp) nécessite une discussion sur la prise en charge de ces coûts qui peut être réglementaire, normative, sur l'organisation de l'entreprise et de la chaîne de valeur et ne se concentre pas uniquement sur le prix de marché comme levier de prise en charge des coûts.

Dans son ouvrage « le coût social de l'entreprise privée » (W. Kapp, 1963), Kapp classait déjà les industries extractives comme des industries avec un coût social élevé, en particulier à travers la pollution de la ressource en eau par les résidus de production. Pour Kapp, le traitement de ces résidus constituerait un coût important et un « poste appréciable du prix de revient » (W. Kapp, 1963) pour les industries des métaux non ferreux et un poste de dépenses extrêmement élevé pour les aciéries et l'industrie pétrolière. Kapp conclut sur le coût de prise en charge de ces résidus que « si des études sur les prix de revient […] devaient confirmer [… l'importance de ces coûts sociaux liés aux résidus qui] représenteraient une charge susceptible de perturber la situation financière de certaines branches industrielles bien établies, ce serait là une illustration intéressante du fait que des industries entières ne sont en mesure d'occuper et de conserver leur position économique actuelle que grâce au fait qu'elles ne supportent pas la totalité de leurs frais de production et qu'elles trouvent le moyen d'en rejeter une partie substantielle sur d'autres personnes et sur la communauté » (W. Kapp, 1963). L'évaluation menée dans cette étude de cas confirme l'importance des coûts sociaux liés aux activités minières de production des terres rares. La conclusion qui pourrait en être tirée est le caractère inadapté de ces activités pour un modèle socio-économique prenant en compte les coûts sociaux et environnementaux. Cependant deux points doivent être soulignés. Premièrement la dépendance extrême de nos modèles de production et de consommation aux matières premières minérales (voir Chapitre 1) et le temps nécessaire à la mise en place de filières de recyclage quasi-inexistantes aujourd'hui pour les petits métaux, rendent irréaliste une cessation à court terme des exploitations minières, bien que socialement et écologiquement souhaitable à moyen terme. En effet, même dans un scénario de mise en place de filière de recyclage et de diminution de la consommation, l'approvisionnement minier resterait nécessaire à court terme. Deuxièmement, la dépendance de la transition énergétique (elle-même visant à réduire les coûts sociaux et environnementaux de la production) aux matières premières minérales et métalliques rend nécessaire de penser ces approvisionnements d'un point de vue social et écologique.

Dans ce cadre, il s'agit ici de discuter des différents moyens de prise en charge des coûts sociaux et environnementaux de la chaîne du néodyme, afin de les réduire.

Tout d'abord, la question de la rentabilité des investissements pour prendre en charge les coûts sociaux de l'épuisement de la chaîne de valeur du néodyme est abordée. Ensuite, la question de la rentabilité des étapes minières dans un cadre de coût complet est évoquée, et la possibilité d'un changement d'organisation de la chaîne de valeur du néodyme pour la prise en charge des coûts sociaux par les acteurs en aval de la chaîne est discutée. Puis, ce paragraphe aborde la question de l'intervention publique pour la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement, à travers la question du recyclage. Enfin, les limites de la réorganisation des chaînes de valeurs dans un contexte d'économie extractive sont abordées.

4.1. Rentabilité de l'investissement pour la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement dans la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe B

Il s'agit de se poser la question de la rentabilité pour les acteurs de la chaîne de valeur d'investir pour la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement.

Comme cela a été vu dans la partie 3, les solutions envisagées que sont l'amélioration des rendements de l'OTR et du fer pour diminuer l'épuisement, l'augmentation du recyclage des aimants Nd-Fe-B en fin de vie, et le traitement des déchets déjà produits, sont des solutions qui sont techniquement faisables et qui permettent de diminuer les coûts sociaux et les pertes en terres rares. Si ces dépenses ne sont pas réalisées aujourd'hui, c'est tout d'abord parce que les coûts sociaux ne sont pris en charge par aucun acteur. Aujourd'hui, les coûts sociaux sont l'ensemble des dommages présentés au début de la deuxième partie et les déséconomies à l'œuvre de la filière, mais ces coûts n'impactent pas à court terme économiquement les industries productrices. Autrement dit, tant que notre système de comptabilité n'intègre pas ces coûts comme des coûts réels de l'entreprise, le paiement des coûts sociaux réduit le profit tiré d'une activité par les acteurs économiques. Elles n'ont donc aucun intérêt économique à mettre en place des mesures qui feraient entrer dans leurs coûts des problématiques qui sont actuellement reportées sur la société. Cela est d'autant plus vrai sur les dommages réalisés sur l'environnement (coût de la pollution liée aux déchets, pollution de l'eau, de l'air changement climatique) et les populations locales (déplacement des populations locales, atteinte aux pâturages, aux cultures), puisque ces dommages n'impactent pas les facteurs de la production. En revanche, la question de la rentabilité peut se poser pour d'autres coûts sociaux qui atteignent directement les facteurs de la production. Notamment, Kapp évoque dans son ouvrage sur les coûts sociaux de l'entreprise privée la question de l'atteinte au facteur humain de la production (W. Kapp, 1963). Ainsi, Kapp souligne que le raisonnement selon lequel les entreprises ont intérêt « à assurer des conditions de travail saines et non dangereuses, car toute atteinte à la santé de l'ouvrier diminue le rendement de celui-ci et […] augmente les coûts de production » néglige deux facteurs. Le premier facteur est que l'ouvrier est dispensable et peut être remplacé par un autre ouvrier. Le deuxième facteur est que « les mesures de sécurité et d'hygiène, tout en contribuant, en définitive, à une plus grande efficacité du travail et à une baisse des frais, augmentent nécessairement les coûts présents du producteur et affaiblissent ainsi sa compétitivité » ou dit autrement il peut « être plus rentable de faire marcher une usine sans dispositifs de sécurité » aves des bas rendements (W. Kapp, 1963). Dans ce cas en l'absence de législation sociale, les coûts sont supportés « soit par l'ouvrier lésé, soit par le contribuable, sous forme d'une hausse des dépenses publiques pour les soins médicaux » (W. Kapp, 1963). Ainsi, la prise en charge de certains coûts sociaux, comme par exemple le paiement d'un *living wage*, n'engendre pas de gain de rentabilité pour les acteurs économiques. Le parallèle peut être fait avec la question des déséconomies en terres rares et l'investissement nécessaire pour augmenter l'efficacité de la production. Ainsi, comme vu dans la partie 3, il pourrait être surprenant que les exploitants de Baiyun Ebo ne se préoccupent pas d'améliorer le rendement de la production des terres rares, ce qui pourrait avoir un intérêt économique pour l'entreprise. Le premier facteur empêchant cette prise en compte est que les producteurs de terres rares considèrent que les pertes de terres rares ne sont pas un problème dans la mesure où ils sont en surproduction par rapport à la demande et où il n'y a pas de problème d'approvisionnement à court termes (Entretien 17, 2016). De la même manière que le facteur humain de la production chez Kapp, les ressources sont donc considérées ici comme dispensables à court terme. Le deuxième facteur est que la rentabilité de la production à Baiyun Ebo est liée à la production de fer à bas coût comme vu ci-avant. L'ampleur des coûts sociaux liés à l'épuisement est donc due à l'absence d'incitation ou d'obligation de prise en charge de ces coûts, mais aussi à l'organisation de la chaîne de valeur du néodyme, pilotée en grande partie par un acteur dont la stratégie industrielle est basée sur la production de masse à bas coût de fer pour l'industrie de l'acier. L'étude de cas tend à montrer qu'à moyen et long terme l'amélioration du rendement de la production des terres rares pourrait être rentable, y compris pour les acteurs économiques de la chaîne des terres rares, mais cela nécessite un changement d'organisation de la

chaîne de valeur pour attribuer la priorité à une production efficiente des terres rares et non à l'obtention de fer à bas coûts pour la production de l'acier.

Au-delà des acteurs économiques, la société dans son ensemble a intérêt à ce que les coûts sociaux soient payés au plus vite, puisque les dommages causés à l'environnement et à la société sont souvent irréversibles (pertes irrécupérable, maladie chronique, changement climatiques, atteinte à la biodiversité, etc.). C'est-à-dire que la prévention, ce que Kapp qualifie de mesure « ex-ante », est préférable, ou moins « coûteuse » au sens d'un coût complet incluant le coût social de la production, à l'atténuation et à la réhabilitation, soit des mesures « ex-post », elles-mêmes moins « coûteuses » que les coûts de dommage de la production.

Pour la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement, il n'y a donc pas ici de situation « gagnant-gagnant », mais un surcoût généré par la prise en charge de ces coûts sociaux qui mérite d'être discuté pour déterminer comment ce surcoût peut être payé et par qui. Il s'agit finalement d'un arbitrage à réaliser entre l'obtention de matières premières à un coût économique bas, et la prise en charge des coûts sociaux de la production afin de réduire les impacts sociaux et environnementaux.

4.2. Coûts sociaux de l'industrie extractive et investissement des industries aval dans la production de terres rares et le recyclage

Il a été vu que la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement générait un surcoût à payer pour les acteurs de la chaîne des aimants Nd-Fe-B en l'absence de situation gagnant-gagnant à court terme. Comme cela a été vu dans la partie 2, ces coûts sont générés principalement à l'étape minière de la production. Cela pose la question de la rentabilité de l'industrie extractive dans un cadre de prise en charge du coût social de la production.

Sur le cas d'étude des aimants Nd-Fe-B, les étapes minières étudiées à travers le cas de Baiyun Ebo, présentent des coûts sociaux qui vont d'une part importante du prix de revient des producteurs de terres rares à un coût insurmontable au prix de 2013 selon les estimations. Dans l'estimation de Zhou et ses collaborateurs (B. Zhou et al., 2017) le surcoût total des externalités (au-delà de la question de l'épuisement) peut être internalisé, bien que cela génère une perte importante de revenu pour les producteurs miniers. Ainsi, d'après Zhou et ses collaborateurs (B. Zhou et al., 2017), en 2013, le chiffre d'affaire d'exploitation lié aux terres rares de Baotou Iron and Steel Group s'élève à 6 milliards de RMB, les « externalités négatives » correspondraient à 27% de ce chiffre d'affaires, tandis que la redevance pour la pollution réellement payée [… et] la taxe sur les ressources en terres rares […] représentent 8,6% du chiffre d'affaires, soit bien moins que le coût externe négatif estimé [….], et l'internalisation des externalités négatives réduirait le chiffre d'affaires de China Northern de 18,5% », soit un coût total lié aux coûts d'opération et aux externalités représentant 85% du chiffre d'affaires. La comparaison des coûts sociaux au prix des terres rares, ou dans le cas de (B. Zhou et al., 2017) des externalités au prix des terres rares, part du postulat implicite que les coûts doivent être pris en charge par les seuls revenus dégagés par la production d'OTR.

Or, cela semble difficile selon l'évaluation menée dans le présent cas d'étude. En effet, selon l'évaluation menée concernant le modèle actuel de production (scénario 1) le seul coût social des déchets liés à l'exploitation du néodyme en 2017-2030 représenterait de 60% à 120% du prix du néodyme en 2013 (voir Tableau 47). De plus, l'étude de cas s'est focalisée uniquement sur la question des coûts de l'épuisement, ne prenant pas en considération les autres coûts sociaux de la production (changement climatique, acidification, mauvaises conditions de travail, secteur informel, déplacement de population et conflits sociaux), ce qui laisse penser que le coût social total de la production des terres rares au-delà des questions d'épuisement serait encore plus élevé. Cela laisse présager qu'une internalisation des coûts sociaux de la production sans changer le modèle de production mettrait en péril la rentabilité de la production minière de terres rares sur la base des prix et du chiffre d'affaires de 2013. Cependant, il a été vu que selon le BRGM (BRGM, 2015) l'écart de prix maximal de 2002-2003 à la crise de 2011 pour le dysprosium est de 32 $/kg à 3 410 $/kg, soit une multiplication par un facteur 106 (un « record absolu » de volatilité) et le prix du néodyme sur la

même période passe de 6,67$/kg à 467 $/kg, soit une multiplication par un facteur 70. Ces prix extrêmes avaient conduit le marché des terres rares à se réduire avec des acheteurs qui se tournaient vers d'autres matériaux, notamment en retournant vers d'anciennes technologies d'aimants. En considérant la seule lutte contre l'épuisement, cette augmentation du prix et la réduction du marché est purement bénéfique puisqu'elle enraye la logique de surproduction et de prix bas (Figure 83) à l'origine des pertes, et évite l'utilisation de la ressource dans des secteurs où cette ressource est dispensable. La deuxième conséquence de l'augmentation des prix due à la prise en charge des coûts sociaux de la production est l'augmentation de la compétition pour les producteurs de terres rares selon les mécanismes étudiés dans la partie 1.

Comme cela a été vu dans la partie 2 avec l'exemple du scénario 6 (exploitation minière arrêtée et remplacée par l'exploitation des résidus de la production), un autre moyen de prendre en charge des coûts sociaux liés à l'épuisement dans la production des terres rares est de changer radicalement le mode de production. Notamment, ce scénario diminue très fortement la production de fer et demanderait un changement de stratégie drastique des producteurs de Baiyun Ebo qui ont investi dans la production de masse de fer à bas coût depuis le début des années 2000. Notre analyse tend donc à montrer que la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement via *a minima* l'augmentation du rendement de la production des terres rares (scénario 5), et à maxima par l'exploitation des déchets miniers en lieu et place de la mine (scénario 6), vient se heurter à la stratégie des producteurs miniers de Baiyun Ebo. L'analyse a montré qu'une telle stratégie, quelque soit le coût de l'investissement de départ sur lequel il n'existe pas de données fiables, permet de réduire drastiquement les coûts sociaux de l'épuisement. Cependant, la capacité d'investissement des producteurs miniers pour mettre en place une telle stratégie, les pertes économiques engendrées dans l'industrie aval de l'acier et l'augmentation du coût d'opération liée à la mise en place d'un rendement supérieur pour la production des terres rares ou à l'exploitation des résidus ne sont pas connus. Ces inconnues ne permettent pas d'établir la rentabilité sur le long terme d'un point de vue économique d'un tel investissement pour les producteurs miniers. Il est fait l'hypothèse ici, qui demanderait à être vérifiée dans des recherches futures, que cet autre moyen de prise en charge des coûts sociaux de la production amènerait également le coût de la production à dépasser les bénéfices dégagés par les producteurs miniers, au moins à court terme.

Il paraît donc possible, en première analyse, que le coût social de l'épuisement soit payé, mais cette prise en charge amènera dans tous les cas à une réorganisation conséquente de la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B. Tout d'abord, une telle réorientation remettrait en question la stratégie des producteurs de terres rares de Baiyun Ebo d'une production de fer à bas coût, mais également le monopole de la Chine dans la production des terres rares qui est en parti dû aux bas coûts de production, ainsi que l'avantage compétitif des gros producteurs d'aimants chinois qui se sont imposés sur le marché également grâce à une forte production et des prix compétitifs. Il s'agirait donc d'une réorientation complète vers une production en plus faible quantité mais à plus forte valeur ajoutée. Ensuite, il semble difficile que le coût lié à cette prise en charge soit assumé par les seuls producteurs miniers. Il sera nécessairement répercuté sur les industries aval et cela se fera très probablement au prix d'une réduction de la consommation des terres rares.

Cette réorganisation de la production peut être envisagée à travers l'augmentation du prix, mais peut également être envisagée via une implication directe des industries aval dans la production des terres rares, tendant vers un modèle intégré de production des aimants. En effet, il peut être envisagé que la mise en place d'une chaîne de valeur plus intégrée permettrait une meilleure répartition de la valeur ajoutée et des coûts sociaux de la production. L'étude de cas a en effet permis d'établir que les coûts sociaux de la production se concentraient sur l'amont de la chaîne (partie 2 du présent chapitre). En revanche, la valeur ajoutée le long de la chaîne n'a pas pu être estimée quantitativement et mériterait que des recherches futures déterminent la répartition de cette valeur. Cependant, l'hypothèse peut être faite que la valeur ajoutée est plus importante en aval de la chaîne des aimants Nd-Fe-B. En effet, la partie 1 a montré que les aimants Nd-Fe-B étaient

un poste majeur de la chaîne en termes de consommation (environ 20% en masse de la consommation de terres rares dans le monde, 40% pour la Chine), mais surtout de valeur ajoutée, avec environ 37% des parts de marché des différentes applications de terres rares dans le monde en 2008 (USGS in Y. Yang et al., 2017). Il a également été souligné en entretien (Entretien 11, 2016) que la fabrication d'aimants Nd-Fe-B était un secteur lucratif comparé à d'autres applications des terres rares. La prise en charge des coûts sociaux de l'amont de la filière pourrait ainsi être réalisée directement par les acteurs concentrant la valeur ajoutée de la chaîne. De plus, les industries consommatrices de terres rares ont plus d'intérêt à la préservation de la ressource que les producteurs miniers de Baiyun Ebo, et il a notamment été montré que les seuls acteurs engagés dans le recyclage des aimants étaient des « fabricants d'aimants intégrés » qui possédaient des étapes de tranformation des terres rares en plus de l'étape de fabrication des aimants.

L'investissement des industries consommatrices de terres rares dans les industries amont a déjà été envisagé, mais principalement dans une perspective de sécurisation de l'approvisionnement pour les pays occidentaux aujourd'hui dépendant de la Chine (Lima & Filho, 2015, p. 51). Ainsi, pour pallier l'échec de la relance occidentale des mines de terres rares, James C. Kennedy propose que les pays occidentaux reconquièrent leur indépendance d'approvisionnement en créant des filières intégrées puisque la valeur ajoutée est à l'aval de la chaîne. Pour cela, selon lui, les industries utilisatrices de terres rares pourraient investir dans le montage d'une coopérative qui rassemblerait l'amont de la chaîne de valeur qui les approvisionnerait en terres rares en s'émancipant de la spéculation et de la manipulation des prix. L'approvisionnement de cette coopérative pourrait se faire avec des producteurs (dans cet exemple les producteurs américains) sur la base des gisements de phosphates déjà en exploitation, mais dont les terres rares ne sont pas valorisées faute d'accès au marché et sont rejetées dans les déchets miniers (volumes estimés par l'autrice comme constituant 65% de la demande mondiale) (Lima & Filho, 2015, Chapitre 3). Dans cet exemple, il s'agit d'investir pour monter une chaîne d'approvisionnement qui ne soit pas chinoise afin de mettre à mal le monopole vu comme un risque d'approvisionnement. Cependant l'idée de regrouper des industries consommatrices pour prendre en main la production de terres rares peut tout à fait être appliquée en Chine dans une perspective d'économie de la ressource et de prise en charge des coûts sociaux de la production sous une impulsion gouvernementale. La différence avec l'état actuel des consortiums mis en place par l'état chinois étant de mettre en place des consortiums pilotés par les fabricants d'aimants ou les industries aval et non par les producteurs miniers.

Dans le cas étudié, toujours dans une perspective de réduction des déséconomies et de prise en charge des coûts sociaux de la production, cela pourrait également prendre la forme d'un investissement conjoint des industries aval dans le montage d'une industrie de recyclage des aimants Nd-Fe-B. Une telle initiative en Europe ou aux États-Unis aurait le double avantage de répondre aux préoccupations étatiques de sécuriser les approvisionnements et de diminuer les coûts sociaux et environnementaux associés à la production, non pas parce que la production se ferait en dehors de Chine, mais parce que les coûts sociaux et environnementaux du recyclage sont moins importants que ceux de l'extraction comme montré ci-avant.

Cependant si plusieurs exemples réels montrent la possibilité pour les industries consommatrices de terres rares d'investir dans l'amont de la chaîne, ils montrent également le frein que constitue le coût élevé de la production hors de Chine, soulignant donc que sans prise en charge des coûts sociaux en Chine et augmentation du prix des terres rares, la situation reste bloquée. Ainsi, lors de période de tension sur les matières premières comme en 2010-2012, l'investissement des industries aval dans l'amont de la filière est un mouvement qui semble « spontané » (Entretien 2, 2016). Deux types d'exemples de mise en place d'investissement des industries aval dans les industries amont peuvent être cités (Entretien 2, 2016). Les premiers exemples ont trait à l'investissement des industries aval dans l'extraction des terres rares. Ainsi, en Inde, il existe une *joint-venture* entre Toyota Tsusho Corporation et un acteur minier indien, Indian Rare Earth, dont le but est de récupérer les terres rares produites à partir de la mine pour Toyota (Toyota Tsusho Corporation,

2015). Il y a déjà eu des accords entre Siemens et Lynas (producteur minier australien), et également entre Siemens et Molycorp (producteur minier des États-Unis). Les entretiens ont souligné que les industries automobiles et certains grands acteurs de l'industrie éolienne et des appareils électriques (comme Siemens) étaient prêts à investir ou payer un surcoût pour une filière de « qualité » (Entretien 2 et 23, 2016), notamment car pour l'industrie automobile le coût des aimants Nd-Fe-B reste relativement faible dans le produit final. Ces exemples sont donc purement de l'ordre de la sécurisation de l'approvisionnement et ont uniquement pour but d'illustrer la capacité d'investissement des industries consommatrices, car sans études spécifiques il n'est pas possible d'affirmer que le coût social et environnemental est moindre que l'extraction en Chine. Le deuxième type d'exemple consiste en un regroupement d'utilisateurs finaux. Un tel regroupement d'utilisateurs finaux s'est mis en place en Allemagne via la Rohstoffallianz en 2011 lors de la crise des terres rares (Kooroshy et al., 2015). Ce regroupement a envisagé l'approvisionnement en recyclage, mais celui-ci s'est heurté une fois encore à la question des coûts trop élevés (Entretien 2, 2016). De plus, ce regroupement d'utilisateurs finaux a pris fin en 2015 lorsque les prix des terres rares ont diminué, soulignant le court-termisme d'une telle initiative face à des métaux dont le prix est très volatile (Kullik, 2019). Cela met donc en évidence la limite de l'organisation « spontanée » de l'industrie aval pour supporter les coûts supplémentaires liés à l'intégration des coûts sociaux et environnementaux de la production, et plaide pour une intervention des politiques publiques pour favoriser la diminution des coûts sociaux et des déséconomies dans cette chaîne de valeur.

4.3. Intervention des pouvoirs publics, recyclage et souveraineté

La question de l'intervention des pouvoirs publics pour diminuer les coûts sociaux liés à l'épuisement de la chaîne de valeur Nd-Fe-B ainsi que les déséconomies associées se concentre ici sur la mise en place du recyclage en Europe.

Aujourd'hui, malgré plusieurs initiatives aux États-Unis et en Europe visant à étudier le caractère critique des approvisionnements en métaux (Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2010, 2014; Deloitte et al., 2017) et classant les terres rares parmi les matériaux critiques[121], il existe en Europe peu de projets industriels concrets permettant d'envisager un approvisionnement européen en terres rares qu'il soit primaire ou secondaire. Et il n'existe pas de plan stratégique permettant d'identifier des usages prioritaires d'un point de vue social et environnemental pour ces métaux critiques. Ainsi, dans l'étude sur les métaux critiques de l'union européenne ces métaux sont évalués pour leur participation à la création de valeur économique en Europe. Cette vision purement économique ne permet pas de distinguer, en dehors du domaine militaire sur lequel l'autrice ne peut pas se prononcer, des usages définis comme stratégiques, et présentant un intérêt indiscutable à long terme comme le déploiement des énergies renouvelables.

Comme cela a été souligné dans le paragraphe 2.2.5 la production de terres rares à partir de sources secondaires pour fabriquer des aimants semble préférable, sur le plan des coûts sociaux de l'épuisement, à la production primaire : évitement de la production de déchets radioactifs supplémentaire, évitement des pertes des terres rares contenus dans les produits en fin de vie et évitement des pertes de terres rares liées à l'étape de concentration à Baiyun Ebo. S'il paraît utopique d'assurer tout l'approvisionnement correspondant à la consommation européenne par la mise en place du recyclage dans un contexte de forte croissance de la consommation (voir chapitre 1), il peut être envisagé que la mise en place d'une filière de recyclage soit dirigée vers des secteurs

[121] Comme vu au chapitre 1, les métaux critiques sont des métaux dont le risque d'une pénurie économique européenne, et l'impact économique sont considérés comme élevés selon deux critères : 1) Risque d'approvisionnement : stabilité politique et économique des pays producteurs où la production est concentrée, substituabilité, et taux de recyclage UE. 2) Impact économique : la somme des valeurs ajoutées des secteurs utilisant cette ressource pondérée par la part relative de ce secteur dans l'utilisation de la ressource.

jugés prioritaires, correspondant notamment aux engagements pris par l'UE en termes de réduction de gaz à effet de serre, donc pour le déploiement d'énergies renouvelables.

Pour mettre en place un recyclage à l'échelle européenne, les bas coûts de production des aimants Nd-Fe-B chinois et l'absence actuelle d'alternative d'approvisionnement rendraient inefficiente la mise en place d'un outil de type incitation économique auprès des acheteurs d'aimants. La réglementation doit donc passer par une incitation à la mise en place d'un recyclage des produits en fin de vie si les pertes de matières qui ont lieu actuellement à cette étape veulent être stoppées.

Le seul pays ayant mis en place des initiatives sur le recyclage des aimants en fin de vie est le Japon et cela est dû à un plan gouvernemental lancé depuis 2000 définissant une politique ambitieuse de recyclage « *the Basic Act on Establishing a Sound Material-Cycle Society* » mis en place en 2000 (Amemiya, 2018). Cette politique publique est orientée "matière", c'est-à-dire qu'elle prend en considération le taux de récupération des métaux dans les produits en fin de vie, contrairement à l'union européenne qui définit le taux de recyclage en fonction de la masse du produit recyclé, permettant ainsi la dilution (et donc la perte) des métaux contenus dans les produits en fin de vie dans d'autres filières comme la filière de l'acier. La loi japonaise est donc très exigeante et coûte très cher à l'état japonais pour des résultats intéressants en termes environnementaux et d'économies des ressources (voir partie 1 et paragraphe 2.2.5), mais moins intéressants en termes stratégiques. En effet, il a été vu dans la partie 1 qu'il existe toujours une dépendance à la Chine pour certaines étapes du recyclage. La mise en place d'une telle réglementation matière en Europe a déjà été envisagée, mais fait face à des réticences de la part des producteurs puisque, dans le dispositif actuel de Responsabilité élargie des producteurs (*REP*), ces acteurs seraient financièrement en charge du recyclage, or le montage de filière de recyclage a un coût d'entrée élevé et un coût d'opération élevé (voir partie 1).

Les effets en termes de coûts sociaux et en termes de souveraineté de la mise en place d'un tel recyclage ne seront donc pas évidents à court terme. Comme l'a montré l'expérience japonaise, dans un premier temps le recyclage restera dépendant des acteurs maîtrisant la séparation des terres rares à l'international, donc aux producteurs actuels de terres rares et induisant des coûts environnementaux liés à l'expédition d'aimants à l'étranger. Seul un couplage du développement de la collecte, du démontage des aimants à court terme et de la mise en point de procédé métallurgique permettant de récupérer les terres rares sur le long terme (5 ans est le temps minimum pour monter une filière de recyclage) permettra le développement du recyclage des aimants en Europe. D'un point de vue social et environnemental pour la mise en place du recyclage, il paraît donc intéressant de procéder en 2 temps. A court terme identifier et "légaliser" les filières d'exportations des déchets (qui existent déjà malgré la convention de Bâle), et mettre en place de vrais contrats avec les recycleurs d'aimants en Chine, à un prix permettant de garantir de bonnes conditions sociales et environnementales de production. Cela engendrerait évidemment les difficultés habituelles sur la capacité des acteurs à apporter des garanties sur les conditions de production, mais cela permettra au moins de travailler avec des acteurs légaux et de contribuer à diminuer les pertes de la chaîne de valeur. La surcapacité de production des acteurs miniers et des producteurs d'aimants devrait permettre sans difficulté de garantir l'accueil de ce nouveau flux de matière. A long terme, il s'agirait de monter des filières de recyclage par matière en Europe et progressivement augmenter les taxes de manière très importante pour les industriels qui ne font pas des produits éco-conçus afin de faciliter et diminuer le coût du recyclage.

Un tel plan stratégique devrait également poser la question des priorités en termes de recyclage des produits en fin de vie. Certaines initiatives en termes de recyclage ont tendance à se focaliser sur les produits électroniques et notamment les téléphones portables, suivant le constat que très peu de métaux sont recyclés sur l'ensemble des métaux dans les portables (essentiellement les métaux précieux et le cuivre, donc 4 ou 5 métaux sur 35 à 50 métaux présents dans les smartphones), et y voyant un grand potentiel de récupération. Cependant, dans les produits comme les smartphones, les composants sont extrêmement miniaturisés et ne sont pas écoconçus (les composants sont

souvent collés, il n'y a pas de standardisation des pièces d'une marque à l'autre, les alliages sont difficiles à recycler). La faisabilité du recyclage de l'ensemble des métaux contenus est donc loin d'être assurée. C'est en revanche une opération qui peut être économiquement intéressante en faisant fi des déséconomies et en récupérant uniquement les métaux précieux comme c'est le cas aujourd'hui en Europe. Mais cela conduit à des pertes importantes puisque l'ensemble des autres métaux est dilué dans la filière de l'acier. Si une réflexion doit être menée en termes de coûts sociaux de l'épuisement liés à une telle politique, cela conduira nécessairement à se poser la question de savoir quels produits cibler pour le développement d'une industrie de recyclage des aimants Nd-Fe-B à grande échelle en Europe.

4.4. Freins macroéconomiques pour la prise en charge des coûts sociaux dans les chaînes de valeur extractives

Le paragraphe 4.2 a mis en avant la possibilité de prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement de la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B par les industries aval de la chaîne. Cependant, cette étude ne vise que la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement d'une matière, soit le néodyme. Or, s'il s'avérait que l'exploitation de toutes les ressources métalliques faisait face à des coûts sociaux similaires, cela engendrerait inévitablement une mise à mal du modèle économique de nombreux secteurs basés sur la consommation de nombreuses ressources extractives à bas coût (l'automobile, le secteur électronique, les énergies renouvelables, les appareils électriques, etc.). Si ces résultats se confirmaient, il semble *a priori* illusoire que les coûts sociaux de l'épuisement puissent être pris en charge sans changement du modèle de production et de consommation des produits. Une telle augmentation des prix des ressources métalliques impliquerait nécessairement une forte diminution de la valeur dégagée par ces industries. Si le coût réel de l'extraction des ressources métalliques était payé, il est vraisemblable que le modèle actuel de production et de consommation, basé sur la production et la consommation de masse de ces ressources métalliques, ne soit plus viable. La prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement et de l'extraction des ressources favoriserait probablement le développement de l'écoconception des produits, et de l'approvisionnement secondaire, moins impactant en termes d'épuisement et de coûts environnementaux. De plus, comme cela a été vu au paragraphe 2.5 du chapitre 1, il n'est pas possible d'assurer la totalité d'une consommation croissante de métaux via le recyclage. La prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement associés aux métaux favoriserait donc probablement la diminution de la consommation de ces ressources et la vente de produits économes en ressources métalliques et renverserait la tendance actuelle d'une consommation de métaux toujours plus diverse et importante.

Cette question des coûts sociaux liés à la production et à l'épuisement des ressources métalliques dans leur ensemble est donc une question importante à adresser dans de futures recherches. Notamment, en ce qui concerne les scénarii de transition énergétique, qui nécessitent la consommation d'un grand nombre de ressources (Capellán-Pérez, de Castro, & Miguel González, 2019) ; il s'agit de prendre en compte les coûts sociaux de l'épuisement associés au développement de systèmes d'énergies renouvelables afin de discuter de leur prise en charge et d'éviter un report massif de ces coûts sur la société. Capellán-Pérez et ses collaborateurs ont ainsi déjà montré que le EROI (« *Energy Return On Investment* »), ou en français le taux de retour énergétique, de ces systèmes d'énergies renouvelables était en dessous des seuils nécessaires pour le maintien d'un niveau de développement élevé dans les sociétés industrielles actuelles et mettait de ce fait en question la pertinence du « paradigme de la croissance verte ». Des recherches sur les coûts sociaux liés à l'ensemble des métaux nécessaires pour la mise en place de systèmes d'énergies renouvelables pourraient ainsi déterminer la part de ces coûts pouvant être prise en charge par une politique volontariste de recyclage, de diminution des coûts sociaux liés à l'épuisement dans l'exploitation primaire de ces ressources, ainsi que les quantités de métaux raisonnablement disponibles via une telle politique. Cela contribuerait à évaluer quelle quantité d'énergie pourrait être mise à disposition via un système énergétique visant une forte soutenabilité.

Conclusion du chapitre 3

Le chapitre 3 a appliqué la méthodologie d'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement, au sens de Kapp, au cas d'étude de la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B. Il a été vu qu'une telle méthodologie était applicable à l'étude de l'épuisement d'un métal dans la limite des données disponibles sur les impacts sociaux, environnementaux et sanitaires de la production, ainsi que des données relatives à l'épuisement (évolution des teneurs et déséconomies) et aux dépenses publiques liées à cet épuisement. La méthodologie a ainsi permis d'étudier les reports de coûts sociaux et environnementaux dans la chaîne de valeur du néodyme : entre acteurs (de l'aval vers l'amont), dans le temps (héritage des déchets miniers pour les générations futures) et dans l'espace (des pays riches vers la Chine). Elle a également permis de faire le lien entre différents éléments des sphères biophysique (diminution de la teneur, pertes, impacts liés à la dispersion des déchets) et socio-économique (stratégie de délocalisation/externalisation des pays riches, verrou bas de gamme en Chine, imbrication de la filière des terres rares et de l'acier). L'intérêt d'une telle étude réside dans la prise en compte des phénomènes d'épuisement et se distingue par rapport à d'autres études sur les externalités de la production, par l'accent mis sur les pertes générées par l'organisation de la production, ainsi que sur les possibilités de prise en charge de ces coûts. Ainsi, la définition de coûts sociaux de l'épuisement proposée dans la première partie met en lumière cette problématique différemment du concept économique de réserve. En effet, l'épuisement des réserves de terres rares n'est pas perçu comme un danger imminent, alors que l'étude de cas a montré que les coûts sociaux de l'épuisement sont déjà importants et que des actions pouvaient être mises en œuvre pour diminuer ces coûts.

Ce chapitre 3 a montré dans un premier temps les différents enjeux organisationnels de la chaîne de valeur du néodyme dans les aimants Nd-Fe-B liés à l'épuisement. La chaîne de valeur est intrinsèquement liée aux problématiques de production des terres rares, les aimants Nd-Fe-B constituant le premier poste de consommation des terres rares dans le monde en termes de valeur ajoutée, avec environ 37% des parts de marché des différentes applications de terres rares attribuées aux aimants permanents en 2008. La production de terres rares s'est progressivement concentrée en Chine de 1985 à 2000, qui détient aujourd'hui le quasi-monopole de la production. Cette concentration a eu pour point de départ le refus des entreprises européennes et américaines de prendre en charge les coûts liés aux règlementations environnementales et sanitaires de l'exploitation des terres rares, face à une stratégie chinoise de bas coûts, de taxes à l'exportation, de rachat et soutien aux entreprises nationales, qui ont conduit à des délocalisations en Chine. Les difficultés de relance de projets miniers ces dernières années dans d'autres pays du monde à la suite de la baisse des prix ont révélé le verouillage du monopole chinois, seule production à pouvoir se maintenir lorsque le prix des terres rares est bas.

Ainsi, l'analyse de la chaîne de valeur du néodyme et de son impact sur l'épuisement de la ressource a établi que la recherche des coûts de production les plus bas associée à la surproduction était le modèle économique dominant de la filière et rendait difficile pour les acteurs chinois comme internationaux d'échapper à cette logique. Il a été montré que la chaîne de fabrication des aimants en Chine et au Japon était structurée par un monopole de 5 acteurs chinois producteurs de terres rares, de nombreux fabricants d'aimants Nd-Fe-B avec des tailles variées et de divers acheteurs avec une dominante de consommation selon les entretiens menés par les secteurs de l'automobile et de la climatisation. Le monopole des producteurs de terres rares chinois pourrait conduire à une remontée des prix et à un plus grand contrôle de l'utilisation des ressources, mais cette vélléité est contrecarrée par la persistance du secteur informel qui tire les prix vers le bas et fait pression sur les coûts, ainsi que par la logique de surproduction à bas coûts des acteurs officiels. Cette logique de surproduction est menée aussi bien par les acteurs miniers que par les fabricants d'aimants chinois.

Enfin, il a été vu que si le recyclage des aimants restait marginal il existait déjà des voies de recyclage. Les freins à la mise en place du recyclage sont les prix volatils et bas de la ressource, les difficultés liées à la mise en place de la collecte, la dépendance du procédé actuel de recyclage à la ressource

primaire et aux acteurs miniers qui possèdent les étapes de traitement des terres rares et sont peu intéressés par les questions de recyclage. En effet, les seuls acteurs réalisant un recyclage des aimants sont des fabricants d'aimants intégrés qui possèdent les étapes de traitement chimique et de séparation des terres rares. Ces acteurs sont dotés des équipements nécessaires pour réaliser le recyclage sans investissement supplémentaire et, contrairement aux principaux acteurs miniers (possédant des réserves importantes de terres rares), ils sont intéressés par cette ressource secondaire.

En miroir de cela, les leviers potentiels de l'amélioration du recyclage sont : un prix plus élevé et plus stable des terres rares, la mise en place à l'échelle industrielle de procédés métallurgiques ne dépendant pas de la filière primaire et la réglementation incitant les industries consommatrices d'aimants Nd-Fe-B à écoconcevoir et traiter les aimants en fin de vie. Il semble qu'une reprise de contrôle des acteurs aval sur les étapes de traitement chimique favorise la mise en place du recyclage.

Dans un deuxième temps, une estimation *a minima* des coûts sociaux de l'épuisement a été réalisée. Tout d'abord l'étude a identifié de nombreux enjeux sociaux, sanitaires et environnementaux liés à la chaîne de valeur du néodyme et dont la non prise en charge génère des coûts sociaux. Cependant, il est délicat d'obtenir des données de terrains en Chine sur ces enjeux et donc de pouvoir quantifier les coûts de dommages associés à ces enjeux. Parmi les enjeux identifiés, les coûts sociaux associés à la gestion des déchets sur le site de Baiyun Ebo, principal site de production de terres rares, sont apparus à la fois comme un enjeu central quant à la question de l'épuisement et comme un objet d'évaluation réaliste au vu des données disponibles. L'ensemble de l'évaluation s'est faite sur la base de données de la littérature sur la production chinoise d'oxydes de terres rares et sur les teneurs du gisement de Baiyun Ebo.

Pour évaluer les coûts sociaux des déchets liés à l'épuisement, il a tout d'abord fallu évaluer l'ampleur des phénomènes d'épuisement physiques à Baiyun Ebo. Il a été vu que la teneur en OTR du gisement de Baiyun Ebo était en diminution et était théoriquement un facteur impactant la production de déchets. Cependant, dans la pratique le rendement de la production d'oxydes de terres rares, qui est seulement de 10% aujourd'hui à Baiyun Ebo, a un impact plus important sur les coûts sociaux associés aux déchets. Ainsi, non seulement l'inefficacité du procédé en termes de récupération de terres rares conduit à des pertes de ressources, mais participe à l'augmentation du volume de déchets et donc des coûts sociaux qui y sont associés. Autrement dit, il a été vu que la dynamique d'épuisement des ressources au niveau de Baiyun Ebo influait sur les coûts sociaux liés aux déchets miniers du site plus par les déséconomies (associées au faible rendement) que par la diminution qualitative de la ressource (baisse de la teneur).

Le faible impact de la teneur sur l'augmentation des coûts peut s'expliquer par le fait qu'il s'agit d'un sous-produit avec des quantités produites très faibles par rapport à la production de concentré de fer. Il a également été souligné que de telles constatations étaient potentiellement généralisables à l'ensemble des petits métaux (voir Tableau 6 du chapitre 1 pour le rappel de la définition) qui sont souvent des coproduits dans les exploitations minières, et dont le procédé a un faible rendement. Enfin, l'impact de la diminution des teneurs n'est pas inexistant et peut conduire à une augmentation conséquente des coûts si les effets d'échelle sont considérés : échelle mondiale et non locale, et coûts sociaux de long terme (stockage des résidus bien après la fin de l'exploitation).

Ensuite, l'étude a montré l'importance des coûts sociaux des déchets liés à l'épuisement, en comparant sur la période 2017-2030 un scénario de prise en charge des coûts sociaux associés aux déchets sur le modèle de production actuel (scénario 1), avec un scénario de prise en charge de ces coûts sociaux (scénario 5) par l'amélioration des rendements. Cette comparaison a permis d'attribuer la part de l'augmentation du coût social des déchets de l'exploitation du néodyme à l'épuisement, représentant une grande partie des coûts sociaux liés aux déchets dans le scénario 1.

Cette augmentation des coûts sociaux liée à l'épuisement serait donc sur la période de 2017 à 2030 d'un coût moyen annuel de 32 554 $/t de néodyme produit à 65 108 $/t de néodyme produit, soit un pourcentage par rapport au prix du néodyme en 2013 de 48 à 98% (voir Tableau 48). Soit une estimation 146 à 292 fois plus élevée que l'évaluation des « dommages aux ressources naturelles que sont les ressources en terres rares » réalisée dans l'étude sur les externalités de Zhou et ses collaborateurs (B. Zhou et al., 2017).

La redéfinition de l'épuisement comme phénomène continu et irréversible contribuant à l'augmentation des impacts sociaux et environnementaux, plutôt que comme un problème d'allocation du revenu de l'exploitation des ressources dans le temps conduit donc à une évaluation bien supérieure des coûts liés à cet épuisement.

A cette augmentation des coûts sociaux vient s'ajouter les pertes inutiles et irrécupérables de réserves, soit les déséconomies, qui sont en moyenne de 1,74 tonne de Nd/tonne de Nd produit et les dépenses publiques pour pallier l'épuisement de la ressource qui n'ont pas pu être évaluées en détails. Ces pertes de la ressource en terres rare viennent s'ajouter aux pertes liées à la quasi-absence de recyclage dans les produits en fin de vie. Ces déséconomies sont ainsi très importantes et illustrent parfaitement les difficultés liées à la production de masse de matières premières à bas coût et augmentant la pression sur la production primaire et ses impacts.

Dans un troisième temps, le lien entre les caractéristiques de la chaîne globale de valeur et de l'émergence des coûts sociaux étudiés et l'identification de phénomènes d'épuisement au sein de la chaîne a été analysé. Cette analyse a permis de souligner que les caractéristiques de la chaîne de valeur que sont la recherche d'un bas coût de production associée à une production massive et un verrouillage par le bas des fabricants d'aimants Nd-Fe-B sont à l'œuvre pour les coûts sociaux de l'épuisement de la chaîne de valeur Nd-Fe-B. Le caractère autorenforçant ou verrouillé de ce modèle a été souligné, la surproduction favorisant les acteurs pratiquant les économies d'échelle et donc la production de masse, et cette surproduction étant à l'origine de pertes de terres rares dans la chaîne de valeur augmentant ainsi la production nécessaire pour satisfaire la demande. Il y a donc là deux phénomènes de causalité circulaire poussant à la surproduction (voir en jaune Figure 83).

Ces caractéristiques de la chaîne sont des freins au changement pour mettre en place une logique plus économe en ressources, générant moins de déchets et donc de coûts sociaux. Parmi les solutions techniquement réalisables pour lutter contre l'épuisement des ressources, l'absence d'augmentation du rendement de la production des oxydes de terres rares semble significative des freins liés à l'organisation de la chaîne. En effet, il pourrait être surprenant que les exploitants de Baiyun Ebo ne se préoccupent pas d'améliorer le rendement de la production des terres rares, ce qui pourrait avoir un intérêt économique pour l'entreprise. Ceci s'explique par le fait que la production de l'acier et des terres rares appartient à un même acteur, l'entreprise Baotou Iron and Steel Group dont la priorité est clairement la production de fer à bas coûts. L'ampleur des coûts sociaux liés à l'épuisement est donc due à l'absence d'incitation ou d'obligation de prise en charge de ces coûts, mais aussi à l'organisation de la chaîne de valeur du néodyme, pilotée en grande partie par un acteur dont la stratégie industrielle est basée sur la production de masse à bas coût de fer pour l'industrie de l'acier, et non sur la valeur ajoutée des terres rares. En effet, si l'extraction de minerai de fer est réduite à Baotou, il devient nécessaire pour maintenir la production d'acier d'importer du minerai plus coûteux de l'étranger, donc les coûts de production du fer augmentent. Afin de maintenir un coût bas et une production du minerai de fer pour la production de l'acier, les terres rares sont donc gaspillées.

Enfin, les différents moyens de prise en charge des coûts sociaux et environnementaux de la chaîne du néodyme, afin de les réduire, ont été discutés. Tout d'abord, la question de la rentabilité des investissements pour prendre en charge les coûts sociaux de l'épuisement de la chaîne de valeur du néodyme a été abordée. Il a été souligné que deux types de coûts sociaux différents pouvaient être distingués par rapport à cette question de la rentabilité. Le premier type est constitué par les coûts

sociaux liés à des dommages qui n'atteignent pas directement les facteurs de la production, comme les dommages réalisés sur l'environnement et les populations locales, dont la prise en charge par les acteurs économiques n'est évidemment pas rentable, tant que notre système de comptabilité ou la législation ne transforment pas ces coûts en coûts réels de l'entreprise. Le deuxième type de coût social est un coût atteignant directement les conditions de production, comme documenté par Kapp concernant le « facteur humain ». Dans le présent cas d'étude, il s'agit des déséconomies et donc de l'utilisation d'un mauvais rendement dans la production de terres rares. Cependant, là encore il n'est pas nécessairement rentable pour l'entreprise d'améliorer le rendement des terres rares, les producteurs de terres rares considérant que les pertes de terres rares ne sont pas un problème dans la mesure où ils sont en surproduction. Le deuxième facteur étant que la rentabilité de la production à Baiyun Ebo est liée à la production de fer et non à celle des terres rares. Il n'y a donc pas dans la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement de situation « gagnant-gagnant », mais un surcoût généré par la prise en charge de ces coûts sociaux. Cette situation rend nécessaire l'arbitrage entre l'obtention de matières premières à un coût économique bas et la prise en charge des coûts sociaux de la production afin de réduire les impacts sociaux et environnementaux.

L'étude des externalités négatives de Baiyun Ebo semble partir du postulat implicite que les externalités doivent être prises en charge par les seuls revenus dégagés par la production d'OTR. Or, cela ne semble pas envisageable selon l'évaluation menée dans le présent cas d'étude, les coûts sociaux du seul phénomène d'épuisement dépassant le prix de revient des producteurs miniers. Cette prise en charge des coûts sociaux doit donc passer par une meilleure répartition des coûts sociaux et de la valeur dans la chaîne, qui peut se faire via une augmentation du prix, mais également via une participation directe des industries aval dans l'amont de la chaîne. Dans tous les cas, cela induirait un bouleversement de l'organisation actuelle avec une réorientation complète vers une production plus faible à haute valeur ajoutée.

Les cas réels de tentatives des industries aval pour reprendre le contrôle d'une partie de la chaîne de valeur montre la capacité d'investissement de certaines industries aval pour l'obtention d'un approvisionnement sécurisé. Cette capacité d'investissement peut donc être transposée sur la prise en charge des coûts sociaux. Cependant, ces cas réels ont connu des succès limités, car les acteurs économiques aval s'en désintéressent dès que les prix des terres rares redescendent. Cela met donc en évidence la limite de l'organisation « spontanée » de l'industrie aval pour supporter les coûts supplémentaires liés à l'intégration des coûts sociaux et environnementaux de la production, et plaide pour une intervention des politiques publiques pour favoriser la diminution des coûts sociaux et des déséconomies dans cette chaîne de valeur.

A l'échelle européenne, ces politiques publiques pour la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement, pourraient se concentrer sur la mise en place du recyclage, production générant moins de coûts sociaux. S'il est illusoire de vouloir atteindre une indépendance vis-à-vis de la Chine dans la consommation de terres rares tout en maintenant le même modèle de consommation, la mise en place d'une politique de recyclage, dans une perspective de soutenabilité forte pourrait permettre d'alimenter quelques usages considérés comme stratégiques d'un point de vue social et environnemental.

Le seul exemple solide de la mise en place d'une politique de recyclage pour les aimants Nd-Fe-B est le Japon. La loi japonaise est donc très exigeante et coûte très cher à l'état japonais pour des résultats intéressants en termes environnementaux et d'économies de ressources, mais moins intéressants en termes d'indépendance vis-à-vis du monopole chinois puisqu'il existe toujours une dépendance à la Chine pour certaines étapes du recyclage.

D'un point de vue social et environnemental pour la mise en place du recyclage, il paraît donc intéressant de procéder en deux temps. A court terme identifier et "légaliser" les filières d'exportations des déchets, qui existent déjà malgré la convention de Bâle, et mettre en place de

vrais contrats avec les recycleurs d'aimants en Chine, à un prix permettant de garantir de bonnes conditions sociales et environnementales de production. Cela engendrerait évidemment les difficultés habituelles sur la capacité des acteurs a apporté des garanties sur les conditions de production, mais cela permettra au moins de travailler avec des acteurs légaux et de contribuer à diminuer les pertes de la chaîne de valeur en Europe. A long terme, il s'agirait de monter des filières de recyclage par matière en Europe et progressivement augmenter les taxes de manière très importante pour les industriels qui ne font pas des produits éco-conçus afin de faciliter et diminuer le coût du recyclage.

Enfin, il est souligné que la réorganisation des chaînes de valeurs pour prendre en compte les coûts sociaux de l'épuisement liés à l'exploitation des métaux présente des limites dans un contexte d'économie extractive. En effet, cette étude ne vise que la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement d'une matière, soit le néodyme. Or, s'il s'avérait que l'exploitation de toutes les ressources métalliques faisait face à des coûts sociaux similaires, cela engendrerait inévitablement une mise à mal du modèle économique de nombreux secteurs basés sur la consommation de multiples ressources extractives à bas coût (l'automobile, le secteur électronique, les énergies renouvelables, les appareils électriques, etc.).

Si ces résultats se confirmaient pour d'autres métaux, une telle augmentation des prix des ressources métalliques impliquerait nécessairement une forte diminution de la valeur dégagée par ces industries. Cette question des coûts sociaux liés à la production et à l'épuisement des ressources métalliques dans leur ensemble est donc une question importante à adresser dans de futures recherches. Notamment, en ce qui concerne les scénarii de transition énergétiques, qui nécessitent la consommation d'un grand nombre de ressources. Des recherches sur les coûts sociaux liés à l'ensemble des métaux nécessaires pour la mise en place de systèmes d'énergies renouvelables pourraient ainsi déterminer la part de ces coûts pouvant être prise en charge par une politique volontariste de recyclage, de diminution des coûts sociaux liés à l'épuisement dans l'exploitation primaire de ces ressources, ainsi que les quantités de métaux raisonnablement disponibles via une telle politique. Cela contribuerait à évaluer quelle quantité d'énergie pourrait être mise à disposition via un système énergétique visant une forte soutenabilité.

CONCLUSION

Synthèse générale

Le chapitre 1 a souligné que l'épuisement est généralement considéré, à travers les travaux de l'ENC, comme une problématique de disponibilité économique des ressources. Ceci conduit à s'intéresser à l'efficience des dispositifs d'allocation des ressources, l'objectif étant de maximiser dans le temps la valeur créée par l'exploitation de la ressource. Ce chapitre a montré que l'épuisement physique (ou déplétion) des ressources métalliques se traduit par la diminution de la disponibilité physique, du fait des pertes de matière tout au long de la chaine de valeur, et par la mise en exploitation de gisements de moindre qualité. L'augmentation de la production des ressources métalliques donne lieu à une augmentation absolue des impacts sociaux, sanitaires et environnementaux. De plus, ce chapitre a apporté une assertion nouvelle : l'épuisement physique (ou déplétion) vient renforcer les impacts sociaux, sanitaires et environnementaux de la production. Dans ces conditions, la dégradation irréversible des sphères biophysique et sociale s'amplifie de manière absolue et relative avec l'exploitation des ressources métalliques. Aborder la question de la soutenabilité de la production et de la consommation des ressources métalliques ne se traduit donc plus uniquement par la question de l'accès aux ressources des générations futures, mais également par la question du maintien de conditions de vie considérées comme acceptables par les sociétés. Dans une perspective de soutenabilité forte, l'épuisement a été redéfini comme deux phénomènes conjoints, continus et irréversibles : perte de quantité (perte de matière tout au long de la filière) et de qualité (diminution des teneurs du gisement et difficultés du recyclage) de la ressource d'une part ; et comme un démultiplicateur d'impacts environnementaux, sanitaires et sociaux des filières de matières premières minérales d'autre part.

Le chapitre 2 montre qu'il existe peu d'évaluations quantitatives et qualitatives sur lesquelles s'appuyer pour étayer ou rejeter l'importance des coûts sociaux liés à l'épuisement des ressources métalliques. En effet, les approches existantes d'évaluation monétaire des coûts liés à l'épuisement ne prennent pas en compte le lien entre l'épuisement et l'augmentation des impacts sociaux et environnementaux. Dans ce contexte, la recherche d'une diminution des coûts pour dégager une capacité d'investissement dans un substitut, n'est pas nécessairement un moteur de progrès technologique, mais peut être un des facteurs explicatifs des transferts de coûts vers les sphères sociale et biophysique. C'est de ce constat que découle la question de recherche : comment évaluer les coûts liés à l'épuisement physique des ressources métalliques dans une approche de soutenabilité forte ? Comment définir ces coûts, et évaluer leur prise en charge ? Pour répondre à cette question, le chapitre 2 a proposé un cadre pour l'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement des ressources qui puisse prendre en compte la question de l'interaction entre sphère économique, sociale et biophysique. Ce cadre s'appuie sur l'étude de Kapp des coûts sociaux de l'entreprise privée (W. Kapp, 1963), qui définit un coût social comme l'« ensemble des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble » générés par « les modes de production » dont les acteurs privés « ne sont pas tenus responsables » et qui « auraient pu être évités » (W. Kapp, 1963). Son approche est intégrée et transdisciplinaire et s'attache à étudier les causes et les principales solutions au problème des coûts sociaux en faisant le lien entre des considérations économiques et la prise en compte d'autres savoirs, notamment issus des sciences naturelles, comme les phénomènes physiques d'épuisement. Pour cela, il fait appel au concept de causalité circulaire cumulative (CCC), qui met en lumière des interactions qui viendraient renforcer des coûts sociaux déjà existants, et les mécanismes institutionnels à l'origine de ce renforcement. L'analyse du problème de l'épuisement menée par Kapp a permis de formuler trois types principaux de coûts sociaux liés à l'épuisement : les dépenses publiques liées à la prévention de l'impact économique de l'épuisement, les déséconomies (pertes de ressources évitables à l'échelle de la chaîne globale de valeur) et les coûts liés à la démultiplication des impacts sociaux et environnementaux. L'approche d'évaluation monétaire pour la prise en compte des coûts

sociaux et environnementaux qui est proposée dans la thèse a pour objectif de permettre la formulation d'une politique de prévention minimisant ou supprimant les coûts sociaux, sans se focaliser sur l'établissement d'un prix des entités sociales ou environnementales impactées. Suivant cet objectif, l'évaluation monétaire des coûts sociaux liés à la production est comprise comme l'ensemble des dépenses réellement engagées, ou qui pourraient être réellement engagées, pour la prise en charge des dommages et conséquences négatives supportées par des tiers ou par la collectivité dans son ensemble. Il est proposé de comparer différents modèles de production à travers l'établissement de scénarii de prise en charge des coûts sociaux : la prise en charge totale des coûts sociaux (approche soutenabilité forte), et la prise en charge des coûts sociaux selon des objectifs fixés par des politiques ou des normes sociales et environnementales préalablement définies (approche de Kapp). La comparaison de ces différents scénarii se fait à travers l'évaluation de deux types de coûts sociaux : les coûts orientés vers les dommages (les dépenses liées à l'ensemble des conséquences directes et indirectes d'un coût social, et qui ne permettent pas de supprimer définitivement la cause du coût social) et les coûts d'abattement (les dépenses liées à la suppression ou l'atténuation des causes d'un phénomène de coût social). Enfin, des pistes ont été développées pour l'analyse des causes systémiques liés à ces coûts sociaux. Cette analyse passe par la mise en lien de l'évaluation des coûts sociaux et environnementaux avec l'organisation de la chaîne globale de valeur afin de mettre en évidence les interactions entre différents niveaux d'analyse et d'identifier d'éventuelles chaînes de causalité circulaire cumulative. L'approche des coûts sociaux de l'épuisement des ressources métalliques ainsi définie constitue une approche intégrée qui permet de penser à l'échelle d'une chaîne globale de valeur, les interactions entre les sphères économiques, biophysique et sociale, dans l'objectif de permettre la formulation d'une politique de prévention minimisant ou supprimant les coûts sociaux.

Le chapitre 3 a appliqué la méthodologie d'évaluation des coûts sociaux de l'épuisement au sens de Kapp au cas d'étude de la chaîne de valeur des aimants Nd-Fe-B. Il a été vu qu'une telle méthodologie était applicable à l'étude de l'épuisement d'un métal dans la limite des données disponibles sur les impacts sociaux, environnementaux et sanitaires de la production, ainsi que des données relatives à l'épuisement (évolution des teneurs et déséconomies) et aux dépenses publiques liées à cet épuisement. L'intérêt d'une telle étude réside dans la prise en compte des phénomènes d'épuisement et se traduit par rapport à d'autres études sur les externalités de la production, par l'accent mis sur les pertes générées par l'organisation de la production, ainsi que sur les possibilités de prise en charge de ces coûts. Ainsi, la définition de coûts sociaux de l'épuisement proposée dans la première partie met en lumière cette problématique différemment du concept économique de réserve. En effet, l'épuisement des réserves de terres rares n'est pas perçu comme un danger imminent, alors que l'étude de cas a montré que les coûts sociaux de l'épuisement sont déjà importants et que des actions pouvaient être mise en œuvre pour diminuer ces coûts. Cette prise en charge des coûts sociaux doit passer par une meilleure répartition des coûts sociaux et de la valeur dans la chaîne, qui peut se faire via une augmentation du prix, mais également via une participation directe des industries aval dans l'amont de la chaîne. Dans tous les cas, cela induirait un bouleversement de l'organisation actuelle avec une réorientation complète vers une production plus faible à haute valeur ajoutée. Les cas réels de tentatives des industries aval pour reprendre le contrôle d'une partie de la chaîne de valeur montrent la capacité d'investissement de certaines industries aval. Cependant, ces cas réels ont connu des succès limités, car les acteurs économiques aval se désintéressent des initiatives portant sur l'amont de la filière dès que les prix des terres rares redescendent. Cela met donc en évidence la limite de l'organisation « spontanée » de l'industrie aval pour supporter les coûts supplémentaires liés à l'intégration des coûts sociaux et environnementaux de la production, et plaide pour une intervention des politiques publiques pour favoriser la diminution des coûts sociaux et des déséconomies dans cette chaîne de valeur. À l'échelle européenne, ces politiques publiques pour la prise en charge des coûts sociaux de l'épuisement pourraient se concentrer sur la mise en place du recyclage, production générant moins de coûts sociaux. A long terme, il s'agirait de monter des filières de recyclage par matière en Europe

et de progressivement augmenter les taxes pour les industriels qui ne font pas des produits éco-conçus, jusqu'à atteindre un niveau élevé de taxation qui facilite la mise en place du recyclage.

Contributions de la thèse

Trois types de contributions sont distinguées : des contributions théoriques et méthodologiques générales sur la question de l'épuisement des ressources métalliques, une contribution à la formulation d'un cadre pour l'étude des coûts sociaux dans une perspective de soutenabilité forte, et les apports du cas d'étude sur la question de l'épuisement, et dans une moindre mesure, sur la transition énergétique

Deux contributions théoriques et méthodologiques principales peuvent être distinguées.

Tout d'abord, si le lien entre l'épuisement des ressources métalliques et l'augmentation des impacts avait déjà été fait au sein des sciences environnementales (A. Behrens et al., 2007; IPBES, 2019; Nuss & Eckelman, 2014; Prior et al., 2012), ce lien n'avait pas été traduit dans des perspectives socio-économiques. Cela permet de souligner la présence actuelle de problématiques liées à l'épuisement et de ne pas se focaliser uniquement sur la fin des ressources à venir.

Ensuite, le travail de mise en lien du concept d'épuisement et de son application dans diverses méthodologies visant à mettre au point des indicateurs de durabilité a permis de mettre en lumière que la diversité des indicateurs était liée à un manque de définition consensuelle de la problématique de l'épuisement. Cette absence de définition faisant consensus amène parfois à des confusions entre une problématique purement économique de disponibilité et une approche en termes de conséquences sociales et environnementales de l'épuisement. Par exemple, la méthode ACV « Ecovalue08 » donne une évaluation monétaire de l'épuisement des ressources en utilisant l'approche par les prix, pour mesurer le facteur épuisement. C'est donc strictement l'approche hotellinienne qui est reprise, soit un problème de disponibilité économique. Or ces méthodes considèrent ce facteur d'épuisement comme une externalité environnementale. Ce calcul ne peut pas être considéré comme une externalité, que ce soit d'un point de vue des sciences économiques, car ce n'est pas « l'effet de l'action d'un agent économique sur un autre qui s'exerce hors marché » (Pigou, 1932), et ne peut pas non plus être comprise comme une prise en compte des impacts environnementaux de l'épuisement. Face à l'hétérogénéité des approches, la thèse propose une définition de l'épuisement des ressources métalliques dans une approche de soutenabilité forte qui peut être utilisée pour construire des indicateurs de durabilité dans d'autres cadres que celui des coûts sociaux. Très concrètement, la définition de l'épuisement pourrait servir dans le cadre des ACV. D'une part, il s'agirait de prendre en compte les impacts environnementaux de l'épuisement, en prolongeant les travaux des méthodes ReCiPe et EcoIndicator 99, pour prendre en compte l'augmentation marginale des impacts environnementaux du fait de l'épuisement, à minima sur la question des déchets miniers apparaissant comme centrale dans la question des impacts de l'épuisement. D'autre part, il s'agirait de prendre en compte la question des pertes de ressources dans l'indicateur de déplétion, notamment en se basant sur des données réelles de diminution des teneurs des gisement, et rendant compte du niveau de recyclage réel.

L'apport méthodologique consiste dans le développement d'un cadre de prise en compte des coûts sociaux au sens de Kapp dans une approche de soutenabilité forte. Ce cadre est un premier développement, puisqu'il n'y avait pas eu jusqu'à présent de développement méthodologique sur la base des travaux de Kapp. Cette méthodologie développe une approche tournée vers l'étude des causes des coûts sociaux et des leviers pour diminuer ces coûts. Très concrètement, le cadre développé exclut le recours à certaines méthodologies (comme le CAP), privilégie une approche par les dépenses réelles, propose la mise en place de différents scénarii pour comparer les actions de diminution des coûts sociaux et définit quelques étapes articulant l'approche CGV et l'évaluation des coûts pour penser les interactions entre sphères biophysique, sociale, et économique.

L'application de la méthodologie au cas d'étude a ainsi permis d'étudier les reports de coûts sociaux et environnementaux dans la chaîne de valeur du néodyme : entre acteurs (de l'aval vers l'amont), dans le temps (héritage des déchets miniers pour les générations futures) et dans l'espace (des pays riches vers la Chine). Et de faire le lien entre différents éléments des sphères biophysique (diminution de la teneur, pertes, impacts liés à la dispersion des déchets) et socio-économique (stratégie de délocalisation/externalisation des pays riches, verrou bas de gamme en Chine, imbrication de la filière des terres rares et de l'acier).

Concernant le cas d'étude quatre apports peuvent être soulignés : la confirmation de l'importance des coûts sociaux liés à l'épuisement à l'échelle de la chaîne de valeur du néodyme, la remise en question de l'efficacité économique, sociale et environnementale de la production, l'identification des déséconomies comme un facteur clef de l'épuisement, et la nécessaire prise en compte de l'épuisement dans le cadre de la transition énergétique.

Tout d'abord, l'importance des coûts sociaux et environnementaux liés à l'épuisement est confirmée à l'échelle du cas d'étude. En effet, l'estimation de l'augmentation des coûts sociaux liée à l'épuisement sur la période de 2017 à 2030 donne coût moyen annuel de 32 554 $/t de néodyme produit à 65 108 $/t de néodyme produit, soit un pourcentage par rapport au prix du néodyme en 2013 de 48 à 98%. Les déséconomies sont marquées par des pertes de 90% des terres rares en général (dont le néodyme) à la première étape de production, ce qui correspond (avec l'hypothèse optimiste que 80% de ces pertes puissent être récupérées plus tard) à des pertes définitives moyennes sur les étapes minières de 1,74 tonne de néodyme par tonne de néodyme produit.

Ensuite, si cette évaluation ne peut permettre à elle seule de mettre en doute l'hypothèse de rendements croissants, il peut être affirmé que l'exploitation des terres rares est loin d'atteindre une efficacité optimale de la production en termes économiques, sociaux et environnementaux et ce indépendamment de la question de l'épuisement physique. En effet, cette exploitation est en place depuis les années 1980 et de meilleurs procédés sont disponibles en Chine pour l'exploitation des terres rares. C'est donc moins l'absence de la possibilité théorique d'une amélioration des conditions de production qui doit être pointée, que son absence dans les conditions réelles, marquées par la recherche du plus bas coût pour les acteurs amont comme aval de la filière. Ceci constitue une constante depuis l'origine de la mise en place de la filière mondialisée dans les années 1980 avec la délocalisation de la production en Chine, qui avait entre autres pour objectif la non prise en charge des coûts sociaux et environnementaux liés aux déchets de la production de terres rares. Cette distinction entre réalité de la constance des coûts économiques sociaux et environnementaux de la production, liée aux mécanismes de structuration des chaînes globales de valeur, et amélioration potentielle grâce aux progrès technologiques, semble fondamentale pour recontextualiser le débat sur les rendements croissants ou décroissants.

De plus, il a été souligné dans le chapitre 1 que le facteur le plus étudié dans les publications académiques actuelles pour faire le lien entre épuisement et impacts sociaux et environnementaux, était la diminution des teneurs. Or, notre cas d'étude montre que la question des déséconomies est également une question essentielle pour l'étude des dynamiques d'épuisement, voire dans notre cas, prédominante. Il serait intéressant d'étudier si le profil établi pour le néodyme est généralisable pour la plupart des petits métaux. En effet, les petits métaux sont souvent présents en faible teneur dans les gisements et très souvent des coproduits ou sous-produits d'autres métaux et le faible rendement de leur production a déjà été pointé dans d'autres articles (Nassar et al., 2015).

Enfin, sur la question de la transition énergétique le cas d'étude souligne deux points. Premièrement, pour mener une transition énergétique réellement soutenable, il y a nécessité de prendre en compte les coûts sociaux et environnementaux de la production des métaux. Au vu des nombreuses difficultés soulignées dans le cas d'étude pour réduire les coûts sociaux et environnementaux de la production des terres rares, et si l'on ne peut pas statuer à priori sur les autres filières métalliques, une mise en application du principe de précaution suggèrerait de

favoriser pour la transition énergétique la mise en place de technologies les moins gourmandes en métaux possibles que ce soit d'un point de vue massique ou d'un point de vue de la diversité des métaux utilisés. Deuxièmement, le triptyque actuel : néodyme massivement utilisé pour d'autres application que la transition énergétique (les éoliennes ne représentaient que 2% des usages mondiaux en 2012), quasi-absence de recyclage et d'écoconception, et pertes de matières importantes le long de la filière ; devrait tirer la sonnette d'alarme sur la dispersion d'un métal pouvant contribuer à la transition énergétique.

Limites et perspectives

Les limites de la thèse découlent principalement de son approche transdisciplinaire et ouverte et du choix d'un sujet relativement vaste. En effet, si cette approche nous a permis de mettre en lien différentes contributions, elle rend intrinsèquement difficile (surtout à l'échelle individuelle) d' approfondir certains aspects méthodologiques et empiriques. Les principales limites sont abordées ici, de manière non exhaustive.

L'approche du concept d'épuisement, et de ses angles morts dans une approche de soutenabilité forte, s'est faite essentiellement à travers les sciences économiques. Dans le prolongement de ce travail, il serait nécessaire d'étudier la mobilisation qui est faite de ce concept aujourd'hui par les différents acteurs, et en premier lieu les pouvoirs publics. En effet, depuis la fin des années 2000, les institutions européennes et les États-Unis commencent à se préoccuper de la question des ressources minérales et de leur criticité (Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014; Custers, 2014, 2014), mais les initiatives qui en découlent se préoccupent essentiellement d'aspects géostratégiques et économiques, l'épuisement physique des ressources restant un sujet relativement peu abordé, et cantonné à la question du recyclage (DANINO-PERRAUD, 2018). Face à la vitesse actuelle d'extraction des ressources, la quasi-absence de recyclage pour les petits métaux et les durées assez conséquentes (entre 5 et 10 ans) de mise en place de filières de recyclage, il semble nécessaire et urgent que les institutions se saisissent de cette question.

Concernant l'applicabilité de la méthodologie, l'étude de cas a souligné les difficultés liées à l'application de l'évaluation des coûts orientés dommages, qui demande un grand nombre de données sur les impacts locaux de la production, qui n'étaient pas disponible dans notre cas. Cependant, dans une perspective tournée vers les actions à mettre en place pour diminuer les coûts et non dans une perspective de correction du prix de marché, les coûts d'abattement constituent une estimation suffisamment solide pour comparer différents scénarii. Cela n'étant pas contradictoire avec le fait que l'étude exhaustive des coûts orientés dommages concernant les déchets miniers constituerait une contribution primordiale à la question de la soutenabilité des filières extractives.

Par ailleurs, si l'élaboration d'un schéma permet de visualiser les interactions entre CGV et coûts sociaux, l'approche méthodologique pour le concevoir mériterait d'être détaillée et justifiée. Pour cela, la méthode devrait être renforcée dans son approche des institutions pour répondre aux questions suivantes : comment identifier les mécanismes générateurs de coûts sociaux et les CCC ? Comment déceler et rendre compte des mécanismes « institués » au sens des déterminants et des habitudes ancrés dans le fonctionnement de la chaîne globale de valeur ?

Concernant l'étude de cas, la quasi-absence de données environnementales et sociales a limité la prise en compte de certains phénomènes, notamment les interactions entre secteur informel et dynamiques d'épuisement dans le sud de la Chine. Une limite importante de l'étude est la focalisation sur la question de l'épuisement. En effet, la comparaison entre les différents scénarii (augmentation du rendement, prise en charge et/ou exploitation des déchets minier) et entre mine et recyclage, mériterait d'être étendue à d'autres domaines, notamment environnementaux, avec une étude ACV par exemple, mais aussi sociaux. En effet, pour prendre un exemple, le scénario

« idéal » en termes d'épuisement de notre étude de cas conduit à la fermeture de la mine de Baiyun Ebo comptant environ 20 000 employés (Xu & Shi, 2005), or il est loin d'être évident qu'une transition vers l'exploitation des déchets se fasse à emploi constant. Enfin, la focalisation sur la partie amont de la chaîne de valeur, c'est-à-dire sur l'extraction, si elle a pu permettre de soulever des problématiques spécifiques aux activités extractives, se fait au détriment d'une réflexion sur les usages. Il s'agirait également d'aborder dans de futures recherches la question des différentes alternatives relatives aux usages et de comparer les coûts des métaux qui y sont liés : prise en compte des coûts sociaux liés à l'ensemble des métaux utilisés dans les voitures électriques, comparaison des éoliennes fonctionnant avec différentes technologies (bobine de cuivre et aimants Nd-Fe-B), comparaison du recyclage avec des options de réutilisation, etc. En effet, les leviers de changement qui sont abordés dans la thèse sont principalement focalisés sur les méthodes de production, or ces leviers de changement sont complémentaires d'une approche par les usages.

BIBLIOGRAPHIE

© WageIndicator. (2018). Living Wage Series—South Africa—January 2018—In Rand, per Month [Page]. Consulté 18 septembre 2018, à l'adresse WageIndicator.org website: https://wageindicator.org/salary/living-wage/south-africa-living-wage-series-january-2018

Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons : Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum*, *25*(1), 107-123. https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011

Abraham, Y.-M., & Murray, D. (Éd.). (2015). *Creuser jusqu'où?⍰: Extractivisme et limites à la croissance*. Montréal: Éditions Écosociété.

Acemoglu, D. (2002). Directed Technical Change. *The Review of Economic Studies*, *69*(4), 781-809.

Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L., & Hemous, D. (2012). The Environment and Directed Technical Change. *The American Economic Review*, *102*(1), 131-166.

Acemoglu, D., Johnson, S., & Robinson, J. A. (2001). The Colonial Origins of Comparative Development : An Empirical Investigation. *American Economic Review*, *91*(5), 1369-1401. https://doi.org/10.1257/aer.91.5.1369

Acemoglu, D., Johnson, S., & Robinson, J. A. (2012). The Colonial Origins of Comparative Development : An Empirical Investigation: Reply. *American Economic Review*, *102*(6), 3077-3110. https://doi.org/10.1257/aer.102.6.3077

Ademe, BASIC, AScA. (2017a). *Analyse de la valeur socio-économique de l'alimentation, et sa répartition* (N° Volet 2). Consulté à l'adresse https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/analyse_enjeux_socioeconomiques_alimentation_durable_rapport2.pdf

Ademe, BASIC, AScA. (2017b). *Analyse des valeurs sociales de l'alimentation* (N° Volet 1). Consulté à l'adresse https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/analyse_enjeux_socioeconomiques_alimentation_durable_rapport2.pdf

Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. (2010). *Report on critical raw materials for the EU* (p. 84). UE.

Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. (2014). *Report on critical raw materials for the EU*. UE.

Adibi, N., Lafhaj, Z., Yehya, M., & Payet, J. (2017). Global Resource Indicator for life cycle impact assessment : Applied in wind turbine case study. *Journal of Cleaner Production*, *165*, 1517-1528. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.226

Adibi, Naeem, Lafhaj, Z., & Payet, J. (2018). New resource assessment characterization factors for rare earth elements : Applied in NdFeB permanent magnet case study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. https://doi.org/10.1007/s11367-018-1489-x

Agence internationale de l'énergie. (2013). *World energy outlook 2013*. Paris: International energy agency : OECD.

Ahmad, Y. J., El Serafy, S., & Lutz, E. (Éd.). (1989). *Environmental accounting for sustainable development* (5. printing). Washington, DC: World Bank.

Akada, R. (2017, mai). *Business Strategy of the Magnetic Materials Company*. Présenté à Hitachi Metals. Consulté à l'adresse https://www.hitachi-metals.co.jp/e/ir/pdf/pre/20170531eg.pdf

Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD) : Causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, *14*(12), 1139-1145. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006

Alliot, C., Cortin, M., Feige-Muller, M., & Ly, S. (2016). *La face cachée du chocolat*. Le BASIC, PFCE.

Alliot, C., Cortin, M., Feige-Muller, M., Ly, S., & Pigneur, J. (2016). Les coûts sociétaux comme indicateurs de développement durable des chaînes globales de valeur. L'exemple de la filière cacao en Côte d'Ivoire et au Pérou. *RIODD 2016*. Présenté à Saint-Étienne, France. Consulté à l'adresse https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01349957

Allwood, J. M. (2014). Squaring the Circular Economy : The Role of Recycling within a Hierarchy of Material Management Strategies. In *Handbook of Recycling* (Vol. 30, p. 445-477). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00030-1

Alonso, E., Sherman, A. M., Wallington, T. J., Everson, M. P., Field, F. R., Roth, R., & Kirchain, R. E. (2012). Evaluating Rare Earth Element Availability : A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies. *Environmental Science & Technology*, *46*(6), 3406-3414. https://doi.org/10.1021/es203518d

Alsamawi, A., Murray, J., Lenzen, M., & Reyes, R. C. (2017). Trade in occupational safety and health : Tracing the embodied human and economic harm in labour along the global supply chain. *Journal of Cleaner Production*, *147*, 187-196. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.110

Althaus, H.-J., Hischier, R., Osses, M., Primas, A., Hellweg, S., Jungbluth, N., & Chudacoff, M. (2007). *Life Cycle Inventories of Chemicals Data v2.0* (N° ecoinvent report No. 8). Dübendorf, CH: Ecoinvent Centre, ETh Zurich.

Amable, B. (2002). *Un survol des théories de la croissance endogène*.

Amemiya, T. (2018). Current state and trend of waste and recycling in Japan. *International Journal of Earth & Environmental Sciences*. Consulté à l'adresse http://www.alliedacademies.org/proceedings/current-state-and-trend-of-waste-and-recycling-in-japan-1549.html

Analysis : South Africa's mining crisis may lead to more unrest. (2012, septembre 5). *Reuters*. Consulté à l'adresse https://www.reuters.com/article/us-safrica-mining-contagion/analysis-south-africas-mining-crisis-may-lead-to-more-unrest-idUSBRE8840QU20120905

Anderson, T. L., & Huggins, L. E. (2003). The Property Rights Path to Sustainable Development. *The Legacy of Milton and Rose Friedman's Free to Choose: Economic Liberalism at the Turn of the 21st CenturyThe Legacy of Milton and Rose Friedman's Free to Choose: Economic Liberalism at the Turn of the 21st Century*. Présenté à Free to choose, Dallas.

Anker, R. (2006). Living wages around the world : A new methodology and internationally comparable estimates. *International Labour Review*, *145*(4), 309-338. https://doi.org/10.1111/j.1564-913X.2006.tb00037.x

Anker, R., & Anker, M. (2017). *Living wages around the world : Manual for measurement*. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing.

Arbogast, B. F., Knepper, D. H., Langer, Jr. W. H., Cappa, J. A., Keller, J. W., Widmann, B. L., … Dersch, J. S. (2011). *Development of industrial minerals in Colorado* (Geological Survey (U.S.) & Colorado Geological Survey, Éd.). Reston, Va: U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey.

Argall, G. O. J. (1980). THREE IRON ORE BODIES OF BAYAN OBO. *World Mining*, *33*, 38-41.

Arndt, N., Ganino, C., & Allègre, C. (2010). *Ressources minérales : Cours et exercices corrigés. Préface Claude Allègre*. Dunod.

Arndt, N., Kesler, S., & Ganino, C. (2015). Chapter 2. Classification, Distribution and Uses of Ores and Ore Deposits. In *Metals and Society an Introduction to Economic Geology*.

Arshi, P. S., Vahidi, E., & Zhao, F. (2018). Behind the Scenes of Clean Energy : The Environmental Footprint of Rare Earth Products. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *6*(3), 3311-3320. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03484

Asian Metal. (2012, novembre 9). Asian Metal visits Baotou Steel Rare Earth International Trade Co., Ltd, Baotou Steel Rare Earth Magnetic Material Co., Ltd and Baotou Research Institute of Rare Earth—Asian Metal. Consulté 26 novembre 2018, à l'adresse http://www.asianmetal.com/cag/2012/visit2012111201en.shtml

ASN. (2009). *Bilan sur la gestion des déchets contenant de la radioactivité naturelle renforcée*. Consulté à l'adresse https://www.asn.fr/content/download/51935/362006/version/1/file/rapport_RNR_juin2009.pdf

Ault, T., Gosen, B. V., Krahn, S., & Croff, A. (2016). Natural Thorium Resources and Recovery : Options and Impacts. *Nuclear Technology*, *194*(2), 136-151. https://doi.org/10.13182/NT15-83

Awasthi, A. K., Zeng, X., & Li, J. (2016). Environmental pollution of electronic waste recycling in India : A critical review. *Environmental Pollution*, *211*, 259-270. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.11.027

Ayres, R. U. (1997). Metals recycling : Economic and environmental implications. *Resources, conservation and recycling*, *21*(3), 145–173.

Ayres, R. U., & Nair, I. (1984). Thermodynamics and economics. *Physics Today*, *37*(11), 62. https://doi.org/10.1063/1.2915973

Bachelet, R. (2014). *L'actualisation, Évaluation financière et rentabilité des projets*. Présenté à Ecole Centrale de Lille. Ecole Centrale de Lille.

Bair, J. (2010). Les cadres d'analyse des chaînes globales. Généalogie et discussion. *Revue française de gestion*, *36*(201), 103-120. https://doi.org/10.3166/rfg.201.103-120

Bair, J., & Palpacuer, F. (2015). CSR beyond the corporation : Contested governance in global value chains. *Global Networks*, *15*(s1), S1-S19. https://doi.org/10.1111/glob.12085

Bairoch, P. (1997). *Victoires et déboires : Histoire économique et sociale du monde du XVI. siècle à nos jours. 1: ...* Paris: Gallimard.

Balomenos, E., Davris, P., Deady, E., Yang, J., Panias, D., Friedrich, B., … Paspaliaris, I. (2017). *The EURARE Project : Development of a Sustainable Exploitation Scheme for Europe's Rare Earth Ore Deposits* [Text]. https://doi.org/info:doi/10.1595/205651317X695172

Banerji, S., & Willoughby, R. (2019). *Addressing the Human Cost of Assam Tea : An agenda for change to respect, protect and fulfil human rights on Assam tea plantations*. https://doi.org/10.21201/2019.4870

Banque mondiale. (2017). *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*. Consulté à l'adresse

http://documents.banquemondiale.org/curated/fr/207371500386458722/pdf/117581-WP-P159838-PUBLIC-ClimateSmartMiningJuly.pdf

Bardi, U. (2015). *Le grand pillage*.

Barnett, H. J., & Morse, C. (1963). *Scarcity and Growth : The Economics of Natural Resource Availability*. Publised for Resources for the Future by Hopkins.

Barnett, H., & Morse, C. (1963). *Scarcity and Growth*. Baltimore: John Hopkins.

Basic. (2018). *Café : La success story qui cache la crise* [Max Havelaar France, Commerce Equitable France, Collectif « Repenser les filières »].

Basic. (2019). *Rémunération des producteurs et transition agroécologique : Quelles contributions du commerce équitable origine France ?* [CEF, Biocoop, Ethiquable, Ecocert, Bio Partenaire]. Consulté à l'adresse https://lebasic.com/wp-content/uploads/2019/01/BASIC-CEOF_Rapport-complet_Diffusion.pdf

Becker, H. S. (2002). *Les ficelles du métier*. Consulté à l'adresse http://socio.ens-lyon.fr/agregation/expcomp/expcomp_fiches_becker_2002.doc

Bednik, A. (2015). *Extractivisme*. Le passager clandestin.

Behrens, A., Giljum, S., Kovanda, J., & Niza, S. (2007). The material basis of the global economy. *Ecological Economics*, *64*(2), 444-453. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.034

Behrens, W. W. (1972). The dynamics of natural resource utilization. *SIMULATION*, *19*(3), 91-99. https://doi.org/10.1177/003754977201900305

Beijing Huacai Zhichuang Technology Co., Ltd. (2016, janvier 21). Baogang Group's tailings pond online monitoring system (in Chinese). *Beijing Huacai Zhichuang Technology Co., Ltd*. Consulté à l'adresse https://web.archive.org/web/20160121022641/http://beijinghuace.com/modetail.aspx?PID=200&classid=80

Benito, G., Benito-Calvo, A., Gallart, F., Martín-Vide, J. P., Regües, D., & Bladé, E. (2001). Hydrological and geomorphological criteria to evaluate the dispersion risk of waste sludge

generated by the Aznalcollar mine spill (SW Spain). *Environmental Geology*, *40*(4), 417-428. https://doi.org/10.1007/s002540000230

Bérard, P., Le Guen, B., Perrin, M. L., Gaillard-Lecanu, E., Chambrette, V., & Brenot, J. (2001). *Thorium 232 et ses descendants à l'équilibre aspects sanitaires* (p. 7). IPSN, Département de Protection de la santé de l'Homme et de Dosimétrie.

Berger, S. (2012). Chapitre 5 : The discourse on social costs : Kapp's 'impossibility thesis' vs. Neoliberalism. In *Social costs today : Institutional analyses of the present crises*. London ; New York: Routledge.

Berger, S. (2017). *The Social Costs of Neoliberalism—Essays on the Economics of K. William Kapp*. Consulté à l'adresse https://www.spokesmanbooks.com/acatalog/Economics.html

Berger, Sebastian. (2008a). Circular Cumulative Causation (CCC) à la Myrdal and Kapp—Political Institutionalism for Minimizing Social Costs. *Journal of Economic Issues*, *42*(2), 357-365. https://doi.org/10.1080/00213624.2008.11507144

Berger, Sebastian. (2008b). K. William Kapp's theory of social costs and environmental policy : Towards political ecological economics. *Ecological Economics*, *67*(2), 244-252. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.05.012

Berger, Sebastian, & Forstater, M. (2007). Toward a Political Institutionalist Economics : Kapp's Social Costs, Lowe's Instrumental Analysis, and the European Institutionalist Approach to Environmental Policy. *Journal of Economic Issues*, *41*. https://doi.org/10.1080/00213624.2007.11507043

Bhattacharyya, M. (2015). *Living wage in China, electronics*. Global living wage coalition.

Bihouix, & de Guillebon. (2010). *Quel futur pour les métaux ?* (EDP Sciences). Consulté à l'adresse http://laboutique.edpsciences.fr/produit/397/9782759809462/Quel%20futur%20pour%20les%20metaux%20

Bihouix, P. (2014). *L'Âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*. Paris: Le Seuil.

Bisson. (2007). *Antimoine et ses dérivés* (N° Michel). Ineris.

Bisson, M., & Houeix, N. (2014). *Cadmium et ses dérivés*. Ineris.

Boisvert, V., Caron, A., & Rodary, E. (2012). Privatiser pour conserver ? Petits arrangements de la nouvelle économie des ressources avec la réalité, Privatization for conservation ? The compromises of new resources economics with reality. *Revue Tiers Monde*, (177), 61-83.

Bond, C. J., & Kirsch, P. (2015). Vulnerable populations affected by mining : Predicting and preventing outbreaks of physical violence. *The Extractive Industries and Society*, *2*(3), 552-561. https://doi.org/10.1016/j.exis.2015.06.008

Bo-Ping, H. (2016, août). *China's Rare-earth Permanent Magnet Industry*. Beijing Zhong Ke San Huan High-tech Co. Ltd., présenté à The 8th International Conference on Rare Earth Development and Application & The 3rd China Rare Earth Summit, The Chinese Society of Rare Earths (CSRE), Lanzhou, China. Consulté à l'adresse http://www.cs-re.org.cn/news/notice/a52.html

Borras, S. M., & Franco, J. C. (2012). Global Land Grabbing and Trajectories of Agrarian Change : A Preliminary Analysis. *Journal of Agrarian Change*, *12*(1), 34-59. https://doi.org/10.1111/j.1471-0366.2011.00339.x

Borras, S. M., McMichael, P., & Scoones, I. (2010). The politics of biofuels, land and agrarian change : Editors' introduction. *The Journal of Peasant Studies*, *37*(4), 575-592. https://doi.org/10.1080/03066150.2010.512448

Boulding, K. E. (1966). The economics of the coming spaceship earth. *Environmental Quality Issues in a Growing Economy*. Consulté à l'adresse https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=3PDqBgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT476&dq=%22something+like+a+frontier.+That+is,+there+was+always%22+%22of+the+spherical+earth+and+a+closed+sphere+of%22+%22cylinder,+essentially+a+plane+wrapped+around%22+%22grips+with+the+ultimate+consequences+of+the+transition%22+&ots=IdaDwpMsVj&sig=fuzOzmWKbltZxCp6Sr0sMazZsrQ

Bourg, D., & Papaux, A. (Éd.). (2015). *Dictionnaire de la pensée écologique* (1re éd). Paris: Presses universitaires de France.

Boutillier, S., & Matagne, P. (2016). Une histoire asynchrone de l'économie et de l'écologie, et de leurs « passeurs ». *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Volume 16 Numéro 1). https://doi.org/10.4000/vertigo.17035

Bouwman, A. F., Vuuren, D. P. V., Derwent, R. G., & Posch, M. (2002). A Global Analysis of Acidification and Eutrophication of Terrestrial Ecosystems. *Water, Air, and Soil Pollution*, *141*(1-4), 349-382. https://doi.org/10.1023/A:1021398008726

Bradley, R. L. (2007). Resourceship : An Austrian theory of mineral resources. *The Review of Austrian Economics*, *20*(1), 63-90. https://doi.org/10.1007/s11138-006-0008-7

Bradsher, K. (2010a, avril 21). Molycorp Places Risky Bet on Rare Minerals. *The New York Times*. Consulté à l'adresse http://www.nytimes.com/2010/04/22/business/energy-environment/22rare.html

Bradsher, K. (2010b, décembre 29). In China, Gang-Run Illegal Rare Earth Mines Face a Crackdown. *The New York Times*. Consulté à l'adresse http://www.nytimes.com/2010/12/30/business/global/30smuggle.html

Breton, J.-M. L., Lechevallier, L., Tenaud, P., & Morel, A. (2009, mai 10). Aimants permanents—Matériaux et propriétés [Text]. Consulté 14 janvier 2019, à l'adresse Ref : TIP301WEB - « Conversion de l'énergie électrique » website: https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/materiaux-magnetiques-en-electrotechnique-42259210/aimants-permanents-d2100/

BRGM. (2001). *Traitements et préventions des drainages acides provenant des résidus miniers Revue bibliographique*. Consulté à l'adresse http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-50829-FR.pdf

BRGM. (2015). *Panorama 2014 du marché des Terres Rares*.

Bridge, G. (2008). Global production networks and the extractive sector : Governing resource-based development. *Journal of Economic Geography*, *8*(3), 389–419.

Brignon, J.-M. (2015). *Plomb et principaux composés*. Ineris.

Brown, A. (2003). Critical Realism. In *JE King. The Elgar Companion to Post Keynesian Economics*.

Bruckner, M., Giljum, S., Lutz, C., & Wiebe, K. S. (2012). Materials embodied in international trade – Global material extraction and consumption between 1995 and 2005. *Global Environmental Change*, *22*(3), 568-576. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.03.011

Buchert, D. M. (2011, août). *Rare Earths—A Bottleneck for future Wind Turbine Technologies?*

Burnol, Duro, & Grive. (2006). *Eléments traces métalliques Guide méthodologique Recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines* (N° INERIS-DRC-06-66246/DESP-R01a). Ineris.

Buxton, A. (2013). *Responding to the challenge of artisanal and small-scale mining. How can knowledge networks help?* Consulté à l'adresse IIED website: http://pubs.iied.org/16532IIED/

Capellán-Pérez, I., de Castro, C., & Miguel González, L. J. (2019). Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews*, *26*, 100399. https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399

Capilla, A. V., & Delgado, A. V. (2014). *Thanatia⍰: The Destiny of the Earth's Mineral Resources: A Thermodynamic Cradle-to-Cradle Assessment*. World Scientific.

Castor, S. B., & Hedrick, J. B. (2006). Rare earth elements. *Industrial minerals and rocks*, 769–792.

Castro, M. B. G., Remmerswaal, J. A. M., Reuter, M. A., & Boin, U. J. M. (2004). A thermodynamic approach to the compatibility of materials combinations for recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, *43*(1), 1-19. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2004.04.011

Ceccarelli, T., Bajocco, S., Salvati, L., & Perini, L. (2014). Investigating syndromes of agricultural land degradation through past trajectories and future scenarios. *Soil Science and Plant Nutrition*, *60*(1), 60-70. https://doi.org/10.1080/00380768.2013.843438

CGSP, France Stratégue. (2013). *L'évaluation socioéconomique des investissements publics* (N° Tome 1). Consulté à l'adresse https://www.strategie.gouv.fr/publications/levaluation-socioeconomique-investissements-publics-tome1

Chagnes, A., Cote, G., Ekberg, C., Nilsson, M., & Retegan, T. (2016). *WEEE Recycling: Research, Development, and Policies*. Elsevier.

Chavance, B. (2012). *L'économie institutionnelle*. Paris: La Découverte.

Chen, J., Zhu, X., Liu, G., Chen, W., & Yang, D. (2018). China's rare earth dominance : The myths and the truths from an industrial ecology perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, *132*, 139-140. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.011

Chen, Wenhao, & Holden, N. M. (2018). Bridging environmental and financial cost of dairy production : A case study of Irish agricultural policy. *Science of The Total Environment*, *615*, 597-607. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.310

Chen, Wenjuan, Nie, Z., Wang, Z., Gong, X., Sun, B., Gao, F., & Liu, Y. (2018). Substance flow analysis of neodymium based on the generalized entropy in China. *Resources, Conservation and Recycling*, *133*, 438-443. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.019

Chen, Yao, & Tian. (2016). *Review of ecological restoration technology for mine tailings in China*. *36*(2), 8.

Chervier, C., Millet-Amrani, S., & Méral, P. (2016). Les apports de l'économie institutionnelle à l'analyse des dispositifs de paiements pour services environnementaux : État des lieux et perspectives. *Développement durable et territoires*, (Vol. 7, n°1). https://doi.org/10.4000/developpementdurable.11280

Chesnais, J.-C. (1982). Simon Julian L. —The ultimate resource. *Population*, *37*(2), 437-437.

Chick, V., & Dow, S. (2005). The meaning of open systems. *Journal of Economic Methodology*, *12*(3), 363-381. https://doi.org/10.1080/13501780500223585

China Work Accident Map. (s. d.). Consulté 1 novembre 2016, à l'adresse China Labour Bulletin website: http://maps.clb.org.hk/accidents/en

Chine : Liberté pour les défenseurs des droits des travailleurs et des travailleuses ! (2015, décembre 7). Consulté 7 janvier 2016, à l'adresse Laboursolidarity.org website: http://www.laboursolidarity.org/Chine-liberte-pour-les-defenseurs

Christmann, P. (2015, avril). *The Rare Earth Elements in the European context*. Présenté à « ASTER – REE Systemic analysis – Flows and stocks » A project co-funded by ANR, the French National Research Agency Project closing Conference. Consulté à l'adresse http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Aster_REE/anr_aster_23_04_15_01_rare_earth_elements_in_eu_context_christmann.pdf

Chuanbo, C., & Xingyue, C. (2015). *Living Wage Urban Chengdu, China, Context Provided in Hi-Tech Manufacturing* (N° Report 15; p. 50). Global living wage coalition.

Ciriacy-Wantrup, S. V. (1952). *Resource Conservation, Economics and Policies*. California: University of California Press.

Ciriacy-Wantrup, S. v. (1946). Resource Conservation and Economic Stability. *The Quarterly Journal of Economics*, *60*(3), 412-452. https://doi.org/10.2307/1880680

Citroën. (2018). *CITROËN C-ZERO*. Consulté à l'adresse https://media.citroen.fr/file/53/7/catalogue-C-Zero.pdf.277537.pdf

Clark, A. L., & Zheng, S. (1991). China's Rare Earth Potential, Industry and Policy. *Rare Earth Minerals and Minerals for Electronic Uses*, *70*, 577–602. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.70-72.577

Cleveland, C. J. (1991). Natural resource scarcity and economic growth revisited : Economic and biophysical perspectives. *Ecological Economics: the science and management of sustainability*, 289–317.

Cleveland, C. J., & Kaufmann, R. K. (1991). Forecasting ultimate oil recovery and its rate of production : Incorporating economic forces into the models of M. King Hubbert. *The Energy Journal*, 17–46.

Cleveland, C. J., & Stern, D. I. (1998). Indicators of natural resource scarcity : Review, synthesis, and application to US agriculture. In *Theory and Implementation of Economic Models for Sustainable Development* (p. 113–138). Springer.

Coase, R. H. (1937). The Nature of the Firm. *Economica*, *4*(16), 386-405. https://doi.org/10.1111/j.1468-0335.1937.tb00002.x

Coase, R. H. (1960). The problem of social cost. *The Journal of Law and Economics*, *III*, 79-81. https://doi.org/10.1002/sres.3850090105

Cole, H. S. D., Freeman, C., Jahoda, M., & Pavitt, K. L. (1973). *Thinking about the Future : A Critique of the Limits to Growth*. Consulté à l'adresse http://library.wur.nl/WebQuery/clc/370659

Commons, J. R. (1931). Institutional Economics. *The American Economic Review*, *21*(4), 648-657.

Constantinides, S. (2012). *The demand for rare earth materials in permanent magnets*. Consulté à l'adresse Arnold Magnetic Technologies website: https://magmatllc.com/PDF/Demand%20for%20rare%20earth%20materials%20in%20permanent%20magnets_Constantinides_120409.pdf

Cooper, R. G., & Harrison, A. P. (2009). The exposure to and health effects of antimony. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, *13*(1), 3-10. https://doi.org/10.4103/0019-5278.50716

Costanza, R., & Daly, H. E. (1992). Natural Capital and Sustainable Development. *Conservation Biology*, *6*(1), 37-46.

Costanza, Robert. (1992). *Ecological Economics : The Science and Management of Sustainability*. Columbia University Press.

Costanza, Robert. (1995). *An unbalanced debate. Review of : Scarcity or Abundance: A Debate on the Environment by Norman Myers and Julian Simon*.

Costanza, Robert, d'Arge, R., Groot, R. de, Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., … Belt, M. van den. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, *387*(6630), 253-260. https://doi.org/10.1038/387253a0

Couret Branco, M., & Damaio Henriques, P. (2012). The social costs of water commodification in developing countries. In *Social costs today : Institutional analyses of the present crises*. London ; New York: Routledge.

Court, V., & Fizaine, F. (2017). Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions. *Ecological Economics*, *138*, 145-159. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.03.015

Craig, J., Vaughan, D., & Skinner, B. J. (2001). *Resources of the earth : Origin, use and environmental impact* (3rd éd.). Prentice Hall.

Crocker, T. D. (1999). Chapter 2 : A Short History of Environmental and Resource Economics. In *Handbook of environmental and resource economics* (Bergh, Jeroen C. J. M. van den). Cheltenham, UK ; Northampton, Mass: Edward Elgar Pub.

Custers, R. (2014, octobre 14). Matériaux critiques pour l'industrie européenne. Consulté 25 juillet 2017, à l'adresse Gresea website: http://www.gresea.be/spip.php?page=imprimir_articulo&id_article=1294

da Motta, R. S. (1994). Some comments on depletion and degradation costs in income measurement. *Ecological Economics*, *11*(1), 21-25. https://doi.org/10.1016/0921-8009(94)90046-9

Daido Electronics Co., Ltd. (2016). Corporate profile & history. Consulté 17 février 2019, à l'adresse http://www.daido-electronics.co.jp/english/corporate/history/index.html

Daly, H.E. (1971). Toward a stationary-state economy. In J. Harte & R. Socolow, *Patient Earth* (p. 226-244). New York: Holt, Rinehart and Winston, Inc.

Daly, Herman E. (1990). Toward some operational principles of sustainable development. *Ecological Economics*, *2*(1), 1-6. https://doi.org/10.1016/0921-8009(90)90010-R

Daly, Herman E. (1997). Georgescu-Roegen versus Solow/Stiglitz. *Ecological Economics*, *22*(3), 261-266. https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00080-3

Damian, M. (2012). *Repenser l'économie du changement climatique*. 40.

DANINO-PERRAUD. (2018). *Face au défi des métaux critiques, une approche stratégique du recyclage s'impose* [Édito Énergie]. Consulté à l'adresse IFRI website: https://www.ifri.org/fr/publications/editoriaux-de-lifri/edito-energie/face-defi-metaux-critiques-une-approche-strategique

Dasgupta, P., & Heal, G. (1974). The optimal depletion of exhaustible resources. *The review of economic studies*, *41*, 3–28.

Dasgupta, S., & Mitra, T. (1983). Intergenerational Equity and Efficient Allocation of Exhaustible Resources. *International Economic Review*, *24*(1), 133-153. https://doi.org/10.2307/2526119

De Bruille, V. (2014). *Impact de l'utilisation des ressources minérales et métalliques dans un contexte cycle de vie⊠: Une approche fonctionnelle* (Phd, École Polytechnique de Montréal). Consulté à l'adresse https://publications.polymtl.ca/1591/

de Koning, A., Kleijn, R., Huppes, G., Sprecher, B., van Engelen, G., & Tukker, A. (2018). Metal supply constraints for a low-carbon economy? *Resources, Conservation and Recycling*, *129*, 202-208. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.040

Deaton, B. J., & Niman, E. (2012). An empirical examination of the relationship between mining employment and poverty in the Appalachian region. *Applied Economics*, *44*(3), 303-312. https://doi.org/10.1080/00036846.2010.505558

DeGregori, T. R. (1987). Resources are not; they become : An institutional theory. *Journal of economic issues*, *21*(3), 1241–1263.

Delamarche, M. (2017). La Chine importatrice nette de terres rares d'ici 2025—L'Usine Matières premières. *L'Usine Nouvelle*. Consulté à l'adresse https://www.usinenouvelle.com/article/la-chine-importatrice-nette-de-terres-rares-d-ici-2025.N483039

Delgado, A. Valero. (2008). Assessing world mineral deposits through the second law of thermodynamics. *Inproceedings of the Mineral Deposit Studies Group (MDSG) conference*. Présenté à Nottingham (UK). Nottingham (UK).

Delgado, Alicia Valero. (2008). *Exergy evolution of the mineral capital on Earth* (University of Zaragoza, Spain). Consulté à l'adresse http://teide.cps.unizar.es:8080/pub/publicir.nsf/codigospub/0530/$FILE/cp0530eng.pdf

Deloitte, BGS, BRGM, & TNO. (2017). *Study on the review of the list of critical raw materials: Criticality Assessments* [Website]. Consulté à l'adresse Commission européenne website: https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en

Desaulty, A.-M., Telouk, P., Albalat, E., & Albarède, F. (2011). Isotopic Ag–Cu–Pb record of silver circulation through 16th–18th century Spain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(22), 9002-9007. https://doi.org/10.1073/pnas.1018210108

Ding, H., He, M., & Deng, C. (2014). Lifecycle approach to assessing environmental friendly product project with internalizing environmental externality. *Journal of Cleaner Production*, *66*, 128-138. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.018

Ding, Y., Wang, J., Wang, G., & Xue, Q. (2012). Innovative Methodology for Separating of Rare Earth and Iron from Bayan Obo Complex Iron Ore. *ISIJ International*, *52*(10), 1772-1777. https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1772

Dixit, A., Hammond, P., & Hoel, M. (1980). On Hartwick's Rule for Regular Maximin Paths of Capital Accumulation and Resource Depletion. *The Review of Economic Studies*, *47*(3), 551-556. https://doi.org/10.2307/2297306

Dodd, J. (2018, novembre 30). Rethinking the use of rare-earth elements [Wind Power Monthly]. Consulté 28 février 2019, à l'adresse https://www.windpowermonthly.com/article/1519221

Donoghue, A. M. (2001). The design of hazard risk assessment matrices for ranking occupational health risks and their application in mining and minerals processing. *Occupational Medicine*, *51*(2), 118-123. https://doi.org/10.1093/occmed/51.2.118

Downing, T. E. (2002). *Avoiding New Poverty: Mining-Induced Displacement and Resettlement* (p. 29). International Institute for Environment and Development.

Dragović, R., Gajić, B., Dragović, S., Đorđević, M., Đorđević, M., Mihailović, N., & Onjia, A. (2014). Assessment of the impact of geographical factors on the spatial distribution of heavy metals in soils around the steel production facility in Smederevo (Serbia). *Journal of Cleaner Production*, *84*, 550-562. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.060

Drew, L. J., Qingrun, M., & Weijun, S. (1990). The Bayan Obo iron-rare-earth-niobium deposits, Inner Mongolia, China. *Lithos*, *26*(1), 43-65. https://doi.org/10.1016/0024-4937(90)90040-8

Driscoll, T., Steenland, K., Imel Nelson, D., & Leigh, J. (2004). *Occupational airborne particulates* (N° 7). Geneva: World Health Organization.

Dutta, T., Kim, K.-H., Uchimiya, M., Kwon, E. E., Jeon, B.-H., Deep, A., & Yun, S.-T. (2016). Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. *Environmental Research*, *150*, 182-190. https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.05.052

Ekins, P., Hughes, N., Brigenzu, S., Arden Clark, C., Fischer-Kowalski, M., Graedel, T., … Havlik, P. (2017). *Resource Efficiency : Potential and Economic Implications*. United Nations Environment Programme (UNEP) ; International Resource Panel (IRP).

Employment and Wages. (2015, août 4). Consulté 12 septembre 2018, à l'adresse China Labour Bulletin website: https://www.clb.org.hk/content/employment-and-wages

Engineering, N. A. of. (1989). *Technology and Environment*. National Academies Press.

Environmental Law Alliance Worldwide. (2010). *Guide pour l'évaluation des EIE de projets miniers*. Consulté à l'adresse http://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Full%20French%20Guidebook.pdf

Ericson, B., Caravanos, J., Chatham-Stephens, K., Landrigan, P., & Fuller, R. (2013). Approaches to systematic assessment of environmental exposures posed at hazardous waste sites in the developing world : The Toxic Sites Identification Program. *Environmental Monitoring and Assessment*, *185*(2), 1755-1766. https://doi.org/10.1007/s10661-012-2665-2

Eriksson, T., & Olsson, D. (2011). *The Product Chains of Rare Earth Elements Used in Permanent Magnets and NiMH Batteries for Electric Vehicles*. Consulté à l'adresse http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/142592.pdf

Erreygers, G. (2009). Hotelling, Rawls, Solow : How Exhaustible Resources Came to Be Integrated into the Neoclassical Growth Model. *History of Political Economy*, *41*(Suppl 1), 263-281. https://doi.org/10.1215/00182702-2009-027

Ethnic Mongolian Family on Hunger Strike in Protest Over China's Rights Abuses. (2015, décembre 10). Consulté 4 janvier 2016, à l'adresse Radio Free Asia website: http://www.rfa.org/english/news/china/strike-12102015142129.html

Ethnic Mongolians Protest Loss of Traditional Grazing Lands Outside Banner Government. (2016, février 24). Consulté 7 avril 2016, à l'adresse Radio Free Asia website: http://www.rfa.org/english/news/china/grazing-02242016111127.html?searchterm:utf8:ustring=mining

EUROSTAT. (2013). *Economy-wide Material Flow Accounts (EW-MFA) Compilation Guide*. Consulté à l'adresse http://mfa-tools.net/publication/164

FAO. (2005). *L'approche filière, analyse fonctionnelle et identification des flux*. Consulté à l'adresse http://www.fao.org/docs/up/easypol/376/cca_analyfonct_flux_043FR.pdf

FAO. (2015). *Natural Capital Impacts in Agriculture*.

Faujas, A. (2011, janvier 13). *Jean-Pierre Clamadieu : « La crise des terres rares démontre l'importance de l'accès aux matières premières »*. Consulté à l'adresse https://www.lemonde.fr/a-la-une/article/2011/01/13/jean-pierre-clamadieu-la-crise-des-terres-rares-demontre-l-importance-de-l-acces-aux-matieres-premieres_1465108_3208.html

Fernandez. (2017). Rare-earth elements market : A historical and financial perspective. *Resources Policy*, *53*, 26-45. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.010

Ferrari, S., & Mery, J. (2009). Equité intergénérationnelle et préoccupations environnementales. Réflexions autour de l'actualisation, Abstract. *Management & Avenir*, (20), 240-257.

Ferron, C. J., & Henry, P. (2015). A review of the recycling of rare earth metals. *Canadian Metallurgical Quarterly*, *54*(4), 388-394. https://doi.org/10.1179/1879139515Y.0000000023

Feuardant, P. (2016). *La stratégie des éléments au Japon⊠: Principaux acteurs et projets*. Tokyo: Ambassade de France au Japon, service pour la science et la technologie.

Findeiß, M., & Schäffer, A. (2017). Fate and Environmental Impact of Thorium Residues During Rare Earth Processing. *Journal of Sustainable Metallurgy*, *3*(1), 179-189. https://doi.org/10.1007/s40831-016-0083-3

Fischer-Kowalski, M., Krausmann, F., Giljum, S., Lutter, S., Mayer, A., Bringezu, S., … Weisz, H. (2011). Methodology and Indicators of Economy-wide Material Flow Accounting : State of the Art and Reliability Across Sources. *Journal of Industrial Ecology*, *15*(6), 855-876. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00366.x

Fischer-Kowalski, Marina. (1997). Society's metabolism : On the childhood and adolescence of a rising conceptual star. *The international handbook of environmental sociology*, 119–137.

Fisher, A. (1979). *Measures of Natural Resource Scarcity* (V. K. Smith, Éd.). Baltimore: John Hopkins University Press for Resources for the Future.

Fishman, E., & Cherry, C. (2016). E-bikes in the Mainstream : Reviewing a Decade of Research. *Transport Reviews*, *36*(1), 72-91. https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1069907

Fizaine, F. (2014). *Analyses de la disponibilité économique des métaux rares dans le cadre de la transition énergétique* (Dijon). Consulté à l'adresse http://www.theses.fr/2014DIJOE004

Fizaine, F., & others. (2015). *Estimations of very long-term time series of global energy return-on-investment (EROI) of coal, oil and gas productions*. Consulté à l'adresse https://ideas.repec.org/p/cec/wpaper/1510.html

FMI. (2017). *Tackling inequality*. Washington, DC: International Monetary Fund.

Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Hischier, R., Doka, G., Bauer, C., … Loerincik, Y. (2007). *Implementation of life cycle impact assessment methods. Data v2.0 (2007). Ecoinvent report No. 3* (N° INIS-CH--10091). Consulté à l'adresse Ecoinvent Centre, ESU-services Ltd, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Doka Life Cycle Assessments (LCA), Paul Scherrer Institute (PSI), Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ), Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Taenikon (ART), Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ), Ecointesys, Swiss Federal Office of Environment (FOEN), Swiss Federal Office of Energy (SFOE), Swiss Federal Office of Agriculture (BLW) website: http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:41028089

Gadrey, J., & Lalucq, A. (2015). *Faut-il donner un prix à la nature?* Paris: Petits matins [u.a.].

Gao, P., Han, Y. X., Li, Y. J., & Ma, W. Y. (2010). Fundamental Research in Comprehensive Utilization of Bayan Obo Ore by Direct Reduction. *Advanced Materials Research*, *92*. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.92.111

Gao, Y., Ma, M., Yang, T., Chen, W., & Yang, T. (2018). Global atmospheric sulfur deposition and associated impaction on nitrogen cycling in ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, *195*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.166

Gardner, M. (2012). The real price of rare earths. *Rural 21*. Consulté à l'adresse http://www.rural21.com/english/news/detail/article/the-real-price-of-rare-earths-0000296/

Garnier-Laplace, Colle, & Morello. (2010). *Uranium naturel et environnement* (p. 22). IRSN.

Gellert, P. K. (2015). Palm Oil Expansion in Indonesia : Land Grabbing as Accumulation by Dispossession. In *Current Perspectives in Social Theory*: *Vol. 34*. *States and Citizens: Accommodation, Facilitation and Resistance to Globalization* (Vol. 34, p. 65-99). https://doi.org/10.1108/S0278-120420150000034004

Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge Massachussets, London England: Harvard University Press.

Georgescu-Roegen, Nicholas. (1979). Comments on the papers by Daly and Stiglitz. *Scarcity and growth reconsidered*, 95–105.

Gérand, Y., Dubosc, A., & Pochat, S. L. (2018). *Modélisation des externalités environnementales pour une TVA circulaire (MODEXT)* (N° Rapport Final; p. 98). Ademe, Evea, Fondation 2019.

Gereffi, G. (1995). Global production systems and third world development. In B. Stallings (Éd.), *Global change, regional response* (p. 100-142). https://doi.org/10.1017/CBO9781139174336.004

Gereffi, G., & Fernandez-Stark, K. (2016). *Global Value Chain Analysis: A Primer* (N° 2nd Edition). Consulté à l'adresse Center on Globalization, Governance & Competitiveness, Duke University website: https://globalvaluechains.org/publication/global-value-chain-analysis-primer-2nd-edition

Gereffi, G., Humphrey, J., Kaplinsky, R., & Sturgeon*, T. J. (2001). Introduction : Globalisation, Value Chains and Development. *IDS Bulletin*, *32*(3), 1-8. https://doi.org/10.1111/j.1759-5436.2001.mp32003001.x

Gereffi, G., Humphrey, J., & Sturgeon, T. (2005). The governance of global value chains. *Review of International Political Economy*, *12*(1), 78-104. https://doi.org/10.1080/09692290500049805

Gereffi, G., & Korzeniewicz, M. (1994). *Commodity Chains and Global Capitalism*. ABC-CLIO.

Gibbs, H. K., & Salmon, J. M. (2015). Mapping the world's degraded lands. *Applied Geography*, *57*, 12-21. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.024

Giljum, S., Dittrich, M., Lieber, M., Lutter, S., Giljum, S., Dittrich, M., … Lutter, S. (2014). Global Patterns of Material Flows and their Socio-Economic and Environmental Implications : A MFA Study on All Countries World-Wide from 1980 to 2009. *Resources*, *3*(1), 319-339. https://doi.org/10.3390/resources3010319

Giurco, D., McLellan, B., Franks, D. M., Nansai, K., & Prior, T. (2014). Responsible mineral and energy futures : Views at the nexus. *Journal of Cleaner Production*, *84*, 322-338. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.102

Glachant, J.-M. (2002). L'approche néo-institutionnelle de la réforme des industries de réseaux. *Revue economique*, *Vol. 53*(3), 425-435.

Global, regional, and national age-sex specific all-cause and cause-specific mortality for 240 causes of death, 1990-2013 : A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. (2015). *Lancet*, *385*(9963), 117-171. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)61682-2

Godard, O., & Sachs, I. (1978). Environnement et développement : De l'externalité à l'intégration contextuelle. *Mondes en développement*, *24*, 788–814.

Goldyn, S. R., Condos, R., & Rom, W. N. (2008). The Burden of Exposure–Related Diffuse Lung Disease. *Seminars in respiratory and critical care medicine*, *29*(6), 591-602. https://doi.org/10.1055/s-0028-1101269

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*, 52-59. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.03.004

Gómez-Baggethun, E., de Groot, R., Lomas, P. L., & Montes, C. (2010). The history of ecosystem services in economic theory and practice : From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*, *69*(6), 1209-1218. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.007

Gómez-Baggethun, E., & Ruiz-Pérez, M. (2011). Economic valuation and the commodification of ecosystem services. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, *35*(5), 613-628. https://doi.org/10.1177/0309133311421708

Gouzy, A., & Ducos, G. (2008). *La connaissance des éléments traces métalliques : Un défi pour la gestion de l'environnement*. Ineris.

Graedel, T. E. (2010). *Metal stocks in society : Scientific synthesis*. Nairobi: United Nations Environment Programme (UNEP) ; International Resource Panel (IRP).

Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., … Sonnemann, G. (2011). What Do We Know About Metal Recycling Rates? *Journal of Industrial Ecology*, *15*(3), 355-366. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x

Graedel, T. E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B. K., … Working Group on the Global Metal Flows. (2011). *Recycling rates of metals : A status report*. Consulté à l'adresse http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf

Greffe, X. (1978). Les ambiguïtés du concept d'externalité. *Mondes en développement*, *23*, 563-569.

Grosse, F. (2010). Le découplage croissance / matières premières. De l'économie circulaire à l'économie de la fonctionnalité : Vertus et limites du recyclage. *Futuribles*, (365), 99-124.

Grosse, F. (2011). Quasi-Circular Growth : A Pragmatic Approach to Sustainability for Non-Renewable Material Resources. *S.A.P.I.EN.S. Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*, (4.2). Consulté à l'adresse http://journals.openedition.org/sapiens/1242

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1993). *Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement in The US-Mexico Free Trade Agreement P. Garber, ed*. Cambridge, MA: MIT Press.

Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The quarterly journal of economics*, *110*(2), 353–377.

Gudynas, E. (2013). Extracciones, extractivismos y extrahecciones, un marco conceptual sobre la apropiacion de recursos, naturales. *El Observatorio del Desarrollo*, (n° 18).

Guo, W. (2012, juillet 3). The rare earth development can no longer overdraw ecological cost (in Chinese). *China Environment News*. Consulté à l'adresse http://www.cfej.net/Item/Show.asp?m=1&d=23281

Gupta, C. K., & Krishnamurthy, N. (2005). *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. CRC Press.

Guyonnet, D., Planchon, M., Rollat, A., Escalon, V., Tuduri, J., Charles, N., … Fargier, H. (2015). Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe. *Journal of Cleaner Production*. Consulté à l'adresse http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615004989

Hämäläinen, P., Takala, J., & Boon Kiat, T. (2017). *Global Estimates of Occupational Accidents and Work-related Illnesses 2017*. https://doi.org/10.13140/2.1.2864.0647

Hartwick, J. M. (1977). Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources. *The american economic review*, *67*(5), 972–974.

Hartwick, J. M. (1978). Substitution Among Exhaustible Resources and Intergenerational Equity. *The Review of Economic Studies*, *45*(2), 347-354. https://doi.org/10.2307/2297349

Hatayama, H., & Tahara, K. (2014). Criticality Assessment of Metals for Japan's Resource Strategy. *MATERIALS TRANSACTIONS*, *56*(2), 229-235. https://doi.org/10.2320/matertrans.M2014380

Haynes, W. M. (2016). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press.

Helmer, M. (1956). Potosí, un chapitre inédit de l'histoire d'Amérique (A propos d'une publication récente). *Bulletin hispanique*, *58*(3), 344-352. https://doi.org/10.3406/hispa.1956.3493

Henckens, M. L. C. M., Driessen, P. P. J., & Worrell, E. (2014). Metal scarcity and sustainability, analyzing the necessity to reduce the extraction of scarce metals. *Resources, Conservation and Recycling*, *93*, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.09.012

Hertwich, E., de Larderel, J. A., Arvesen, A., Bayer, P., Bergesen, J., Bouman, E., … Purohit, P. (2016). *Green Energy Choices: The benefits, risks, and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production*.

Hetzel, P., & Bataille, D. (2016). *LES ENJEUX STRATÉGIQUES DES TERRES RARES ET DES MATIÈRES PREMIÈRES STRATÉGIQUES ET CRITIQUES* (N° TOME I). Consulté à l'adresse OPECST website: http://www2.assemblee-

nationale.fr/content/download/43587/412998/version/1/file/rap+terres+rares+Tome+1.pdf

Hicks, J. (1974). Capital controversies : Ancient and modern. *The American economic review*, *64*(2), 307–316.

Hitachi Metals, Ltd. (2015). *Hitachi Metals Signs Letter of Intent to Establish Joint Venturewith Magnet Manufacturer in China; Aims to Develop Production of Neodymium-Iron-Boron Magnetsin China and Expand Business Scale*.

Hitachi sacks worker activist who lobbied for trade union. (2014, janvier 24). Consulté 7 janvier 2016, à l'adresse China Labour Bulletin website: http://www.clb.org.hk/en/content/hitachi-sacks-worker-activist-who-lobbied-trade-union

Hocquard, C., & Lefebvre, G. (2015). *Suivi des marchés des métaux*. Consulté à l'adresse BRGM website: http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/tableau_1_suivi_des_marches_des_metaux_0.pdf

Hoel, M., & Kverndokk, S. (1996). Depletion of fossil fuels and the impacts of global warming. *Resource and Energy Economics*, *18*(2), 115-136. https://doi.org/10.1016/0928-7655(96)00005-X

Hoel, M., & Sterner, T. (2007). Discounting and relative prices. *Climatic Change*, *84*(3-4), 265-280. https://doi.org/10.1007/s10584-007-9255-2

Hopkins, T. K., & Wallerstein, I. (1986). Commodity Chains in the World-Economy Prior to 1800. *Review (Fernand Braudel Center)*, *10*(1), 157-170.

Hotelling, H. (1931). The economics of exhaustible resources. *Journal of Political Economy*.

Hou, Z., Tian, S., Xie, Y., Yang, Z., Yuan, Z., Yin, S., … Li, X. (2009). The Himalayan Mianning–Dechang REE belt associated with carbonatite–alkaline complexes, eastern Indo-Asian collision zone, SW China. *Ore Geology Reviews*, *36*(1–3), 65-89. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2009.03.001

Hubbert, M. K. (1956). *Nuclear Energy and the fossil fuels* (N° Publicaton No. 95). Shell develpment Company. Exploration and Production Research Division.

Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., … van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016 : A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *22*(2), 138-147. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y

Hurst, C. (2010). *China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn?* Consulté à l'adresse Institute for the Analysis of Global Security (IAGS) website: http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA525378

Hurst, C. (2011). Japan's approach to China's control of Rare Earth Elements. *China Brief*, *11*(7). Consulté à l'adresse http://fmso.leavenworth.army.mil/documents/Japan's-approach.pdf

IAEA. (2013a). Naturally occurring radioactive material (NORM VII). *Proceedings of an International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material*. Présenté à Beijing, China. Beijing, China: China Institute of Atomic Energy and the Nuclear and Radiation Safety Centre, Ministry of Environmental Protection, China, in cooperation with the International Atomic Energy Agency, hosted by the China Atomic Energy Authority and the National Nuclear Safety Administration, China.

IAEA. (2013b). *Radiation Protection and Management of Norm Residues in the Phosphate Industry* (N° Safety Reports Series No78). Consulté à l'adresse https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1582_web.pdf

IndexMundi. (2019). Iron Ore—Monthly Price—Commodity Prices—Price Charts, Data, and News -. Consulté 26 septembre 2019, à l'adresse https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=iron-ore&months=120

Information Office of the State Council The People's Republic of China. (2012). *Official China MIIT White Paper on Rare Earths*. Consulté à l'adresse

http://www.rareearthassociation.org/Official%20China%20MIIT%20White%20Paper%20on%20Rare%20Earths%20-%20English.pdf

INRS. (2000). *Trioxyde de diantimoine, fiche toxicologique n°198*. Consulté à l'adresse http://www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_198-1/FicheTox_198.pdf

International Lead Association. (2012). Lead Production & Statistics. Consulté 1 octobre 2018, à l'adresse https://www.ila-lead.org/lead-facts/lead-production--statistics

Inventaire général du patrimoine culturel de la Région Poitou-Charentes. (1996). *Le patrimoine industriel de Poitou-Charentes—Dossier documentaire d'usine*. Consulté à l'adresse http://dossiers.inventaire.poitou-charentes.fr/le-patrimoine-industriel/notice.php?id=IA17000238

IPBES. (2019). *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Consulté à l'adresse https://www.ipbes.net/system/tdf/ipbes_7_10_add.1_en_1.pdf?file=1&type=node&id=35329

IPCC. (2019). *IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems* [Summary for Policymakers].

IRSN. (1998). Les radionucléides d'origine naturelle. Consulté 23 août 2018, à l'adresse https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Environnement/radioactivite-environnement/sources-radioactivite/Pages/2-radionucleides-origine-naturelle.aspx

Isaac, H. (2002). Leçon 6 : Notions de coûts en économie. In *Université Dauphine*. *Module Economie Managériale* (AUNEGE (Association des Universités pour le développement de l'enseignement numérique en Economie et Gestion)). Consulté à l'adresse http://ressources.aunege.fr/nuxeo/site/esupversions/94ffe495-a9f7-40d2-a009-c0b525314ca0/Lecon6/polycopies6/L6.pdf

Itani, K. (2017). *Récupération d'énergie pour système intégré moteur roue, application au véhicule électrique* (Thesis, Paris Saclay). Consulté à l'adresse http://www.theses.fr/2017SACLN025

Jackson, T. (2009). *Prosperity without growth : Economics for a finite planet*. London ; Sterling, VA: Earthscan.

Jamasmie, C. (2015, août 26). Molycorp shuts down Mountain Pass rare earth plant. *MINING.com*. Consulté à l'adresse http://www.mining.com/molycorp-shuts-down-mountain-pass-rare-earth-plant/

Jennings, S. R., Blicker, P. S., & Neuman, D. R. (2008). *Acid Mine Drainage and Effects on Fish Health and Ecology : A Review*. Reclamation Research Group Publication, LLC, Bozeman, Montana.

Jevons, W. S. (1865). *The Coal Question* (1st éd.). Consulté à l'adresse http://www.dli.ernet.in/handle/2015/224624

Jevons, W. S. (1906). *The coal question. An enquiry concerning the progress of the nation, and the probable exhaustion of our coal-mines.* (3rd (Original work published 1865)). Londres: Macmillan And Co.

Jevons, William Stanley. (1866). *The coal question* (2nd éd.). Consulté à l'adresse http://hdl.handle.net/2027/nyp.33433090920061

Jewell, S., & Kimball, S. M. (2008). *Mineral Commodity Summaries 2008*. USGS.

Jewell, S., & Kimball, S. M. (2012). *Mineral Commodity Summaries 2012*. Consulté à l'adresse USGS website: https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=DxN_acZGETQC&oi=fnd&pg=PA7&dq=%22Volume+II,+Area+Reports,+Domestic%3B+and+Volume+III,+Area+Reports,%22+%22estimates+covering+nonfuel+mineral+industry+data.+Data+sheets+contain+information+on+the+domestic%22+%22on+production,+distribution,+stocks,+and+consumption+of+significant+mineral+commodities.&ots=clq1OsOJcU&sig=y72sLL76AnnaNazJiKrSKm5htDw

Jewell, S., & Kimball, S. M. (2015). *Mineral commodity summaries 2015*. USGS.

Jewell, S., & Kimball, S. M. (2017). *Mineral Commodity Summaries 2017* (p. 202). USGS.

Jingci Material Science Co.,Ltd. (2019). Jingci Material Science Co.,Ltd. Consulté 25 janvier 2019, à l'adresse http://www.bjmt.com.cn/en/index.php?m=content&id=348

Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+ : A new life cycle assessment methodology. Int J Life Cycle Assess 8:324-330. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *8*, 324-330. https://doi.org/10.1007/BF02978505

Jolliet, O., Müller-Wenk, R., Bare, J., Brent, A., Goedkoop, M., Heijungs, R., … Weidema, B. (2004). The LCIA midpoint-damage framework of the UNEP/SETAC life cycle initiative. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *9*(6), 394. https://doi.org/10.1007/BF02979083

Jones, T. (2017). *In Debt and In The Dark⍰: Unpacking the Economics of DRC's Proposed Inga 3 Dam*. Consulté à l'adresse International Rivers website: https://www.internationalrivers.org/resources/in-debt-and-in-the-dark-unpacking-the-economics-of-drc%E2%80%99s-proposed-inga-3-dam-16497

Jordens, A., Cheng, Y. P., & Waters, K. E. (2013). A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. *Minerals Engineering*, *41*, 97-114. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.10.017

Kahn, H., Brown, W., & Martel, L. (1976). *Next 200 years⍰: A scenario for America and the world*. Consulté à l'adresse https://www.osti.gov/biblio/7212579

Kaldellis, J. K., & Kapsali, M. (2013). Shifting towards offshore wind energy—Recent activity and future development. *Energy Policy*, *53*, 136-148. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.032

Kallis, G., Gómez-Baggethun, E., & Zografos, C. (2013). To value or not to value? That is not the question. *Ecological Economics*, *94*, 97-105. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.07.002

Kaplinsky, R., & Morris, M. (2001). *A handbook for value chain research* (Vol. 113). Consulté à l'adresse http://www.prism.uct.ac.za/Papers/VchNov01.pdf

Kapp, K. W., Sachs, I., Richard, J., & Bronstein-Vinaver, B. (2015). *Les coûts sociaux de l'entreprise privée*. Paris: les Petits matins : Institut Veben.

Kapp, W. (1963). *Les coûts sociaux de l'entreprise privée* (2015e éd.). Les Petits Matins.

Karam, P. A., & Vetter, B. J. (Éd.). (2009). *Naturally occurring radioactive materials (NORM) and technologically enhanced NORM (TENORM)* (Health Physics Society Professional Development School). Madison, Wis.: Medical Physics Pub.

Kemp, D. J., & Wiseman, M. (2004). The implications of sustainability in developing a nickel laterite project. *International Laterite Nickel Symposium 2004 (as held during the 2004 TMS Annual Meeting)*, 45–53.

Kendrick, J. W. (1961). *Productivity Trends in the United States*. Princeton University Press.

Kert, C., & Birraux, C. (2011). *LES ENJEUX DES METAUX STRATEGIQUES : LE CAS DES TERRES RARES*. OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION DES CHOIX SCIENTIFIQ UES ET TECHNOLOGIQUES.

Kim, H., G. Eggert, R., W. Carlsen, B., & W. Dixon, B. (2016). Potential uranium supply from phosphoric acid : A U.S. analysis comparing solvent extraction and Ion exchange recovery. *Resources Policy*, *49*, 222-231. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.06.004

Kingsnorth, D. J. (2013, septembre). *Can China's Rare Earths Dynasty Survive?* Présenté à Curtin Graduate School of Business, Curtin University & Industrial. Consulté à l'adresse http://slideplayer.com/slide/2752604/

Klimont, Z., Smith, S. J., & Cofala, J. (2013). The last decade of global anthropogenic sulfur dioxide : 2000–2011 emissions. *Environmental Research Letters*, *8*(1), 014003. https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014003

Klinglmair, M., Sala, S., & Brandão, M. (2014). Assessing resource depletion in LCA : A review of methods and methodological issues. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *19*(3), 580-592. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0650-9

Koellner, T., de Baan, L., Beck, T., Brandão, M., Civit, B., Margni, M., … Müller-Wenk, R. (2013). UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *18*(6), 1188-1202. https://doi.org/10.1007/s11367-013-0579-z

Koltun, P., & Tharumarajah, A. (2014). Life Cycle Impact of Rare Earth Elements. *International Scholarly Research Notices*, *2014*, e907536. https://doi.org/10.1155/2014/907536

Konrad, K., & Stagl, S. (2018). *Competitiveness of the European automotive manufacturing industry* (p. 104). Berlin: Institute for Innovation and Technology.

Kooroshy, Tiess, Tukker, & Walton. (2015). *Strengthening the European rare earths supply chain : Challenges and policy options*. Consulté à l'adresse ERECON website: http://erean.eu/wordpress/the-final-report-strengthening-of-the-european-rare-earths-supply-chain-challenges-and-policy-options-of-the-european-rare-earths-competency-network-erecon-finally-released/

Krabbe, J. J., & Heijman, W. (2012). *National Income and Nature : Externalities, Growth and Steady State*. Springer Science & Business Media.

Krausmann, & Eisenmenger. (2014). Extraction minière : De l'excès à l'indispensable. *La Revue Durable*, (53). Consulté à l'adresse http://www.larevuedurable.com/fr/ressources-et-equilibres-de-la-terre/975-extraction-miniere-de-l-exces-a-l-indispensable-version-numerique.html

Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H., & Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, *68*(10), 2696-2705. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007

Krausmann, F., Schaffartzik, A., Mayer, A., & Eisenmenger, N. (2014). La société industrielle ne connait aucune dématérialisation depuis le XIXe siècle. *La revue durable*, p.22-24.

Krausmann, F., Schaffartzik, A., Mayer, A., Eisenmenger, N., Gingrich, S., Haberl, H., & Fischer-Kowalski, M. (2016). Long-Term Trends in Global Material and Energy Use. In H. Haberl, M. Fischer-Kowalski, F. Krausmann, & V. Winiwarter (Éd.), *Social Ecology* (p. 199-216). https://doi.org/10.1007/978-3-319-33326-7_8

Kullik, J. (2019). *Below the Radar The strategic significance of rare earths for the economic and military security of the West* (Working Paper N° 13). Consulté à l'adresse Federal Academy for Security Policy website: https://www.baks.bund.de/sites/baks010/files/working_paper_2019_13.pdf

Kumar, V., Abbas, A. K., Aster, J. C., & Robbins, S. L. (Éd.). (2013). *Robbins basic pathology* (9th ed). Philadelphia, PA: Elsevier/Saunders.

La Rocca, B., Houeix, N., & Andres, S. (2010). *Arsenic et ses dérivés inorganiques*. Ineris.

Labbé, J.-F. (2013, octobre). *Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux. La nécessité incoutournable d'un approvisionnement minier primaire en contexte de croissance.* Présenté à conférence EnSciTerre, Observatoire des Sciences de l'Univers en région Centre. Consulté à l'adresse https://www.univ-orleans.fr/sites/default/files/OSUC/documents/conf_ensciterre_labbe.pdf

Labonne, B. (2014). Who is afraid of artisanal and small-scale mining (ASM)? *The Extractive Industries and Society*, *1*(2), 121-123. https://doi.org/10.1016/j.exis.2014.03.002

Laurans, Y., & Mermet, L. (2014). Ecosystem services economic valuation, decision-support system or advocacy? *Ecosystem Services*, *7*, 98-105. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.10.002

Légé, P. (2007, avril). Théorie néoclassique : Les débuts d'une domination. *Alternatives Economiques*, *Hors-série*(n° 073). Consulté à l'adresse https://www.alternatives-economiques.fr/theorie-neoclassique-debuts-dune-domination/00057342

Levallois, C. (2010). Can de-growth be considered a policy option? A historical note on Nicholas Georgescu-Roegen and the Club of Rome. *Ecological Economics*, *69*(11), 2271-2278. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.06.020

Li, J., & Guo, Z. (2014). Innovative Methodology to Enrich Britholite (Ca3Ce2[(Si,P)O4]3F) Phase from Rare-Earth-Rich Slag by Super Gravity. *Metallurgical and Materials Transactions B*, *45*(4), 1272-1280. https://doi.org/10.1007/s11663-014-0071-6

Li, R., Li, Q., Chen, S., Wu, F., Sun, D., & Liao, H. (2014). Distribution of thorium in soils surrounding the rare-earth tailings reservoir in Baotou, China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, *299*(3), 1453-1459. https://doi.org/10.1007/s10967-013-2814-2

Liao, Z., He, W., Liu, H., & Wang, X. (2014). Quality assessment of geological environment of ion-absorbed rare-earth mine in Longnan County. *Nonferrous Metals Science and Engineering*. https://doi.org/10.13264/j.cnki.ysjskx.2014.04.020

Lima, I. B. D., & Filho, W. L. (2015). *Rare Earths Industry: Technological, Economic, and Environmental Implications*. Elsevier.

Lu, J., & Lora-Wainwright, A. (2014). Historicizing Sustainable Livelihoods : A Pathways Approach to Lead Mining in Rural Central China. *World Development*, *62*, 189-200. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.05.006

Lucas, J., Lucas, P., Mercier, T. L., Rollat, A., & Davenport, W. G. (2014). *Rare Earths: Science, Technology, Production and Use*. Elsevier.

Ma, Li, Zhang, Wang, & Li. (2016, août). *Study on improving the recovery of Bayan Obo oxidized low-intensity magnetic separation tailings*. Baotou Research Institute of Rare Earths and State Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization présenté à The 8th International Conference on Rare Earth Development and Application & The 3rd China Rare Earth Summit, The Chinese Society of Rare Earths (CSRE), Lanzhou, China. Consulté à l'adresse http://www.cs-re.org.cn/news/notice/a52.html

Machacek, E., & Fold, N. (2018). Competitors contained? Manufacturer strategies in the global rare earth value chain: Insights from the magnet filament. *The Extractive Industries and Society*, *5*(1), 18-27. https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.12.012

Magnequench. (2010). *PATENT INFORMATION GUIDE*. Consulté à l'adresse http://www.tengam.com/wp-content/uploads/2012/07/MagnequenchPatent.new-20121.pdf

Malthus, T. R. (1798). *An Essay on the Principle of Population*. Methuen and Co., Ltd. 1904. Ed. Edwin Cannan. Library of Economics and Liberty.

Mancheri, N. A., & Marukawa, T. (2016). *Rare Earth Elements: China and Japan in Industry, Trade and Value Chain*. Institute of Social Science, University of Tokyo.

Martinez-Alier, J. (2009). Social Metabolism, Ecological Distribution Conflicts, and Languages of Valuation. *Capitalism Nature Socialism*, *20*(1), 58-87. https://doi.org/10.1080/10455750902727378

Martinez-Alier, J., Kallis, G., Veuthey, S., Walter, M., & Temper, L. (2010). Social Metabolism, Ecological Distribution Conflicts, and Valuation Languages. *Ecological Economics*, *70*(2), 153-158. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.09.024

Martinez-Alier, J., Munda, G., & O'Neill, J. (1998). Weak comparability of values as a foundation for ecological economics. *Ecological economics*, *26*(3), 277–286.

Martinez-Alier, J., & Walter, M. (2016). Social Metabolism and Conflicts over Extractivism. In F. de Castro, B. Hogenboom, & M. Baud (Éd.), *Environmental Governance in Latin America* (p. 58-85). https://doi.org/10.1007/978-1-137-50572-9_3

Masok, F., Masiteng, P., Mavunda, R., & Maleka, P. (2016). Health Effects Due to Radionuclides Content of Solid Minerals within Port of Richards Bay, South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *13*(12), 1180. https://doi.org/10.3390/ijerph13121180

McCloskey, D. N. (1998). Other Things Equal : The So-Called Coase Theorem. *Eastern Economic Journal*, *24*(3), 367-371.

McCormick, J. (2013). *Acid Earth : The Global Threat of Acid Pollution*. Routledge.

Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The Limits to Growth*. Universe Books.

Meadows, D. H., Randers, J., & Meadows, D. L. (2004). *Limits to Growth : The 30-Year Update*. White River Junction, Vt: Chelsea Green Publishing Company.

Memary, R., Giurco, D., Mudd, G., & Mason, L. (2012). Life cycle assessment : A time-series analysis of copper. *Journal of Cleaner Production*, *33*, 97-108. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.025

Mérenne-Schoumaker, B. (2014). *Atlas mondial des matières premières : Des ressources stratégiques* (Autrement).

MIIT. (2019). *Notice of the 12 departments on continuously strengthening the order rectification of the rare earth industry*. Consulté à l'adresse http://www.miit.gov.cn/n1146290/n4388791/c6580135/content.html

Milà i Canals, L., Bauer, C., Depestele, J., Dubreuil, A., Freiermuth Knuchel, R., Gaillard, G., … Rydgren, B. (2007). Key Elements in a Framework for Land Use Impact Assessment Within LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *12*(1), 5-15. https://doi.org/10.1065/lca2006.05.250

Mills-Knapp, Traore, Ericson, Keith, Hanrahan, & Caravanos. (2012). *The World's Worst Pollution Problems : Assessing Health Risks at Hazardous Waste Sites*. Consulté à l'adresse Blacksmith Institute; Green Cross Switzerland website: http://www.worstpolluted.org/files/FileUpload/files/2012%20WorstPolluted.pdf

Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2016, novembre 8). BASOL - site n°62.0030. Consulté 1 octobre 2018, à l'adresse https://basol.developpement-durable.gouv.fr/fiche.php?page=4&index_sp=62.0030

Ministery of environmental protection. (2010, novembre 17). MEP to Seriously Crack down Environmental Infringements of Heavy Metals Pollution. Consulté 27 juillet 2016, à l'adresse http://english.mep.gov.cn/News_service/news_release/201011/t20101122_197778.htm

Miquel, G. (2001). *Rapport d'information n° 261 (2000-2001) sur les effets des métaux lourds sur l'environnement et la santé*. Consulté à l'adresse OPECST website: https://www.senat.fr/rap/l00-261/l00-2611.pdf

Mitchell, W. C. (1941). Conservation, liberty, and economics. *The foundations of conservation education*, 1–12.

Mitsubishi. (2011, novembre 11). 2012 Mitsubishi i-MiEV EV Motor/Transmission. Consulté 6 mars 2019, à l'adresse Mitsubishi Motors website: http://media.mitsubishicars.com/releases/4eed9646-06be-4ff9-bc3c-7ea4ee8d9942

Mock, P. (2015). *European vehicle market statistics, 2015/2016*. Consulté à l'adresse ICCT Europe website: https://www.theicct.org/publications/european-vehicle-market-statistics-20152016

Molycorp. (2011). Molycorp Mountain Pass. Consulté 16 décembre 2015, à l'adresse http://www.molycorp.com/about-us/our-facilities/molycorp-mountain-pass

Molycorp. (2015, août 26). Molycorp To Move Its Mountain Pass Rare Earth Facility To 'Care and Maintenance' Mode. Consulté 16 décembre 2015, à l'adresse http://www.molycorp.com/molycorp-to-move-its-mountain-pass-rare-earth-facility-to-care-and-maintenance-mode/

Momoh, A., E. Mhlongo, S., Abiodun, O., Muzerengi, C., & Mudanalwo, M. (2013). Potential implications of mine dusts on human health : A case study of Mukula Mine, Limpopo Province, South Africa. *Pakistan Journal of Medical Sciences*, *29*(6), 1444-1446.

Morales Belpaire, J. (2013). *Environnement naturel et histoire de la pensée économique*. Namur: Presses universitaires de Namur.

Moran-Palacios, H., Ortega-Fernandez, F., Lopez-Castaño, R., & Alvarez-Cabal, J. V. (2019). The Potential of Iron Ore Tailings as Secondary Deposits of Rare Earths. *Applied Sciences*, *9*(14), 2913.

Mouak, P. (2010). L'aluminium au London Metal Exchange : Les spécificités institutionnelles et financières d'un marché à terme. *Cahiers d'histoire de l'aluminium*, *44-45*(1), 106-123.

Mudd, G. M. (2007a). An analysis of historic production trends in Australian base metal mining. *Ore Geology Reviews*, *32*(1-2), 227-261.

Mudd, G. M. (2007b). Global trends in gold mining : Towards quantifying environmental and resource sustainability? *Resources Policy*, *32*(1-2), 42-56.

Mudd, G. M. (2007c). *The Sustainability of Mining in Australia: Key Production Trends and Their Environmental Implications* [Research Report 5]. Australia: Joint Research Report Mineral Policy Institute (MPI) and Department of Civil Engineering, Monash University.

Mudd, Gavin M. (2007). Gold mining in Australia : Linking historical trends and environmental and resource sustainability. *Environmental Science & Policy*, *10*(7), 629-644. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2007.04.006

Mudd, Gavin M. (2010). Global trends and environmental issues in nickel mining : Sulfides versus laterites. *Ore Geology Reviews*, *38*(1), 9-26. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.003

Mudd, Gavin M. (2012). Key trends in the resource sustainability of platinum group elements. *Ore Geology Reviews*, *46*, 106-117. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.02.005

Mudd, Gavin M., & Jowitt, S. M. (2018). Global Resource Assessments of Primary Metals : An Optimistic Reality Check. *Natural Resources Research*, *27*(2), 229-240. https://doi.org/10.1007/s11053-017-9349-0

Müller, A. (2016). Hukou and health insurance coverage for migrant workers. *Journal of Current Chinese Affairs*, *45*(2).

Muradian, R., Walter, M., & Martinez-Alier, J. (2012). Hegemonic transitions and global shifts in social metabolism : Implications for resource-rich countries. Introduction to the special

section. *Global Environmental Change*, *22*(3), 559-567. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.03.004

NASA Earth Observatory. (2012, avril 21). Rare Earth in Bayan Obo [Text.Article]. Consulté 12 octobre 2018, à l'adresse https://earthobservatory.nasa.gov/images/77723/rare-earth-in-bayan-obo

Nassar, N. T., Graedel, T. E., & Harper, E. M. (2015). By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science Advances*, *1*(3), e1400180. https://doi.org/10.1126/sciadv.1400180

National Bureau of Statistics of China. (2011). *China Statistical Yearbook 2011*. Consulté à l'adresse http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2011/indexeh.htm

National Bureau of Statistics of China. (2015). *China statistical yearbook*. Consulté à l'adresse http://www.stats.gov.cn

National Health Commission of the People's Republic of China. (2016). *Interpretation of « Opinions on Strengthening the Prevention and Control of migrant Workers'' Pneumoconiosis"—National Health and Wellness Committee of the People's Republic of China—解读《关于加强农民工尘肺病防治工作的意见》—中华人民共和国国家卫生健康委员会*». Consulté à l'adresse http://www.nhfpc.gov.cn/zwgk/jdjd/201601/2b9c07cea7cb484b86362933db466d66.shtml

National Research Council (US) Committee. (1999). Natural Radioactivity and Radiation. In *Evaluation of EPA Guidelines for Exposure to Naturally Occurring Radioactive Materials.* Consulté à l'adresse https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK230654/

National Toxicology Program. (2016). *TOXICOLOGY AND CARCINOGENESIS STUDIES OF ANTIMONY TRIOXIDE IN WISTAR HAN [Crl:WI (Han)] RATS AND B6C3F1 /N MICE (INHALATION STUDIES)* (N° CAS NO. 1309-64-4). Consulté à l'adresse https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/about_ntp/trpanel/2016/february/tr590_peerdraft.pdf

Nature & More. (2016). *Nature & More takes True Cost of Food to the consumer*. Consulté à l'adresse https://www.ifoam.bio/sites/default/files/true_cost_of_food_english_press_release2.pdf

Navarro, J., & Zhao, F. (2014). Life-Cycle Assessment of the Production of Rare-Earth Elements for Energy Applications : A Review. *Frontiers in Energy Research*, *2*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2014.00045

NEDO. (2009). *Trend Report of Development in Materials for Substitution ofScarce Metals*. Tokyo.

Neo. (2018). *Fiche d'information annuelle pour l'année 2017*. Consulté à l'adresse https://www.neomaterials.com/wp-content/uploads/2018/03/Neo-AIF_09March18_FINAL.pdf

Nguyen, R. T., & Imholte, D. D. (2016). China's Rare Earth Supply Chain : Illegal Production, and Response to new Cerium Demand. *JOM*, *68*(7), 1948-1956. https://doi.org/10.1007/s11837-016-1894-1

Nimmo, C. (Éd.). (2017). *Le petit Larousse illustré*.

Ningbo Yunsheng. (2018). Ningbo Yunsheng co.,Ltd-About Us-Company Profile. Consulté 25 janvier 2019, à l'adresse http://www.yunsheng.com/en/about.asp#bottom

Ningbo Zhaobao Magnet. (2015). About us. Consulté 7 février 2019, à l'adresse http://www.zhaobao-magnet.com/about.html#wgsjj

Nishizu, M. (2018, mai). *Recent developments in magnetic materials at Magnequench*. Neo Materials présenté à No.93 JABM Spring Symposium.

Nordhaus, W. D., Houthakker, H., & Solow, R. (1973). The Allocation of Energy Resources. *Brookings Papers on Economic Activity*, *1973*(3), 529-576. https://doi.org/10.2307/2534202

Norgaard, R. B. (1985). Environmental economics : An evolutionary critique and a plea for pluralism. *Journal of environmental economics and management*, *12*(4), 382–394.

Norgaard, R. B. (1990). Economic indicators of resource scarcity : A critical essay. *Journal of Environmental Economics and Management*, *19*(1), 19-25. https://doi.org/10.1016/0095-0696(90)90057-6

Norgaard, R. B. (1992). Sustainability as intergenerational equity : Economic theory and environmental planning. *Environmental Impact Assessment Review*, *12*(1), 85-124. https://doi.org/10.1016/0195-9255(92)90007-K

Norgate, T., & Haque, N. (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*, *18*(3), 266-274. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020

Norgate, Terry, & Haque, N. (2012). Using life cycle assessment to evaluate some environmental impacts of gold production. *Journal of Cleaner Production*, *29-30*, 53-63. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.042

North, D. C., & Miller, R. L. (1973). *The economics of public issues*. Harper & Row.

Northey, S., Mohr, S., Mudd, G. M., Weng, Z., & Giurco, D. (2014). Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining. *Resources, Conservation and Recycling*, *83*, 190-201. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.005

Norton, & G. Groat. (2005). *Mineral Commodity Summaries 2005*. USGS.

Nuss, P., & Eckelman, M. J. (2014). Life Cycle Assessment of Metals : A Scientific Synthesis. *PLoS ONE*, *9*(7), e101298. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298

Oakdene Hollins. (2010). *Lanthanide Resources and Alternatives*. Consulté à l'adresse https://static1.squarespace.com/static/5a60c3cc9f07f58443081f58/t/5ab3e11b0e2e721919eb6a2f/1521738022399/lanthanide_resources_and_alternatives_may_2010.pdf

Ober, J. A. (2018). *Mineral commodity summaries 2018* (p. 204) [USGS Unnumbered Series]. Consulté à l'adresse U.S. Geological Survey website: http://pubs.er.usgs.gov/publication/70194932

Oberholzer, H.-R., Freiermuth Knuchel, R., Weisskopf, P., & Gaillard, G. (2012). A novel method for soil quality in life cycle assessment using several soil indicators. *Agronomy for Sustainable Development*, *32*(3), 639-649. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0072-7

OCDE. (1999). *Dépôts de déchets radioactifs de faible activité : Une analyse des coûts*. Consulté à l'adresse https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/1999/low-level-waste-repository-costs-f.pdf

OIT. (2018). *Women and men in the informal economy : A statistical picture. Third edition* [Report]. Consulté à l'adresse http://www.ilo.org/global/publications/books/WCMS_626831/lang--en/index.htm

Okuno. (2006). *Prospects of Iron and Steel Production and Progress of Blast Furnace Route in China*. Consulté à l'adresse https://pdfs.semanticscholar.org/64fc/2371838c2f4420c8862349ef0fb2d57a8d0d.pdf

OMC. (2010). *Rapport sur le commerce mondial, Le commerce des ressources naturelles*. Consulté à l'adresse https://www.wto.org/french/res_f/booksp_f/anrep_f/wtr10-2b_f.pdf

OMS. (2007). *PH in Drinking-water Revised background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. Consulté à l'adresse http://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/guidelines/chemicals/ph_revised_2007_clean_version.pdf

Orris, G., & Grauch, R. (2002). *Rare Earth Element Mines, Deposits, and Occurrences*. Consulté à l'adresse USGS website: https://www.researchgate.net/publication/235996403_Rare_Earth_Element_Mines_Deposits_and_Occurrences

Owen, J. R., & Kemp, D. (2014). Mining and community relations : Mapping the internal dimensions of practice. *The Extractive Industries and Society*, *1*(1), 12-19. https://doi.org/10.1016/j.exis.2013.12.004

Ozdemiroglu, E. (1993). *Measuring Natural Resource Scarcity : A Study of the Price Indicator*. Centre for Social and Economic Research on the Global Environment, University of East Anglia and University College.

Palpacuer, F. (2008a). Bringing the social context back in : Governance and wealth distribution in global commodity chains. *Economy and Society*, *37*(3), 393-419. https://doi.org/10.1080/03085140802172698

Palpacuer, F. (2008b). Firme-réseau globale et réseaux transnationaux d'ONG : Vers un nouveau mode de régulation ? *Revue de La Régulation - Capitalisme, Institutions, Pouvoirs*, *2*. Consulté à l'adresse https://ideas.repec.org/a/rvr/journl/20082243.html

Palpacuer, F., & Balas, N. (2010). Les chaînes globales de valeur. *Revue française de gestion*, *36*(201), 89-102. https://doi.org/10.3166/rfg.201.89-102

Passet, R. (1979). *L'économique et le vivant*. Paris: Economica.

Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1989). *Economics of Natural Resources and the Environment*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.

Pegg, S. (2006). Mining and poverty reduction : Transforming rhetoric into reality. *Journal of Cleaner Production*, *14*(3), 376-387. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.06.006

Petit, O. (2004). La nouvelle économie des ressources et les marches de l'eau : Une perspective idéologique ? *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, (Volume 5 Numéro 2). https://doi.org/10.4000/vertigo.3608

Petit, O., & Vivien, F.-D. (2015). *When economists and ecologists meet on Ecological Economics : Two science paths around two interdisciplinary concepts*. Consulté à l'adresse https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01249774

Peugeot. (2018). *Prices, equipment and technical specifications*. Consulté à l'adresse https://media.peugeot.co.uk/file/99/5/ion-prices-and-specs.114995.pdf

Philibert, C. (2017). *Renewable Energy for Industry From green energy to green materials and fuels*. Consulté à l'adresse OECD, International Energy Agency website: https://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/Renewable_Energy_for_Industry.pdf

Phillips, N. (2011). Informality, global production networks and the dynamics of ‘adverse incorporation’. *Global Networks*, *11*(3), 380-397. https://doi.org/10.1111/j.1471-0374.2011.00331.x

Piatak, N. M., Parsons, M. B., & Seal, R. R. (2015). Characteristics and environmental aspects of slag : A review. *Applied Geochemistry*, *57*, 236-266. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.04.009

Pigou, A. C. (1932). *The economics of welfare [1920]* (McMillan & Co.). London ; New York.

Pigou, A. C. (1937). *Socialism Versus Capitalism*. Macmillan and Company, Limited.

Piketty, T. (2013). *Le capital au XXIe siècle*. Paris: Éditions du Seuil.

Pipame. (2013). *Enjeux économiques des métaux stratégiques pour les filières automobile et aéronautique*. Consulté à l’adresse http://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/prospective/automobile/pdfinal-metaux-strategiques.pdf

Pitron, G. (2018). *La guerre des métaux rares : La face cachée de la transition énergétique et numérique*. Paris: Liens qui libèrent.

Pitron, G., & Turquier, S. (2013). *La sale guerre des terres rares*. Consulté à l’adresse https://www.youtube.com/watch?v=146uI1unNp8

Pizzol, M., Smart, J. C. R., & Thomsen, M. (2014). External costs of cadmium emissions to soil : A drawback of phosphorus fertilizers. *Journal of Cleaner Production*, *84*, 475-483. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.080

Pizzol, M., Weidema, B., Brandão, M., & Osset, P. (2015). Monetary valuation in Life Cycle Assessment : A review. *Journal of Cleaner Production*, *86*, 170-179. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.007

Planchon, M., Guyonnet, D., Rollat, A., Escalon, V., Vaxelaire, S., & Tuduri, J. (2015, avril). *Material Flow Analysis for identifying Neodymium flows and stocks and recycling potentials in the EU-28*. Présenté à ASTER Conférence de clôture, Orléans. Consulté à l’adresse

http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Aster_REE/anr_aster_23_04_15_03_material_flow_analysis_for_identifying_neodymium_flows_and_stocksplanchon_anr_aster_23_04_15.pdf

Pokhrel, L. R., & Dubey, B. (2013). Global Scenarios of Metal Mining, Environmental Repercussions, Public Policies, and Sustainability : A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *43*(21), 2352-2388. https://doi.org/10.1080/10643389.2012.672086

Polanyi, K. (1944). *The great transformation : The political and economic origins of our time*. Consulté à l'adresse http://digamo.free.fr/pola44-.pdf

Postel, N. (2007). Bernard Chavance, L'économie institutionnelle, La Découverte, Repères, Paris, 2007, 120 pages. *Revue de la régulation. Capitalisme, institutions, pouvoirs*, (2). Consulté à l'adresse http://journals.openedition.org/regulation/2373

Pothen, F., & Fink, K. (2015). *A Political Economy of China's Export Restrictions on Rare Earth Elements* (SSRN Scholarly Paper N° ID 2619123). Consulté à l'adresse Social Science Research Network website: http://papers.ssrn.com/abstract=2619123

Potter, N., & Christy, F. T. (1962). *Trends in natural resource commodities : Statistics of prices, output, consumption, foreign trade, and employment in the United States, 1870-1957*. Published for Resources for the Future by Johns Hopkins Press.

Poulard, F., Charles, N., & Kister, P. (2017). *Lexique*. In *La mine en France*: *Vol. Tome 13* (p. 47). Consulté à l'adresse http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/tome_06_exploitation_miniere_et_traitement_des_minerais_final24032017.pdf

Poulard, F., Daupley, X., Didier, C., Pokryska, Z., D'Hugues, P., Charles, N., … Save, M. (2017). *Exploitation minière et traitement des minerais*. In *La mine en France*: *Vol. Tome 6* (p. 77). Consulté à l'adresse http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/tome_06_exploitation_miniere_et_traitement_des_minerais_final24032017.pdf

Prassas, M. (2018). *The biggest blind spot in the global commodity market*. 115.

PRé. (2018). *SimaPro Database Manual Methods Library* (N° 4.1).

Prior, T., Giurco, D., Mudd, G., Mason, L., & Behrisch, J. (2012). Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. *Global Environmental Change*, *22*(3), 577-587. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.08.009

Programme des Nations Unies pour l'Environnement. (2016). *Radiation : Effets et sources*. Consulté à l'adresse https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7790/-Radiation_Effects_and_sources-2016Radiation_-_Effects_and_Sources_FR.pdg.pdf.pdf?sequence=5&isAllowed=y

Qi, D. (2018). *Hydrometallurgy of Rare Earths : Extraction and Separation*. Elsevier.

Qifan, W., Hua, L., Chenghui, M., Shunping, Z., Xinhua, Z., Shengqing, X., & Hongyan, W. (2010). The use and management of NORM residues in processing Bayan Obo Ores in China. *Proc. Int. Symp., Marrakesh, Morocco, International Atomic Energy Agency*, 65–79.

Radley, B., & Vogel, C. (2015). Fighting windmills in Eastern Congo ? The ambiguous impact of the 'conflict minerals' movement. *The Extractive Industries and Society*, *2*(3), 406-410. https://doi.org/10.1016/j.exis.2015.05.005

Raikes, P., Friis Jensen, M., & Ponte, S. (2000). Global commodity chain analysis and the French filière approach : Comparison and critique. *Economy and society*, *29*(3), 390–417.

Ramazzotti, P., Frigato, P., & Elsner, W. (Éd.). (2012). *Social costs today : Institutional analyses of the present crises*. London ; New York: Routledge.

Rambaud, A. (2015). *La valeur d'existence en comptabilité : Pourquoi et comment l'entreprise peut prendre en compte des entités environnementales pour « elles-mêmes » ?* Consulté à l'adresse http://www.theses.fr/s57591

REdUSE. (2013). *Hidden impacts : How Europe's resource overconsumption promotes global land conflicts*. Consulté à l'adresse http://www.foeeurope.org/hidden-impacts-070313

Research and Markets. (2018). *Global Rare Earth Permanent Magnet Market 2018-2021*. Consulté à l'adresse https://www.prnewswire.com/news-releases/global-rare-earth-permanent-magnet-market-2018-2021-with-focus-on-the-chinese-industry-featuring-5-global-players--22-chinese-companies-300660906.html

Ricardo, D. (1817). *Des principes de l'économie politique et de l'impôt* (Traduit en français par Francisco Solano Constancio et Alcide Fonteyraud en 1847 sur le texte de la 3e édition anglaise de 1821). Paris: Flammarion.

Richard, J., & Plot-Vicard, E. (2014). *La gestion environnementale*. Paris: la Découverte.

Rico, M., Benito, G., Salgueiro, R., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. (2008). Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of hazardous materials*, *152*, 846-852. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.050

Robert L. Bradley. (2004). Are We Running Out of Oil? *PERC Report*, *22*(3). Consulté à l'adresse http://www.perc.org/articles/are-we-running-out-oil

Robin des Bois. (2005). *Radioactivité naturelle technologiquement renforcée*. Consulté à l'adresse http://www.robindesbois.org/wp-content/uploads/rad_nat_techno.pdf

Robinson, J. (1953). The Production Function and the Theory of Capital. *The Review of Economic Studies*, *21*(2), 81. https://doi.org/10.2307/2296002

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, \AAsa, Chapin, F. S., Lambin, E. F., … others. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, *461*(7263), 472–475.

Rodríguez, L., Ruiz, E., Alonso-Azcárate, J., & Rincón, J. (2009). Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb–Zn mine in Spain. *Journal of Environmental Management*, *90*(2), 1106-1116. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.04.007

Roskill. (2015). *World market for antimony to 2025.* [Place of publication not identified]: Roskill Inf Services.

Royen, H., & Fortkamp, U. (2016). *Rare Earth Elements—Purification, Separation and Recycling*. 34.

Sacher, W. (2014). Recursos socionaturales : La importancia de la dimension social de los yacimientos. *Nueva Sociedad*, (252). Consulté à l'adresse http://nuso.org/media/articles/downloads/4043_1.pdf

Schandl, H., & West, J. (2010). Resource use and resource efficiency in the Asia–Pacific region. *Global Environmental Change*, *20*(4), 636-647. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.06.003

Schreiber, A., Marx, J., Zapp, P., Hake, J.-F., Voßenkaul, D., & Friedrich, B. (2016). Environmental Impacts of Rare Earth Mining and Separation Based on Eudialyte : A New European Way. *Resources*, *5*(4), 32. https://doi.org/10.3390/resources5040032

Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S., & Merz, C. (2011). Study on rare earths and their recycling. *Öko-Institut eV Darmstadt*. Consulté à l'adresse http://resourcefever.eu/publications/reports/Rare%20earths%20study_Oeko-Institut_Jan%202011.pdf

Schulze, W. D. (1974). The optimal use of non-renewable resources : The theory of extraction. *Journal of Environmental Economics and Management*, *1*(1), 53-73. https://doi.org/10.1016/0095-0696(74)90017-5

Schumpeter, J. A. (1954). *History of economic analysis*. London: George Allen & Unwin.

Seyhan, D., Weikard, H.-P., & van Ierland, E. (2012). An economic model of long-term phosphorus extraction and recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, *61*, 103-108. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.005

Shanghai ROCO Magnetics Co.,Ltd. (2013). History. Consulté 7 février 2019, à l'adresse http://www.rmag.cn/en/about/history/

Shanxi Huiqiang Magnets. (2016). Huiqiang Magnets. Consulté 7 février 2019, à l'adresse http://www.hqmagnets.com/eng/index.php?p=about&lanmu=3&id=1

Sharma, S. K. (2014). *Heavy Metals In Water : Presence, Removal and Safety*. Royal Society of Chemistry.

Simon, Julian L., & Bartlett, A. A. (1985). *The ultimate resource*. AAPT.

Simon, Julian Lincoln. (1990). *Population Matters: People, Resources, Environment, and Immigration*. Transaction Publishers.

Simon, Julian Lincoln. (1998). *The ultimate resource 2* (Rev. ed). Princeton, N.J: Princeton University Press.

Singer, D.A. (1998). *Revised grade and tonnage model of carbonatite deposits* (USGS Numbered Series N° 98-235). Consulté à l'adresse U.S. Geological Survey, website: http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr98235

Singer, Donald A, Mosier, D. L., & Menzie, W. D. (1993). *Digital grade and tonnage data for 50 types of mineral deposits*. 107.

Singh, A., & Agrawal, M. (2008). Acid rain and its ecological consequences. *Journal of Environmental Biology*, *29*(1), 15-24.

Skinner, B. J. (1976). A second iron age ahead? *American Scientist*, *64*, 258-269.

SMHRIC. (2015, novembre 27). Herders' leader detained for « chatting via WeChat ». Consulté 4 janvier 2016, à l'adresse http://www.smhric.org/news_585.htm

Smith, R. J. (1981). Resolving the Tragedy of the Commons by creating Private Property Rights in Wildlife. *Cato Journal*, *1*, 439.

Solow, R. M. (1974). *The economics of resources or the resources of economics*. 257–276. Consulté à l'adresse http://link.springer.com/chapter/10.1057/9780230523210_13

Song, X.-P., Hansen, M. C., Stehman, S. V., Potapov, P. V., Tyukavina, A., Vermote, E. F., & Townshend, J. R. (2018). Global land change from 1982 to 2016. *Nature*, *560*(7720), 639-643. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0411-9

Sonter, L. J., Moran, C. J., Barrett, D. J., & Soares-Filho, B. S. (2014). Processes of land use change in mining regions. *Journal of Cleaner Production*, *84*, 494-501. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.084

Spash, C. L. (2008, mai). How Much is that Ecosystem in the Window? The One with the Bio-diverse Trail [Text]. https://doi.org/info:doi/10.3197/096327108X303882

Sprecher, B., Daigo, I., Vos, M., Kleijn, R., Murakami, S., & Kramer, G. J. (2016). *Quantification of resilience in the NdFeB supply chain*. 10.

Sprecher, B., Xiao, Y., Walton, A., Speight, J., Harris, R., Kleijn, R., … Kramer, G. J. (2014). Life Cycle Inventory of the Production of Rare Earths and the Subsequent Production of NdFeB Rare Earth Permanent Magnets. *Environmental Science & Technology*, *48*(7), 3951-3958. https://doi.org/10.1021/es404596q

Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the Anthropocene : The Great Acceleration. *The Anthropocene Review*, 2053019614564785.

Stephens, C., & Ahern, M. (2001). *Worker and Community Health Impacts Related to Mining Operations Internationally A Rapid Review of the Literature* (N° 25). Consulté à l'adresse International Institute for Environment and Development website: http://pubs.iied.org/G01051/

Stern, N. H. (2007). *The economics of climate change : The Stern review*. cambridge University press.

Stigler, G. J. (1966). *The Theory of Price*. Prentice Hall PTR.

Stiglitz, J. (1974). Growth with exhaustible natural resources : Efficient and optimal growth paths. *The review of economic studies*, *41*, 123–137.

Stone, A., & Williamson, O. E. (1986). The Economic Institutions of Capitalism : Firms, Markets, Relational Contracting. *The American Political Science Review*, *80*(4), 1424-1425. https://doi.org/10.2307/1960952

Su, W. (2009). *Economic and Policy Analysis of China's Rare Earth Industry (in Chinese)* (China Financial and Economic Publishing House). Beijing.

Sun, W., Ji, B., Khoso, S. A., Tang, H., Liu, R., Wang, L., & Hu, Y. (2018). An extensive review on restoration technologies for mining tailings. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(34), 33911-33925. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3423-y

Svampa, M. (2011). Néo-« développementisme » extractiviste, gouvernements et mouvements sociaux en Amérique latine. *Problemes d'Amerique latine*, *N° 81*(3), 101-127.

Swaney, J. A. (1987). Elements of a Neoinstitutional Environmental Economics. *Journal of Economic Issues*, *21*(4), 1739-1779. https://doi.org/10.1080/00213624.1987.11504721

Sykes, J. (2013, juin). *Rare earth mine costs*. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2675.1123

Tack, K., Mouton, J., Meunier, L., Mestre-Pujol, D., & Denys, S. (2009, octobre 20). *Bioaccessibilité et spéciation de l'arsenic des sols autour de l'ancien site minier de Salsigne*. NC. Consulté à l'adresse https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00973365/document

Tang, C., Li, K., Ni, W., & Fan, D. (2019). Recovering Iron from Iron Ore Tailings and Preparing Concrete Composite Admixtures. *Minerals*, *9*(4), 232. https://doi.org/10.3390/min9040232

Taylor, B. (2012). Supply chains and labour standards in China. *Personnel Review*, *41*(5), 552-571. https://doi.org/10.1108/00483481211249102

TEEB. (2015). *TEEB for Agriculture & FoodInterim Report* [United Nations Environment Programme]. Geneva, Switzerland.

Temper, L., Bene, D. del, & Martinez-Alier, J. (2015). Mapping the frontiers and front lines of global environmental justice : The EJAtlas. *Journal of Political Ecology*, *22*(1), 255-278.

The Chinese Society of Rare Earths. (2018). The Chinese Society of Rare Earths—Introduction to the society. Consulté 17 octobre 2018, à l'adresse http://www.cs-re.org.cn/about/

Tian, X., Wu, Y., Hou, P., Liang, S., Qu, S., Xu, M., & Zuo, T. (2017). Environmental impact and economic assessment of secondary lead production : Comparison of main spent lead-acid battery recycling processes in China. *Journal of Cleaner Production*, *144*, 142-148. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.171

Tietenberg, T. H., & Lewis, L. (2016). *Environmental and Natural Resource Economics*. Consulté à l'adresse https://books.google.cm/books?id=8ROtCwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbs_book_other_versions_r&cad=4#v=onepage&q&f=false

Tietge, U., Mock, P., Lutsey, N., & Campestrini, A. (2016). *Comparison of leading electric vehicle policy and deployment in Europe* (p. 89). ICCT Europe.

Tilton, J. E. (2003). *On Borrowed Time?: Assessing the Threat of Mineral Depletion*. Resources for the Future.

Tilton, J. E., & Skinner, B. J. (1987). The meaning of resources. *Resources and world development*, 13–27.

Toxic truth of secretive Siberian city. (2007, avril 5). *BBC*. Consulté à l'adresse http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/6528853.stm

Toyota Tsusho Corporation. (2015, décembre 10). Toyota Tsusho Inks Rare Earths Contract with Indian State Corporation-Rare earth oxides produced in India to be exported to Japan, Europe and Americas-. Consulté 5 novembre 2018, à l'adresse Toyota Tsusho website: https://www.toyota-tsusho.com/english/press/detail/151210_002928.html

Tsakalidis, A., & Thiel, C. (2018). *Electric vehicles in Europe from 2010 to 2017: Is full-scale commercialisation beginning?* [EUR - Scientific and Technical Research Reports]. Consulté à l'adresse Joint Research Centre (JRC), the European Commission's science and knowledge service website: https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/electric-vehicles-europe-2010-2017-full-scale-commercialisation-beginning

Turgot, A.-R.-J. (1844). Observations sur le mémoire de M. de Saint-Péravy en faveur de l'impôt indirect. *Oeuvres, Ausg. Daire, Paris, Bd. I*.

Turner, R. K. (2007). Limits to CBA in UK and European environmental policy : Retrospects and future prospects. *Environmental and Resource Economics*, *37*(1), 253-269. https://doi.org/10.1007/s10640-007-9119-2

Tutubalina, O. V., & Rees, W. G. (2001). *Vegetation degradation in a permafrost region as seen from space : Noril'sk (1961–1999)*. 13.

Twala, C. (2012). The Marikana Massacre : A Historical Overview of the Labour Unrest in the Mining Sector in South Africa. *Southern Africa Peace and Security Studies*, *1*(2).

UNEP/OCHA. (2000a). *Cyanide Spill at Baia Mare Romania : UNEP/OCHA Assessment Mission*.

UNEP/OCHA. (2000b). *Mining waste spill from the Baia Borsa processing complex in Romania : Assessment Mission to Hungary and Romania*. Consulté à l'adresse https://reliefweb.int/report/hungary/mining-waste-spill-baia-borsa-processing-complex-romania-assessment-mission-hungary

United Nations, Economic Commission for Europe. (2002). *Report on the Improvement of the Management of Radiation Protection Aspects in the Recycling of Metal Scrap*.

United Nations Environment Programme. (2012). *GEO 5 : Global environment outlook : environment for the future we want*. Nairobi: United Nations Environment Programme.

UNSCEAR. (2017, septembre 14). FAQ. Consulté 25 août 2018, à l'adresse http://www.unscear.org/unscear/fr/faq.html#Effects%20of%20radiation%20exposure

U.S.Nuclear Regulatory Commission. NRC: 10 CFR 40.4 Definitions. , Pub. L. No. Title 10, Code of Federal Regulations.

Utembe, W., Faustman, E., Matatiele, P., & Gulumian, M. (2015). Hazards identified and the need for health risk assessment in the South African mining industry. *Human & Experimental Toxicology*, *34*(12), 1212-1221. https://doi.org/10.1177/0960327115600370

VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG. (2018, mai 3). The Company. Consulté 17 février 2019, à l'adresse https://www.vacuumschmelze.com/en/the-company.html

Vahidi, E., Navarro, J., & Zhao, F. (2016). An initial life cycle assessment of rare earth oxides production from ion-adsorption clays. *Resources, Conservation and Recycling*, *113*, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.006

Vallejo, M. C. (2010). Biophysical structure of the Ecuadorian economy, foreign trade, and policy implications. *Ecological Economics*, *70*(2), 159–169.

Vallejo, M. C., Rincón, P., A, M., & Martinez-Alier, J. (2011). Metabolic Profile of the Colombian Economy from 1970 to 2007. *Journal of Industrial Ecology*, *15*(2), 245-267. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00328.x

Van der Kuijp, T. J., Huang, L., & Cherry, C. R. (2013). Health hazards of China's lead-acid battery industry : A review of its market drivers, production processes, and health impacts. *Environmental Health*, *12*(1), 61.

Veblen, T. (1904). *The theory of business enterprise*. Consulté à l'adresse http://archive.org/details/theorybusinesse00veblgoog

Veblen, T. (1923). *Absentee Ownership and Business Enterprise in Recent Times : The Case of America*. Transaction Publishers.

Vela-Almeida, D., Brooks, G., & Kosoy, N. (2015). Setting the limits to extraction : A biophysical approach to mining activities. *Ecological Economics*, *119*(Supplement C), 189-196. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.001

Vercher-Chaptal, C., & Palpacuer, F. (2013). *Les Chaînes Globales de Valeur : Une lecture (re) contextualisée et (re)politisée de la RSE*.

Verhoef, E. V., Dijkema, G. P. J., & Reuter, M. A. (2004). Process Knowledge, System Dynamics, and Metal Ecology. *Journal of Industrial Ecology*, *8*(1-2), 23-43. https://doi.org/10.1162/1088198041269382

Victor, J.-C., Bueb, J., & Fouesnant, A. (2015). *CHÈRES TERRES RARES*. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=4qlNz-DxvmU

Victor, P. A. (1991). Indicators of sustainable development : Some lessons from capital theory. *Ecological Economics*, *4*(3), 191-213. https://doi.org/10.1016/0921-8009(91)90051-F

Vivien, F.-D. (2018). Chapitre 1. Les antécédents conceptuels du développement soutenable1. In B. Zuindeau (Éd.), *Développement durable et territoire : Nouvelle édition originale* (p. 25-35). Consulté à l'adresse http://books.openedition.org/septentrion/15382

von Braun, J., & Meinzen-Dick, R. S. (2009). *« Land grabbing » by foreign investors in developing countries*. Consulté à l'adresse IFPRI website: http://www.ifpri.org/publication/land-grabbing-foreign-investors-developing-countries

Voncken, J. H. L. (2016). *The Rare Earth Elements*. Consulté à l'adresse http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26809-5

Waggitt, P. W. (2011). A global overview of NORM residue remediation and good practice. In *Naturally occurring radioactive material (NORM VI) : Proceedings* (6th International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material 2010). Marrakesh: Internat. Atomic Energy Agency.

Wang, L., Jiao, G. H., Lu, H. S., & Wang, Q. Q. (2019). Life cycle assesment of integrated explotation technology for tailings in Bayan Obo mine, China. *Applied ecology and environmental research*, *17*(2), 4343–4359.

WCED. (1987). *Our Common Future (The Brundtland Report)*. Oxford University Press.

Weinstein, O. (2013). Comment comprendre les « communs » : Elinor Ostrom, la propriété et la nouvelle économie institutionnelle. *Revue de la régulation. Capitalisme, institutions, pouvoirs*, (14). Consulté à l'adresse http://regulation.revues.org/10452

WHO. (2016, avril 29). Rayonnements ionisants, effets sur la santé et mesures de protection. Consulté 25 août 2018, à l'adresse World Health Organization website: http://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures

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

WISE Uranium Project. (2018, juillet 18). Chronology of major tailings dam failures. Consulté 18 août 2018, à l'adresse http://www.wise-uranium.org/mdaf.html

World Health Organization. (2007a). *Elimination of silicosis* (The Global Occupational Health Network Newsletter N° 12). Consulté à l'adresse http://www.who.int/occupational_health/publications/newsletter/gohnet12e.pdf

World Health Organization. (2007b). *Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution*. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

Worrell, E., & Reuter, M. A. (Éd.). (2014). *Handbook of recycling : State-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists*. Amsterdam ; Boston: Elsevier.

Wright, T. (2012). *The Political Economy of the Chinese Coal Industry : Black Gold and Blood-Stained Coal*. Routledge.

Wright, T. (2013). Coal Mining in China : The Social Costs. *Georgetown Journal of International Affairs*, *14*(1), 143-152.

Wu, X., & Treiman, D. J. (2004). The Household Registration System and Social Stratification in China : 1955-1996. *Demography*, *41*(2), 363-384. https://doi.org/10.1353/dem.2004.0010

Wübbeke, J. (2013). Rare earth elements in China : Policies and narratives of reinventing an industry. *Resources Policy*, *38*(3), 384-394. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.05.005

Xiao, B. (2019, avril 30). Baosteel tailings problem, has a great value (in chinese), 宝钢尾矿敌人富有潜池价值. *bet-365亚洲亚洲版官网*. Consulté à l'adresse https://www.greatairjdsbaskets.com/bet-365yzyzbgw/2019/0501/2191.html

Xu, G. X., & Shi, C. X. (2005). The emergency appeal on the protection of thorium and RE resources of Bayan Obo to avoid radioactive contamination in Yellow River and Baotou. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, *20*(6), 448-450. Consulté à l'adresse Scopus.

Yakovlev, A. S., Plekhanova, I. O., Kudryashov, S. V., & Aimaletdinov, R. A. (2008). Assessment and regulation of the ecological state of soils in the impact zone of mining and metallurgical enterprises of Norilsk Nickel Company. *Eurasian Soil Science*, *41*(6), 648-659. https://doi.org/10.1134/S1064229308060100

Yaksic, A., & Tilton, J. E. (2009). Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion : The case of lithium. *Resources Policy*, *34*(4), 185–194.

Yang, X. J., Lin, A., Li, X.-L., Wu, Y., Zhou, W., & Chen, Z. (2013). China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. *Environmental Development*, *8*, 131-136. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2013.03.006

Yang, X.-Y., Sun, W.-D., Zhang, Y.-X., & Zheng, Y.-F. (2009). Geochemical constraints on the genesis of the Bayan Obo Fe–Nb–REE deposit in Inner Mongolia, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *73*(5), 1417-1435. https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.12.003

Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauß, R., Gutfleisch, O., … Binnemans, K. (2017). REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap : A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, *3*(1), 122-149. https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4

Yellishetty, M., Haque, N., & Dubreuil, A. (2012). Issues and Challenges in Life Cycle Assessment in the Minerals and Metals Sector : A Chance to Improve Raw Materials Efficiency. In R. Sinding-Larsen & F.-W. Wellmer (Éd.), *Non-Renewable Resource Issues* (p. 229-246). https://doi.org/10.1007/978-90-481-8679-2_12

Yellishetty, M., Ranjith, P. G., & Tharumarajah, A. (2010). Iron ore and steel production trends and material flows in the world : Is this really sustainable? *Resources, Conservation and Recycling*, *54*(12), 1084-1094. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.03.003

Yellishetty, M., Ranjith, P. G., Tharumarajah, A., & Bhosale, S. (2009). Life cycle assessment in the minerals and metals sector : A critical review of selected issues and challenges. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *14*(3), 257-267. https://doi.org/10.1007/s11367-009-0060-1

Young, S. B., Dias, G., Fonseca, A., & Spilka O'Keefe, M. (2008). *Social and Environmental Responsibility in Metals Supply to the Electronic Industry*. GeSI EICC.

Zhang, B., Liu, C., Li, C., & Jiang, M. (2014). A novel approach for recovery of rare earths and niobium from Bayan Obo tailings. *Minerals Engineering*, *65*, 17-23. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.04.011

Zhang, J., & Edwards, C. (2013). Mineral decomposition and leaching processes for treating rare earth ore concentrates. *Canadian Metallurgical Quarterly*, *52*(3), 243-248. https://doi.org/10.1179/1879139513Y.0000000084

Zhang, Jennifer. (2015, juillet 5). Guangdong women workers' centre on the brink of shutdown. Consulté 7 janvier 2016, à l'adresse USI - Union Solidarity International website: https://usilive.org/guangdong-women-workers-centre-on-the-brink-of-shutdown/

Zhang, Jijiao, Wenden, C. W. de, & Giovanella, M. (2013). Le système du Hukou. *Migrations Société*, (149), 29-50. https://doi.org/10.3917/migra.149.0029

Zhang, S., Xue, X., Liu, X., Duan, P., Yang, H., Jiang, T., … Liu, R. (2006). Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources. *Journal of Mining Science*, *42*(4), 403-408. https://doi.org/10.1007/s10913-006-0069-9

Zhongxin, Y., Ge, B., Chenyu, W., Zhongqin, Z., & Xianjiang, Y. (1992). Geological features and genesis of the Bayan Obo REE ore deposit, Inner Mongolia, China. *Applied Geochemistry*, *7*(5), 429-442. https://doi.org/10.1016/0883-2927(92)90004-M

Zhou, B., Li, Z., & Zhao, Y. (2017). Evaluation of Externalities Associated with Rare Earth Exploitation at Bayan Obo. *Geo-Resources Environment and Engineering*, *2*. https://doi.org/10.15273/gree.2017.02.007

Zhou, H., Yang, W.-T., Zhou, X., Liu, L., Gu, J.-F., Wang, W.-L., … Liao, B.-H. (2016). Accumulation of Heavy Metals in Vegetable Species Planted in Contaminated Soils and the Health Risk Assessment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *13*(3), 289. https://doi.org/10.3390/ijerph13030289

Zhou, Y., Wang, M., Hao, H., Johnson, L., Wang, H., & Hao, H. (2015). Plug-in electric vehicle market penetration and incentives : A global review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, *20*(5), 777-795. https://doi.org/10.1007/s11027-014-9611-2

Zhou, Y., Yang, H., Xue, X., & Yuan, S. (2017). Separation and recovery of iron and rare earth from bayan obo tailings by magnetizing roasting and (NH4) 2SO4 activation roasting. *Metals*, *7*(6), 195.

Zhu, Z., Pranolo, Y., & Cheng, C. Y. (2015). Separation of uranium and thorium from rare earths for rare earth production – A review. *Minerals Engineering*, *77*, 185-196. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.012

Zimmermann, E. W. (1933). *World Resources and Industries: A Functional Appraisal of the Availability of Agricultural and Industrial Resources*. Harper & Brothers Publishers.

Zografos, C., & Martínez-Alier, J. (2009). The Politics of Landscape Value : A Case Study of Wind Farm Conflict in Rural Catalonia. *Environment and Planning A: Economy and Space*, *41*(7), 1726-1744. https://doi.org/10.1068/a41208

Zou, Chen, Li, Kai, & Zhenkai. (2016, août). *New technique for Bayan Obo mixed RE concentrate based on Valency Change and Complexation of Cerium(Ce) with Fluorine (F) and Phosphorus (P)*. State Key Laboratory of Rare Earth Resource Utilization, Changchun Institute of Applied Chemistry présenté à The 8th International Conference on Rare Earth Development and Application & The 3rd China Rare Earth Summit, The Chinese Society of Rare Earths (CSRE), Lanzhou, China. Consulté à l'adresse http://www.cs-re.org.cn/news/notice/a52.html

ANNEXES

Annexe 1

Tableau périodique des éléments

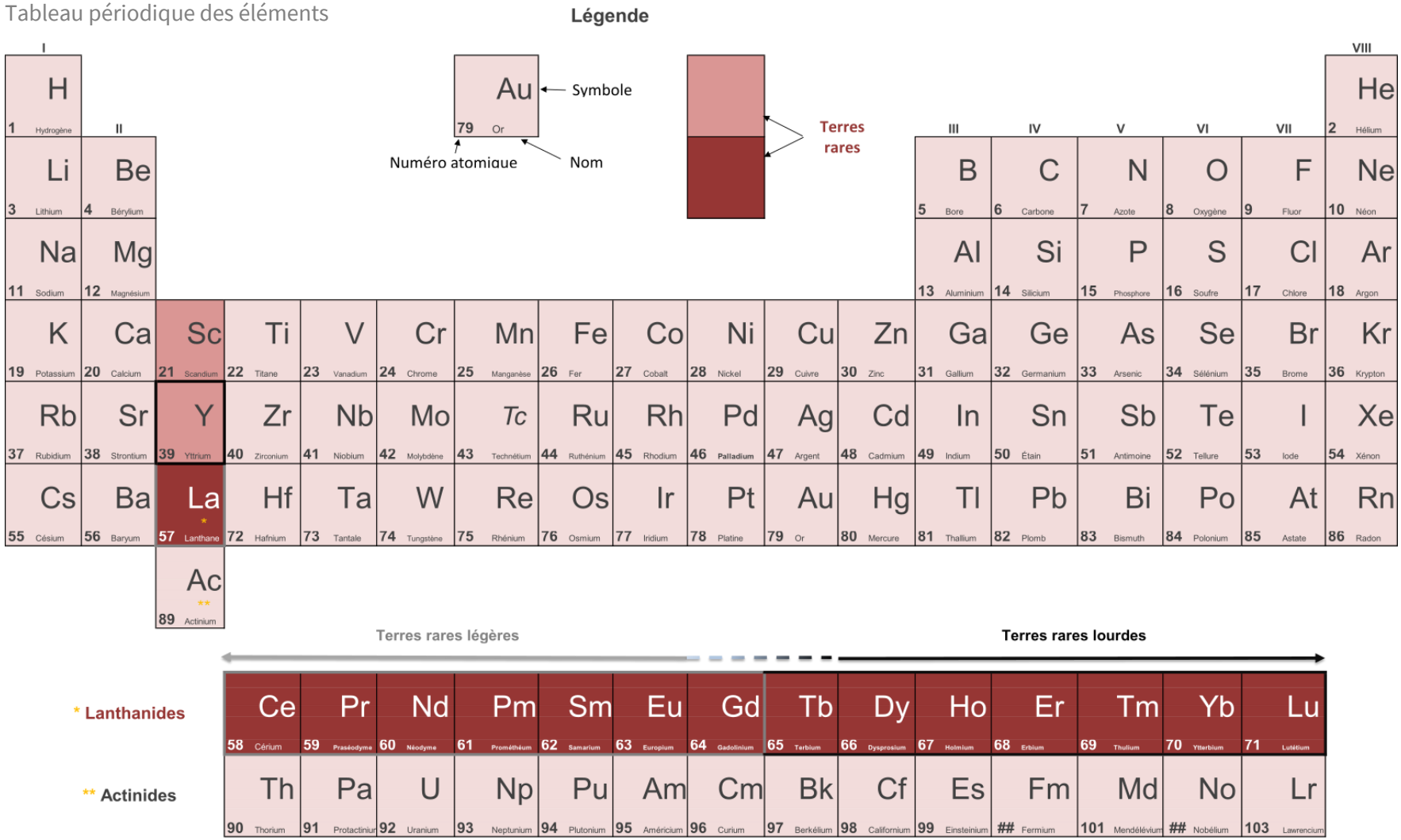


Tableau modifié à partir d'une version du CESSNOV (version mars 2006)

Les pointillés indiquent les variations de classement : les terres rares dites « légères », ou « cériques » vont du lanthane (La) au gadolinium (Gd), et les terres rares « lourdes » ou « yttriques » vont du terbium au lutétium pour Gupta et Krishnamurthy (Gupta & Krishnamurthy, 2005), alors que la commission européenne inclut le gadolinium dans les terres rares lourdes (Deloitte, BGS, BRGM, & TNO, 2017).

Annexe 2

Les minerais de terres rares dans le monde

Les terres rares sont présentes dans environ 200 minéraux différents (oxydes, carbonates, phosphates, siliciures). Cependant trois minéraux contiennent environ 95% des ressources de terres rares dans le monde. Ces minéraux sont présentés ici par importance décroissante :

Pierre Clolus

La bastnaésite : (Ce,La,Pr)(CO3)F est un fluorocarbonate contenant des terres cériques et ne contenant presque pas de thorium. On la trouve dans certains gisements filoniens, zones de contact métamorphiques, les pegmatites[122], les carbonatites[123]. Elle contient environ 70% d'oxydes de terres rares. C'est la première source de terres rares légères à Baiyun Ebo et à Mountain Pass.

Monazite

La monazite : (Ce,La,…)PO4 est un phosphate contenant des terres rares (environ 70%), dont des quantités de néodyme, praséodyme et samarium non négligeables. Elle contient également du thorium (de 4% à 12% en moyenne) et parfois de l'uranium. La monazite se trouve dans les mêmes types de gisements que la bastnaésite, mais du fait de sa stabilité géochimique, on la trouve également dans des gisements issus de l'altération. Les ressources les plus importantes de monazite ont été les placers[124] de plages. La monazite est également présente à Baiyun Ebo et est à l'origine de la pollution en thorium.

J-M Johannet

Le xénotime : YPO4 est un phosphate d'yttrium contenant environ 67% de terres rares et la plupart des terres rares lourdes. On le trouve en Californie, dans les placer de cassitérite de Malaisie, d'Indonésie et de Thaïlande, et dans des sables à minéraux lourds d'Australie et de Chine, ainsi que dans les mines d'étain alluvial du Brésil.

Les deux premiers minéraux suscités sont enrichis en terres rares dites « légères », ou cériques (du lanthane, La, au gadolinium, Gd), le néodyme en fait donc parti. Elles contiennent donc peu de terres rares dites « lourdes » ou yttriques (du terbium, Tb, au lutétium, Lu) (Gupta & Krishnamurthy, 2005), les terres rares les plus chères. Une autre source importante de terres rares avec un taux plus important de terres rares lourdes (BRGM, 2015, p. 97), notamment d'europium très recherché, sont les argiles ioniques, exploitées dans le Sud-Est de la Chine (Ganzhou, Jiangxi) et renfermant environ 0,2 % d'oxydes de terres rares sous forme d'ions. La répartition des différentes terres rares y est assez variable (gisement de Longnan très pauvre en néodyme par rapport à d'autres gisements de ce type par exemple). Ce type de minéralisation ne présente pas de radioactivité associée.

Les différentes terres rares ne se trouvent donc pas à parts égales dans les gisements. Tout d'abord parce que les minéraux présentent différentes concentrations en terres rares et ensuite parce que les gisements contiennent des proportions différentes de ces minéraux. Le gisement de Baiyun Ebo, à 135 kilomètres au nord-ouest de Baotou en Mongolie intérieure, est la première source de terres rares dans le monde (environ 40% de l'apport mondiale). Le gisement étant constitué de monazite et bastnaésite (Gupta & Krishnamurthy, 2005, p. 83), cela conduit à une plus grande disponibilité des terres rares légères que des terres rares lourdes au niveau mondial.

[122] Roche issue du même magma que le granite, mais présentant des cristaux d'une taille supérieure à 20mm

[123] Roche magmatique contenant au moins 50 % de carbonates.

[124] Mot venu du catalan *placel* (prononcer *placèr), place : accumulation de minerais exploitables dans une zone alluvionnaire

Annexe 3

Cadrage méthodologique et synthèse anonyme des entretiens réalisés

Rappel du contexte et des questions de recherche

La recherche vise à explorer les liens entre épuisement physique, augmentation des coûts réels de l'exploitation, et tendance des acteurs économiques à externaliser ces coûts. Les questions qui guident l'analyse des entretiens en toile de fond sont donc les suivantes : Y a-t-il un lien entre épuisement physique et augmentation des coûts ? Entre épuisement physique et transfert des coûts ? Entre la recherche de coûts bas, l'augmentation de la production d'une part et l'épuisement physique d'autre part ? Entre la recherche de coûts bas, l'augmentation de la production d'une part et le transfert de coûts d'autre part ? Existe-t-il des tendances contraires comme la prise en charge des coûts sociaux et environnementaux par les acteurs économiques ? Qu'est-ce qui favorise cette prise en charge ?

La diminution de la teneur étant un phénomène inéluctable sur le long terme dans le cadre de l'exploitation des ressources (voir le chapitre 1 de la présente thèse), ce phénomène ne peut être contrecarré par les acteurs que par une diminution de la production. Les principaux facteurs d'épuisement sur lesquels les acteurs ont une influence en termes d'épuisement sont donc : les volumes et la vitesse de production, les pertes de matières le long de la chaîne (l'efficience de la production), la part du secteur informel, et les freins et leviers pour l'utilisation des ressources secondaires (recyclage des produits en fin de vie, recyclage des déchets, meilleure conception des produits). Ce sont donc ces facteurs qui ont été abordés lors des entretiens et mis en lien avec l'organisation de la CGV.

Collecte de données

Dans le cadre de cette étude, une série de 27 d'entretiens a été menée auprès des acteurs (pouvoirs publics, industriels) et parties prenantes externes (ONG, académiques) de la chaîne du néodyme, depuis les mines de terres rares chinoises jusqu'à la fabrication des aimants Nd-Fe-B en Chine et au Japon. L'accent a été mis sur la partie amont de la chaîne, partie de la filière pour laquelle les informations sont le moins disponibles, avec des experts français et une investigation plus poussée menée en Chine et au Japon.

La majorité des entretiens a été menée en Chine et au Japon de juin à août 2016. La fonction des personnes interrogées dans l'industrie était généralement soit responsable des ventes, responsable de la production ou directeur général de l'entreprise. Jusqu'à 5 acteurs ont été vus en entretien par organisation. Ces entretiens ont pris la forme d'un échange semi-directif entre la doctorante, la personne interrogée, et parfois une traductrice ou un traducteur lorsque cela était nécessaire en Chine et au Japon. Ces entretiens individuels ont été conduits dans des temps variables allant de rendez-vous d'une heure à des journées entières dédiés à l'échange entre la doctorante et l'organisation actrice de la filière (rencontre avec directeur, visite d'usine, etc.).

Lorsque cela était accepté par la personne interrogée l'entretien a été enregistré sous format audio.

L'ensemble des entretiens ont été anonymisés. Lors de l'enquête de terrain en juillet 2016 des entretiens ont également été réalisés pour une étude menée sur la chaîne de valeur de l'antimoine. Ces entretiens ont permis d'avoir des informations sur des acteurs également présents dans la chaîne de valeur du néodyme. Deux entretiens sont utilisés pour compléter l'analyse CGV du néodyme. Ces entretiens font l'objet d'un degré d'anonymisation des données supplémentaires, le nom de l'organisation n'est pas donné, pour des raisons de confidentialité.

L'objectif de l'analyse est d'observer les effets de l'organisation de la filière sur les volumes produits, l'efficacité de la production (en termes de pertes ou de préservation de la ressource), et les freins et les leviers pour la mise en place du recyclage et de la récupération. Le point d'entrée dans la CGV est la production des aimants Nd-Fe-B et le point de vue des producteurs d'aimants est majoritaire dans les entretiens menés. Ainsi, les entretiens 1 et 2 menés en Europe ont permis de mieux cerner la chaîne de valeur des terres rares et de lister une série de questions à aborder relatives aux coûts sociaux de la CGV des aimants Nd-Fe-B et de leurs impacts sociaux et environnementaux. Plusieurs tentatives pour prendre contact avec les parties prenantes de la filière ont été effectuées depuis la France avant l'enquête de terrain : à travers des chercheurs en science sociale ayant effectué des enquêtes dans des zones situées dans l'ancrage géographique de la chaîne globale de valeur des terres rares (notamment Alexandra Cealis pour la Mongolie intérieure), à travers l'implantation de l'école centrale (aujourd'hui Centralesupélec) à Beijing, à travers certaines ONG et journalistes ayant réalisés des études sur le cas des terres rares en Chine (Greenpeace et RFI entre autres), à travers une organisation représentant les éleveurs mongols (SMHRIC) protestant notamment contre les exploitations minières. Ces tentatives n'ont pas débouché sur des prises de contacts directes avec les industriels ou les parties prenantes impactées par l'activité industrielle. Les entretiens 3 à 8 menés sur place avaient pour objectif de prendre des contacts avec les industriels de la chaîne et avec les autres parties prenantes. Si ces entretiens ont permis de mieux comprendre le contexte général de l'industrie chinoise et des problématiques rencontrées (maladie professionnelle des mineurs, sous-rémunérations, assurance sociale non payées, problème des travailleurs migrants, difficultés rencontrées par la société civile pour porter des revendications en particulier sur les conditions sociales, etc.), ces entretiens n'ont pas non plus permis de prendre des contacts directs dans le secteur des terres rares pour diverses raisons (sensibilité de la prise de contact avec les militants écologistes ou les travailleurs en dehors de Hong Kong, contacts trop généraux dans l'industrie, sensibilité de travailler sur les entreprises d'état, etc.). Les entretiens 9 et 10 ont été obtenus en contactant directement les industriels chinois du secteur avec l'aide d'une traductrice. Ces entretiens ont été déterminants pour obtenir d'autres RDV auprès des fabricants d'aimants, soit parce qu'ils ont directement mis en contact la doctorante avec d'autres industriels, soit parce que les entretiens obtenus ont permis durant l'enquête de terrain de faire valoir l'intérêt du travail de recherche auprès des autres industriels.

Ainsi, les entretiens (résumés dans le tableau ci-dessous) sont-ils le reflet de la volonté de rencontrer divers maillons de la chaîne (mineurs, séparateur, fabricants d'aimants, recycleur), d'interroger des acteurs de tailles diverses et dans diverses zones d'ancrage (notamment près des mines d'argiles ioniques et en Mongolie intérieure qui sont deux zones avec des impacts et des modes d'organisation bien distincts), mais également des opportunités qui ont été créées au gré des entretiens avec les industriels du secteur. Les opportunités ayant été limitées par divers facteurs que sont : le temps limité passé sur place (2 mois), la zone géographique considérable relative aux divers points d'ancrage de la chaîne de valeur, la difficulté à rencontrer des acteurs potentiellement porteurs d'un discours critique sur les activités industriels, la difficulté à investiguer la partie minière de la chaîne, la plus sensible. En effet, s'il a été possible de s'entretenir avec des responsables techniques de production sur la partie de la fabrication des aimants, aucune entreprise n'a accédé aux requêtes de visites des sites miniers ou de dialogue avec les responsables de la production minière.

Numéro d'entretien	Organisme	Catégorie d'acteurs	Pays
1	BRGM	Acteurs Externes	France
2	Solvay		Belgique
3	Ambassade de France en Chine (MAEDI)		France
4	City university of Hong Kong		Hong Kong
5	China Labour Bulletin		Hong Kong
8	School of Resources and Environmental Engineering		Chine
11	Baotou Solvay Rare Earth		Chine
21	Doshisha University		Japon
24	Ecosystèmes		France
25	MAEDI		France
26	Entretien anonyme		
27	Entretien anonyme		
10	Xiamen Tungsten (XTC)	Consortium minier	Chine
19	Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth International Trading (China Northern)		Chine
13	Baotou JinMeng Magnetics Material	Fabricant d'aimant intégré	Chine
23	Shin-Etsu Chemical		Japon
22	Tokyo Eco Recycle (Hitachi)	Fabricant d'aimant	Japon
9	Jiangxi YG Magnet		Chine
12	Baotou Jinshan Magnetic Material		Chine
16	Tianhe Magnets		Chine
20	Ningbo Yunsheng		Chine
6	Globalization monitor	ONG	Hong Kong
17	Chinese Society of Rare Earths, CSRE	Pouvoirs Publics	Chine
7	ACFTU		Chine
15	Baotou Research Institute of Rare Earths		Chine
14	Baotou xinyuan rare earth hi-tech and new material	Séparateur	Chine
18	Gansu Rare Earth New Material		Chine

Les thèmes abordés

Les questions suivantes ont été formulées pour les entretiens, et constituaient un guide d'entretien. Ce guide d'entretien est un point de repère auquel la doctorante s'est référée lors de la conduite des entretiens afin d'éclairer au maximum les questions de recherche. Les questions de la liste des thèmes à aborder ne constituaient en aucun cas des questions figées, certaines n'ayant pas été abordées ou d'autres ayant pu émerger au cours de l'entretien. Il n'est pas non plus un déroulé dont il faudrait respecter l'ordre chronologique, les différents sujets pouvant être abordés de façon différente selon les acteurs interrogés.

Quelques points importants ont été gardés en tête lors des entretiens :

- Pas de présupposé dans la formulation de la question, ni de question fermée ;
- Pas de formulation directe des questions de recherche ;
- Une question à la fois ;
- Privilégier le « comment » au « pourquoi » ;
- Relancer, encourager et demander à préciser - mais laisser aussi la place aux silences ;

Une série de questions ouvertes sur la question des coûts d'exploitation, de la structuration de la chaîne de valeur, des volumes et de la vitesse de production, des pertes de matières le long de la chaîne (l'efficience de la production), de la part du secteur informel, et des freins et leviers pour l'utilisation des ressources secondaires (recyclage des produits en fin de vie, recyclage des déchets, meilleure conception des produits) ont été posées.

Cependant les entretiens ont été principalement axés sur les questions de recyclage et d'organisation de la chaine de valeur. Lorsque le contexte le permettait, les questions concernant les coûts sociaux étaient abordées directement, ce qui n'est pas le cas de la plupart des entretiens avec les producteurs de terres rares et d'aimants comme la synthèse des entretiens présentée ci-après en témoigne.

Organisation de la chaîne de valeur

Quand et comment l'organisation (industrie, ONG, etc.) a-t-elle été créée/S'est-elle intéressée à la question de la production des terres rares/des aimants néodyme-fer-bore ? Combien êtes-vous à travailler dans la compagnie ?

Quelles étapes de la production concernent votre organisation? (mine, concentration, séparation des terres rares, affinage, production d'aimants)

<u>Pour les acteurs de la filière</u> :

Comment vous approvisionnez vous en matière première minérale? (*en interne, marché, etc.*)

Quelles ont été les évolutions récentes de la compagnie? (*en termes de production et en termes de ventes*)

Quelle est la capacité de production ?

Est-ce que les coûts de production augmentent ?

A quoi serve les aimants/le minerai que vous produisez ? (*plutôt dans l'automobile, l'électronique ?*)

A qui les vendez-vous? (*intermédiaire ou utilisateur ? Atelier de découpage d'aimants à Ningbo ?)*

Est-ce que vous exportez? Quelle proportion ?

Épuisement/Recyclage

Est-ce qu'une baisse des teneurs a été observée dans les mines ? Si oui est-ce que cela a engendré de plus grands coûts de production?

Quelles sont vos activités de recyclage, récupération ? (aimants, scrap, etc.)

Comment/à quel moment a été commencé le recyclage ?

Pour qui réalisez-vous ces opérations de recyclage ?

Où en est la recherche et le développement chinois/japonais sur le sujet du recyclage ?

Coûts sociaux

Environnementaux

Comment réduire l'utilisation d'énergie ?

Que faire pour lutter contre l'acidification?

Sanitaire

Que faire pour garantir la préservation de l'environnement autour des sites ?

Que faire pour lutter contre l'impact des métaux lourds/de la radioactivité autour des exploitations?

Conditions de travail

Est-ce qu'il existe des contrôles des conditions de travail dans les usines/mines ?

Comment s'effectue la prise en charge des maladies professionnelles ?

Secteur informel

Où en est la situation avec les mines de terres rares illégales au sud du pays? Quelles sont les autres dispositions mises en place par l'état pour lutter contre les exportations illégales?

Quelles sont les dispositions mises en place pour contrôler la contrebande liée à ces produits? Par qui ?

Quels systèmes de traçabilité sur l'origine du minerai?

Usage des terres

Quels étaient les activités des habitants de la région avant l'installation de l'activité (mine/traitement/fabrication d'aimants) ? Est-ce que ces activités ont persisté ? Quelles sont les relations avec la population locale ?

Comment se fait l'approvisionnement en eau de l'activité ?

Répression des conflits sociaux

Comment sont gérés les conflits entre les exploitants miniers/les fabricants d'aimants et les travailleurs ? Entre les producteurs et la population locale ?

Synthèse des entretiens réalisés

BRGM : Entretien 01

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif

Cadre : RDV sur lieu de travail

Date : 14/10/2015 et 17/05/2017

Identité organisation :

- *Nom : Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), direction des géoressources*
- *Informations contextuelles :* BRGM est un établissement public, il s'agit du **service géologique national** français. Cet organisme réalise de la recherche scientifique, de l'appui aux politiques publiques, de la coopération internationale, sécurité minière, formation (soutien à l'enseignement supérieur dans le domaine des géosciences). *Notamment dans son appui aux politiques publiques, le BRGM a pour mission de* contribuer aux politiques publiques relatives à l'approvisionnement en matières premières minérales primaires et au recyclage. La direction des géoressources travaille sur des contrats publics, des contrats de R&D, et des contrats privés
- Maillon de la chaîne : -
- Pays : France
- Lien avec autres acteurs : le BRGM fait partie avec entre autres la Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature (DGALN), du Comité pour les métaux *stratégiques (*COMES) lieu de concertation entre les acteurs français concernés par les questions d'approvisionnement de métaux critiques, issu du plan d'action métaux stratégiques engagé en 2010 et créé par le décret du 24 janvier 2011. Il a pour mission d'assister le ministre chargé des mines dans l'élaboration et la mise en œuvre de la politique de gestion des métaux stratégiques, en vue de renforcer la sécurité d'approvisionnement nécessaire à la compétitivité durable de l'économie.

Vision de la CGV néodyme :

- Molycorp : décision de réouverture lorsque les prix étaient haut, en essayant de sécuriser des ventes, fin 2015 en faillite.
- Opacité des marchés vient également du stockage des métaux, notamment par la Chine, mais également au sein du LME et aux Etats-Unis
- La distinction entre petit métal et grand métal vient aussi du fait que les petits métaux ne sont pas côtés en bourse et qu'ils se vendent par contrat direct avec les industries consommatrices.
- Le projet ASTER (Analyse Systémique des Terres Rares – flux et stocks, projet ANR visant à la caractérisation des flux de TR en union européenne) a pris fin
- Fabricants d'aimants/séparation Europe : Silmet fait un peu de séparation de TR pour les applications aimants. Ont été rachetés par Molycorp.
- TENEURS : à leur connaissance les teneurs de minerais de TR n'ont pas été compilées historiquement. Il serait possible d'avoir la teneur des monazites, mais pas des minerais. Il n'y a pas de risque d'épuisement à court terme.
- SEPARATION : France : extraction liquide-liquide à la Rochelle

Vision des enjeux :

Couts sociaux épuisement :

RECYCLAGE :

- Il y a un projet pour le développement du recyclage des aimants permanents au BRGM (c'est le projet Extrade)
- FREINS au recyclage :
    - L'exemple des luminophores avec Solvay montre que si l'on développe un procédé trop spécifique à un produit, le manque d'adaptabilité rend le projet fragile (marché luminophore effondré après un an de production de l'usine de recyclage à Lyon). Les industriels ont voulu faire de la préconcentration pour diminuer les quantités d'acide utilisées, suivi de l'utilisation de poudres mercurisées.
    - L'accès aux investisseurs est difficile pour des projets industriels : REMETOX a du mal à se faire financer.
    - Difficultés à remonter la chaîne : en France les divers projets de recyclage font l'étape de concentration et ensuite les concentrés sont envoyés ailleurs pour l'affinage (Aurubis, Umicore, Molybdène, Morphosis)
    - Une ACV a été faite sur le recyclage des aimants HDD et on travaille sur l'OPEX et le CAPEX d'un tel projet

Coûts sociaux sanitaires:

- RELANCE MINIERE EUROPE : le conseil d'état suédois a remis en cause le permis pour *Norra Kärr, car le gisement contient des actinides.*
- CHINE SUD : pas exclu qu'il y ait des actinides aussi.

Coûts sociaux secteur informel :

- Patrice Christmann a calculé pour les aimants permanents la masse totale de terres rares et a fait le différentiel avec la masse officielle pour en déduire la part du secteur illégal

Propositions / actions pour améliorer l'épuisement dans la filière du néodyme :

- Le développement d'une mine en Suède reste très hypothétique. Aujourd'hui plutôt compromis.

Solvay : Entretien 02

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif

Cadre : RDV sur lieu de travail

Date : 18/01/2016

Identité organisation :

- *Nom : Solvay*
- *Informations contextuelles :* Acteur industriel européen ayant un savoir-faire sur le traitement des terres rares.
- Maillon de la chaîne : Externe. En effet, Solvay au moment des entretiens était impliqué dans des industries consommatrices de terres rares, mais pas dans la production d'aimants Nd-Fe-B.
- Pays : Belgique, mais filiale en France, sites en Chine.
- Lien avec autres acteurs : Solvay est un acteur industriel majeur des terres. Ils collaborent avec Lynas. L'entreprise a fait partie du COMES.

Vision de la CGV néodyme :

Verrou technologique :

- La technologie de l'extraction liquide/liquide n'est pas nouvelle. Chez Solvay, la voie nitrate a commencé à être développée dans les années 1970 et les derniers développements ont eu lieu dans les années 1990. Solvay maîtrise deux technologies de séparation des terres rares liquide/liquide :a) voie chlorure b) voie nitrate.
- La voie chlorure est utilisée par tous les acteurs chinois et la plupart des acteurs ayant redémarré hors-Chine
- La voie nitrate est maîtrisée uniquement par Solvay à la Rochelle, et pour les terres rares légères à Silmet en Estonie. La Rochelle est en capacité de faire une séparation complète avec la voie nitrate sur son site.
- Mais aujourd'hui, la séparation ne peut plus être utilisée hors de Chine, à part Solvay (et un peu Silmet), car il n'existe plus de spécialistes en dehors de ce pays, car les chercheurs ont arrêté les recherches sur le sujet dans les années 1990. Donc tout le monde doit travailler soit avec la Chine ou avec Solvay pour la séparation de terres rares.

Liens avec les autres acteurs

- Les opérations de séparation étaient menées par Solvay à Baotou (Baotou Solvay Rare Earth Co. Ltd) et Liyang (Liyang Solvay Rare Earth New Materials Co.,Ltd) avec la voie Chlorure. Baotou Solvay Rare Earth a arrêté la séparation en 2007, mais Solvay a maintenu une *joint-venture* pour la production de poudre de polissage. Liyang Solvay Rare Earth a arrêté la séparation en 2015, mais Solvay a maintenu la JV pour la production de catalyseur, d'application utilisant la luminescence, et autres petits usages (*e-ceramics* par exemple). Les oxydes de terres rares séparées sont donc achetés par Solvay aujourd'hui.
- En janvier 2016, Solvay n'avait pas d'accord de *tolling* (traitement de minerai pour une autre entreprise). Ce service est proposé à des juniors minières.

Réglementation étatique chinoise

- Le passage d'une taxe d'exportation à une taxe au producteur n'avait rien changé en janvier 2016 pour Solvay : le prix des oxydes de terres rares n'avait pas augmenté que ce soit sur les terres rares lourdes ou légères
- Nord/Sud : que des terres rares légères (au Nord), au sud des terres rares légères et lourdes mais la part de la provenance du néodyme venant du sud est négligeable. Dans la filière des aimants le sud est intéressant en regard du dysprosium.

Vision des enjeux :

Coûts sociaux épuisement :

Recyclage

- Principal frein au recyclage en général : le prix bas des matières premières est un vrai frein au recyclage. Le recyclage des TR dans les lampes Solvay a été arrêté car pas compétitif par rapport à l'apport primaire
- Pour les aimants : (étude complète de l'économie du recyclage des aimants réalisée par Solvay)
  1) La dispersion à l'étape des recycleurs
     - La dispersion des aimants dans les gisements actuels en fin de vie : 2 gisements principaux : véhicules en fin de vie + produits électroniques. Les recycleurs ne sont pas incités à concentrer ces produits. Les aimants se retrouvent en général dans les produits ferreux auxquels ils sont aimantés. Ils se retrouvent chez les sidérurgistes (essentiellement dans *laitiers* d'aciérie).
     - Si on veut recycler des aimants le gisement provenant des recycleurs étant dilué on doit payer pour le traitement d'un produit dilué avec des teneurs faibles (comme un minerai)

2) Valeur intrinsèque des produits à recycler (in situ value) est liée à la teneur globale en terres rares (citées ci-dessus), mais aussi à la valeur en dysprosium. En fonction de la teneur en dysprosium le recyclage peut être rentable ou non. Or cette teneur varie énormément et on ne connaît pas par avance la valeur moyenne en dysprosium. Or la teneur moyenne est relativement basse et impacte la rentabilité du recyclage.

- Pour les aimants, la valeur de l'efficacité du recyclage de 55% citée dans (Binnemans et al., 2013, p. 18) pour le recyclage des aimants en 2020 semble pessimiste pour Entretien 002. D'un point de vue purement technique en pyrométallurgie ou hydrométallurgie dans le recyclage d'aimants en terres rares on est au-dessus de 90% de récupération de terres rares (tous les essais de Solvay notamment). Après c'est un problème de coûts. Peut-être que l'auteur veut dire d'aimants à aimants alors les pertes sont peut-être plus importantes.

Coûts sociaux secteur informel :

- La référence sur ce sujet est Dudley Kingsnorth. Ses chiffres sont discutables (comme tous les chiffres sur le secteur informel), mais ils sont sourcés.
- De manière incertaine : il y aurait lutte entre le pouvoir centrale et les pouvoirs locaux (emploi). Les productions et les exports illégaux ne seraient pas que dans le sud, mais peut-être que les grandes productions participeraient également au commerce illégal.
- La volonté du gouvernement chinois de lutter contre le commerce illégal semble réelle. Des mines sont régulièrement fermées.
- On peut faire l'hypothèse que l'implantation du secteur informel est liée à des caractéristiques du gisement : plus implanté dans le sud parce que gisement secondaire surfacique (petits gisements) + les argiles ioniques peuvent être exploités avec une chimie relativement simple

Coûts environnementaux :

- Les impacts environnementaux dans le sud de la Chine viennent de la mauvaise mise en place de la lixiviation *in situ*. Historiquement la lixiviation en tas (*heap leaching*) était utilisée (simple à faire avec des excavatrices), mais a été interdit par les autorités, du fait de son impact paysager. Cette décision privilégie le paysage sur la sécurité et les impacts sanitaires, car la lixiviation en tas est plus facile à contrôler (les effluents peuvent être drainés plus facilement). De plus la sécurité pour les travailleurs est meilleure avec le heap, car on utilise un sel et non pas un acide.
- Il est sûrement possible de faire du *in situ* respectueux de l'environnement avec une bonne imperméabilisation et une réhabilitation (avec passage de l'eau après l'exploitation), mais il faut une étude hydrogéologique et ce n'est pas simple.

Propositions / actions pour améliorer l'épuisement dans la filière du néodyme :

<u>Regroupement de transformateur/constructeur de l'aval de la filière investissant dans une filière de recyclage</u>

- Quand il y a une tension sur les matières premières comme en 2010-2012, l'investissement dans l'amont de la filière est un mouvement qui se fait. Notamment en Inde, il existe une JV entre Toyota Tsusho Corporation et Indian Rare Earth, dont le but est de récupérer les terres rares produites à partir de la mine pour Toyota [voir (Toyota Tsusho Corporation, 2015) et « En Inde, l'unique acteur est une compagnie étatique : Indian Rare Earths Ltd (IREL) via plusieurs filiales […] production de concentrés de monazite, transformés sur place en chlorures de Terres Rares. […] estimations de [production de] l'USGS et de Roskill

sont divergentes. Pour l'USGS, la production en 2014 serait de 3 000 t OTR (Gambogi, MCS 2015). Selon Roskill, seules 500 t OTR et 750 t OTR auraient été produites respectivement en 2011 et 2012, et les exportations de Terres Rares indiennes seraient inférieures à 100 t d'OTR depuis 2013 (Roskill, 2015). […] Un accord de coopération économique entre l'Inde et le Japon (piloté par le JOGMEC […]) a permis le lancement de la construction d'une nouvelle usine de traitement des Terres Rares dans l'état d'Odisha. Dès l'achèvement de cette construction, l'accord prévoit qu'une partie de la production (2 500 t OTR/an) sera destinée à alimenter directement plusieurs industriels japonais (Toyota Tsusho Corp. et Shin-Etsu principalement). »(BRGM, 2015)]. Il y a déjà eu des accords entre Siemens et Lynas, et également entre Siemens et Molycorp.

- Enfin, il y a déjà eu un regroupement d'utilisateurs finaux en Allemagne via la Rohstoffallianz [évoqué dans (Kooroshy, Tiess, Tukker, & Walton, 2015)]. Lorsqu'un regroupement de ce type se forme, est bien sûr envisagé l'approvisionnement en recyclage, mais celui-ci se heurte toujours à la question des coûts.
- Seul acteur européen avec une vision de long terme qui est prêt à payer un coût un peu plus élevé (un certain premium) pour assurer son approvisionnement, c'est Siemens.

<u>Développement des filières de terres rares</u>

- Pour la Chine, le procédé de séparation des terres rares (et le reste de la filière) a été mis en place par des instituts de recherche étatiques. C'est pour ça que c'est le même partout. Quand nous avons racheté Liyang, la JV était avec des universitaires
- Le monopole de la Chine dans les années 1990 est attribuable au bas prix
- Il y a bien une incapacité de l'Europe et des Etats-Unis à faire des projets industriels de long terme. Le fait que la seule initiative de remonter la chaîne soit une initiative japonaise, les acteurs japonais étant par ailleurs encore des producteurs d'aimants, le montre bien. Pour l'instant la volonté de la commission européenne de vouloir agir sur ces questions d'approvisionnement reste sans suites.

<u>Coût total : promotion du recyclage ?</u>

- Probablement qu'un coût total favoriserait le recyclage

<u>*Le développement de mine en Europe*</u>

- Le développement d'une mine en Suède reste très hypothétique. Aujourd'hui plutôt compromis.

Ambassade de France en Chine (MAEDI) : Entretien 03

Type de récolte d'informations : Entretiens semi-directif avec un conseiller économiques et 3 attachés de coopération en français

Cadre : RDV sur site : ambassade de France à Beijing, Chine

Date : 30/06/2016

Identité organisation :

- *Nom : Ambassade de France en Chine*
- *Informations contextuelles :* Etablissement public français.
- Maillon de la chaîne : Externe
- Pays : France (pays d'entretien Chine)
- Lien avec autres acteurs : *rattachée au* ministère des affaires étrangères et du développement international (MAEDI)

Vision de la CGV néodyme :

- N'ont pas travaillé sur les aspects miniers en revanche avec des acteurs français présents en Chine et impliqués dans la filière des aimants en aval : Renault et PSA. Ces acteurs sont présents en Chine notamment pour avoir accès au marché chinois.

- L'ambassade est également en contact avec l'équipementier Valeo.
- La création de grands consortiums en Chine a également pour but d'investir à l'étranger.
- Le plan china 2025 donne des objectifs très précis de parts de marché

Vision des enjeux :

Coûts épuisement

- La réflexion sur l'environnement et l'épuisement des ressources existe chez les autorités chinoises

Coûts sociaux ;

- Les entreprises et autorités chinoises ont organisé un forum de la RSE des entreprises minières chinoises en Afrique en décembre 2015
- Le recyclage de l'électronique dans le sud de la Chine a toujours lieu dans des conditions déplorables. Ce sont des opérations réalisées par des petits entrepreneurs locaux
- La surveillance chinoise de la contestation s'est durcie, une nouvelle loi devrait rentrer en œuvre en janvier 2017 sur les ONG étrangères. Toutes les ONGs étrangères doivent s'enregistrer auprès du bureau de la sécurité publique. Ce durcissement date de 3 ans, ce durcissement semble correspondre à une peur plutôt qu'à des faits. On ne peut pas dire qu'il y ait un lien de causalité avec le mouvement des parapluies à Hong Kong. Le printemps arabe semble être plus en cause.
- Les ONGs telles que WWF et Green Peace sont souvent en porte à faux avec les associations chinoises de terrain
- Les revendications des populations passent souvent par des questions environnementales, parce qu'il n'y a pas de voie aujourd'hui pour exprimer une contestation sociale

City university of Hong Kong : Entretien 04

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif en anglais

Cadre : RDV lieud de travail

Date : 08/07/2016

Identité organisation :

- *Nom : City university of Hong Kong*
- *Informations contextuelles :* recherche sur les conditions de travail des mineurs dans le charbon
- Maillon de la chaîne : Externe
- Pays : Chine, Hong Kong
- Lien avec autres acteurs : pas de lien

Vision CGV

- La tension entre l'état centrale légiférant et les provinces ne respectant pas les lois a été remise en question par des études en sciences politiques. En effet, il peut être montré à l'inverse que le gouvernement central utilise la flexibilité des provinces depuis Mao, en laissant les initiatives prospérer pour faire des expérimentations. On peut notamment remettre en question la théorie de gouvernements provinciaux rétifs car les gouvernements provinciaux sont sous pression de la part du gouvernement centrale, notamment pour les chiffres de l'emploi. Les gouverneurs provinciaux sont affectés souvent à différentes régions

afin de ne pas développer de fidélité à la province. De plus, il y a de nombreuses visites de lutte contre la corruption.

- Le gouvernement chinois a peur des travailleurs. C'est notamment pour cela que la loi sur le financement des ONGs est mise en place. Le but est de faire fermer les associations. A Hong Kong récemment des ONG ont fermé, notamment sur les conditions de travail.

Vision des enjeux :

Coûts sociaux conditions de travail :

- Une des grandes problématiques du travail dans les mines est le problème des travailleurs migrants (venant d'autres localités en Chine). Ces travailleurs sont inexpérimentés et réalisent un travail dangereux, ce qui a également un impact sur le nombre d'accidents. Les migrants sont engagés par des agences. Ces agences se sont enrichies. Les services de ces agences ont notamment été utilisés par l'état, ce qui diminue les chiffres de l'emploi des travailleurs migrants par les services d'état.
- Il n'y a pas de réelle organisation syndicale en Chine l'ACFTU étant une organisation d'état, qui vise notamment à empêcher une réelle syndicalisation des travailleurs.
- Il n'y a pas de syndicats qui se battent sur la question des maladies professionnelles
- Pour le respect des horaires de travail, la personne interrogée a pu voir des contrats avec 100 heures de travail approuvé par le bureau local, alors que la loi limite le travail à 36h.

Secteur Informel :

- Le gouvernement essaye de fermer les mines illégales.
- Les travailleurs migrants sont également nombreux dans les mines illégales
- Les propriétaires de ces mines essayent de dissimuler les accidents miniers.

CLB : Entretien 05

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif en anglais

Cadre : RDV sur lieu de travail

Date : 08/07/2016

Identité organisation :

- *Nom : China Labour Bulletin (CLB)*
- *Informations contextuelles :* Le China Labour Bulletin est une organisation non gouvernementale qui a pour but de promouvoir et défendre les droits des travailleurs en Chine. Elle est basée à Hong Kong et a été fondée en 1994 par le militant syndical Han Dongfang. Entre autres activités, ils initient des enquêtes de terrain sur des conditions de travail par des journalistes et depuis décembre 2014, le *China Labour Bulletin* comptabilise les accidents industriels en Chine, à partir des données publiées par la presse locale chinoise. La personne interrogée est journaliste, auteur d'article sur les mines possédant des connaissances générales sur le fonctionnement de la prise en charge des maladies professionnelles et du droit du travail.
- Maillon de la chaîne : Externe, ONG
- Pays :Chine, Hong Kong
- Lien avec autres acteurs : Entretien 04 reconnaît la qualité de leur travail et travaille parfois avec eux.

Vision des enjeux :

Coûts sociaux sanitaires:

- La plupart des travailleurs ne sont pas au courant qu'ils ont le droit de demander des compensations, s'ils le savent ils n'osent pas demander de compensation pour les maladies professionnelles et n'en obtiennent pas lorsqu'ils en demandent.
- La plupart des maladies professionnelles ont des effets irréversibles
- Les hôpitaux spécifiquement professionnels pour la prise en charge des maladies professionnelles travaillent contre les travailleurs et font de mauvais diagnostics et sont sous-équipés. Il n'y a par exemple pas de bons diagnostics pour le cancer.
- Il existe des associations chinoises de charité qui lèvent de l'argent pour soigner la pneumoconiose
- Les travailleurs s'organisent parfois pour mettre en place un système d'entraide : mutuelles.

Secteur informel

- Il y a des alliances entre les officiels locaux et la « mafia » industrielle qui gère les mines illégales

Conditions de travail/répression des mouvements sociaux

- Pas de vrai syndicat dans les mines. Seulement l'ACFTU
- Les ONGs comme CLB évoluent en contexte dangereux. En juillet 2016, ils envoyaient des personnes sur le terrain en Chine continentale avec parcimonie, car le risque pour les personnes de se faire arrêter était réel.

Concernant le cas de Zhu Xiaomei et d'*Hitachi Metals Panyu Factory*

- Zhu Xiaomei a été licenciée pour avoir tenté de mettre en place un syndicat et a gagné avec l'ACFTU qui l'a aidé en portant plainte contre l'usine. Depuis 10 ans elle travaille dans le Panyu Worker Center pour essayer de faire de la formation syndicale. Elle a été mise en prison, elle passe en juillet devant la cour.
- L'aide d'ACFTU s'est fait dans un autre contexte politique. De 2013 à 2016 il y a eu un changement de politique. Il y a une relation compliquée entre l'ACFTU et le gouvernement, les syndicats permettent la médiation et éviter la violence. Cela permet de rassembler de l'argent pour le gouvernement local. Mais le gouvernement central a peur que la contestation prenne de l'ampleur.

Globalization monitor : Entretien 06

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif en anglais

Cadre : RDV à l'extérieur

Date : 11/07/2016

Identité organisation :

- *Nom :* Globalization monitor
- *Informations contextuelles :* Globalization Monitor est une organisation à but non lucratif basée à Hong Kong. Elle a été fondée peu de temps avant la grande manifestation de Seattle contre l'OMC en 1999. Les membres de son comité de rédaction sont des militants des syndicats, du mouvement vert, des groupes régionaux et des organisations populaires. C'est la principale organisation à Hong Kong à se consacrer à la sensibilisation aux effets néfastes de la mondialisation à travers des rapports et du soutien juridique aux travailleurs. Elle compte 5 salariés et 4 groupes de soutien bénévoles
- Maillon de la chaîne : Externe, ONG
- Pays : Chine, Hong Kong
- Lien avec autres acteurs :

Vision des enjeux :

Secteur informel

- Les mines illégales : de nombreux travailleurs migrants réalisant du travail dangereux.
- Il est difficile de rentrer en contact avec les travailleurs. On essaie à travers des réunions avec des syndicats ou avec des académiques, mais en ce moment les conditions politiques sont mauvaises donc souvent les travailleurs ne veulent pas parler. Ce sont des zones rurales reculées où les ONG sont considérées comme des étrangers.
- Il reste encore pas mal de mines illégales, mêmes si de nombreuses ont été fermées. Pour le charbon, dans les mines privées il a même été constaté du travail forcé avec des prisonniers.

Conditions de travail

- Même quand des victoires sont gagnées par les travailleurs comme chez Honda, souvent les gains se perdent quand les activistes partent (à la retraite, ou licenciés).
- Le plus grand problème pour les conditions de travail aujourd'hui est l'assurance sociale. Pour avoir une retraite il faut avoir cotisé 18ans, or souvent les entreprises ne cotisent pas. Les salariés n'ont donc pas de retraite (comme par exemple chez Uniqlo).
- Il y a également la sous-rémunération
- Et les maladies professionnelles : en général les travailleurs n'obtiennent jamais la copie de la visite annuelle médicale obligatoire et obtiennent des compensations bien plus faibles que ce que demande la loi chinoise.

Répression des mouvements sociaux

- Le travail des ONGs cite principalement des multinationales car le travail sur les SOE (*state-owned enterprise*) est trop sensible. Les personnes ayant essayé de travailler sur les dirigeants des SOE sont immédiatement arrêtés.
- Greenpeace a eu des difficultés en Chine après une manifestation. Ils avaient travaillé sur PetroChina
- Toutes les ONGs sont sous surveillance.

Propositions / actions pour améliorer l'épuisement dans la filière du néodyme :

- Il y a de nombreuses lois en Chine pour la protection des travailleurs (santé, sécurité, etc.). Le problème c'est l'application qui ne se fait pas. Notamment les gouvernements provinciaux sont proches des investisseurs et de la police. La stratégie de Globalization Monitor face à cela : 1) faire respecter la loi via les organisations de travailleurs 2) Faire des rapports pour demander une chaîne de valeur responsable aux multinationales. L'efficacité de cette deuxième stratégie dépend de l'image de marque de l'entreprise (par exemple avec Uniqlo c'est très peu efficace, avec Adidas plus). Dans les deux cas on a besoin des témoignages des travailleurs

ACFTU : Entretien 07

Type de récolte d'informations : Entretien par courriel

Cadre : par mail

Date : 15/07/2016

Identité organisation :

- *Nom : la* personne interrogée est membre de l'ACFTU et de l'Université de Changsha

- *Informations contextuelles :* professeur travaillant sur les maladies respiratoires et dans son temps libre elle fait du bénévolat pour l'ACFTU sur les maladies professionnelles. ACFTU est une organisation syndicale officielle proche de l'état chinois.
- Maillon de la chaîne : Externe, académique, pour l'université de Changsha et pouvoirs publics pour l'ACFTU
- Pays : Changsha, Hunan, Chine
- Lien avec autres acteurs : ---

Vison des enjeux
Coût social :
PNEUMOCONIOSE

- Beaucoup d'industries provoquent la pneumoconiose, pas que les mines. Les secteurs les plus problématiques sont : les mines souterraines, surtout les mines de charbon, les carrières à ciel ouvert et la construction. Parmi les secteurs en lien avec les métaux : les mines métalliques, l'industrie sidérurgique, la joaillerie.

- Les mines sur lesquelles la personne interrogée travaille le plus sont les petites mines de charbon et quelques mines de métaux non ferreux dans le Hunan.

- La personne interrogée a travaillé sur 300 patients affectés de pneumoconiose. Le nombre de personnes infectées est de 60 milles dans le Hunan (se réfère aux données de la NHFPC, la Commission Nationale de la Santé et du planning familial, rapport annuel des maladies professionnelles) et 700 milles en Chine. Une augmentation annuelle de 20 000 milles en Chine. Elle a aussi dit que beaucoup de patients n'ont pas de bilan de santé, et le chiffre est sans doute plus important dans la réalité. Mais il n'y a pas de recensement national jusqu'à aujourd'hui, tout statistique étant donné par les centres de contrôles de maladies régionaux.

- Sur les différences de pratiques de protection entre différentes mines : très peu de protection dans les mines de charbon privées. Dans les grandes mines étatiques les équipements sont assez bons, mais la personne interrogée est surtout allée dans les mines privées ou de petites mines étatiques Dans les petites mines, les équipements de ventilation et contre la poussière sont mauvais. Il n'y a pas de protection individuelle contre la pneumoconiose : les masques sont des masques en gaze, pas de masques professionnels contre la poussière. Certaines mines n'ont pas de masque du tout.

- N'a pas pu constater les conditions dans les mines illégales

Propositions / actions pour améliorer l'épuisement dans la filière du néodyme :

Pour la prévention, la personne interrogée pense qu'il faut que les entreprises prennent l'initiative, et assument leurs responsabilités. Selon les régulations, il faut avoir des équipements de protection et des moyens de protection de la santé pour les ouvriers. Elle pense qu'il faut établir une archive, faire un bilan de santé avant chaque mission et le noter. Le syndicat est très important, il faut qu'il surveille l'entreprise et qu'il fasse les recommandations. Il faut ajouter la sécurité et la santé professionnelle dans les négociations entre l'entreprise et le syndicat. Il faut intégrer les ouvriers en première ligne de la production dans le groupe de surveillance de la sécurité pour mettre la pression à l'intérieur de l'entreprise. De l'extérieur, il faut que le gouvernement augmente sa surveillance sur la sécurité de chaque entreprise. Actuellement, ce n'est pas le cas. Il faut une surveillance absolument contraignante. Les entreprises au-dessus du seuil de sécurité pour les poussières dangereuses doivent être fermées. Il faut mettre en place des mesures de sanction.

School of Resources and Environmental Engineering : Entretien 08

Type de récolte d'informations : Entretien par courriel

Cadre : par mail, contacté lors du passage par le Jiangxi

Date : 17/07/2016

Identité organisation :

- *Nom : School of Resources and Environmental Engineering*
- *Informations contextuelles :* Contacté à la suite de la lecture concernant les conséquences de l'exploitation des terres rares dans le sud de la Chine sur les glissements de terrain. Ses domaines de recherche principaux sont la prévention des catastrophes géologiques, l'ingénierie des fondations ainsi que l'ingénierie des forages de puits en profondeur.
- Maillon de la chaîne : Externe, académique
- Pays : Chine, Jiangxi
- Lien avec autres acteurs :

Vision de la CGV néodyme

- Exploitation des mines de terres rares dans le sud : depuis les années 1980, l'exploitation de mines de terres rares de type argiles ioniques a connu trois processus de lixiviation différents : en bassin [*vat leaching*], en tas [*heap leaching*] et lixiviation *in situ*. Maintenant la lixiviation in situ est majoritairement utilisée pour l'exploitation des argiles ioniques

- Les principes des procédés de lixiviation en bassin et en tas sont similaires. Un bassin en ciment est utilisé comme une cuve de lixiviation (pour la lixiviation en bassin) ou une zone pour pratiquer la lixiviation en tas, les terres rares sont emportées par un agent de lixiviation et le liquide enrichi est précipité à l'aide d'un acide oxalique ou un produit similaire.

- Le procédé de lixiviation in situ injecte la solution de lixiviation dans le gisement minéralisé souterrain à travers des puits d'injection placés à intervalles réguliers (cadrillage). Le lixiviat adsorbe les ions de terres rares pour former une solution mère. Les terres rares sont précipitées par de l'acide oxalique.

- Jiangxi et Fujian possèdent des mines de terres rares et sont sujettes à de nombreux glissements de terrain dans la zone d'extraction de terres rares, auxquels s'ajoute l'influence du liquide de lessivage et l'effet des précipitations sur les glissements de terrain. Pas de statistiques sur le nombre de glissements de terrain spécifiques à la zone d'extraction des terres rares. Il n'a pas estimé le coût de ces glissements de terrain, mais leur gestion a un coût élevé.

- L'étude sur la stabilité des talus miniers dans les zones minières est en effet très importante, et est principalement menée par les instituts de recherche tels que les universités. Les entreprises de production de mines de terres rares n'étudiant que rarement la stabilité des talus en raison de leurs responsabilités professionnelles. La plupart d'entre elles font des constructions basées sur l'expérience.

Vison des enjeux

Coût environnemental

- La lixiviation in situ est susceptible de provoquer des glissements de terrain en raison de la lixiviation de minéraux dans le sol. Cependant la lixiviation in situ provoque moins de glissements que les deux processus précédents.

- En raison de l'impact écologique relativement faible du processus de lixiviation in situ, le processus de lixiviation in situ est souvent utilisé pour extraire le minerai de terres rares. En effet ce processus ne nécessite pas d'enlever la végétation et la majeure partie du sol arable de la zone minière, ce qui peut facilement endommager l'écosystème montagnard et entraîner de fréquentes catastrophes géologiques telles que glissements de terrain, glissements de terrain et érosion des sols.
- Les glissements de terrain ne sont pas dus uniquement à l'exploitation minière.

Jiangxi YG Magnet : Entretien 09

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif, brève partie avec traductrice puis en anglais.

Cadre : usine de fabrication d'aimants) à Ganzhou, Jiangxi, Chine

Date : 18/07/2016

Identité organisation :

- *Nom : Jiangxi YG Magnet*
- *Informations contextuelles :* PDG et responsable des ventes internationales
- Maillon de la chaîne : Fabricant d'aimants
- Pays : Jiangxi, Chine
- Lien avec autres acteurs :

Vision de la CGV néodyme :

- INTEGRATION : le PDG affirme que YG Magnet travaille sur toute la filière des mines à la fabrication des aimants. Cependant, la responsable des ventes affirme que l'entreprise n'est pas concernée par les techniques d'exploitation minière puisqu'ils achètent les alliages de métaux déjà séparés.
- EXPLOITATION MINIERE DANS LE SUD : La responsable des ventes affirme que l'exploitation minière se fait à l'aide de bassin (contrairement à l'entretien 8 donc).
- FOURNISSEUR : ils achètent les terres rares à deux grosses entreprises qui font la séparation localement : GanZhou QianDong Rare Earths Group Co.,Ltd/虔东稀土集团股份有限公司/http://www.jxgqd.com/En/ un des 6 consortiums, et Ganzhou Chenguang Rare Earths New Material Co.,Ltd/ 晨光稀土新材料有限公司/http://www.gzcgxt.com/en/ [125]
- MARCHE DES TR : il existe deux plateformes en ligne chinoise pour les clients pour s'informer sur les prix : Bohai Zhengkuan (« Bohai Securities », 2018) et YaZhou Jinrong (« Asia Financial Group », 2018). Ces plateformes ont surtout un rôle d'information, car YG Magnet s'approvisionne directement chez le fournisseur.
  AIMANTS :
- De 2006 à aujourd'hui ils sont passés d'une centaine de tonnes à 1000 tonnes d'aimants. Grâce à une plus grande productivité et planification.
- Il y a eu un changement technique aussi vis-à-vis de la qualité demandée (orientation vers l'automobile). Les entreprises non étatiques comme eux tâtonnent depuis 10 ans, ils sont en formation continuelle.
- Leur site compte 350 employés, *smelter* de capacité 600kg

[125] Filiale de Shenghe Resources Holding Co., Ltd. Shenghe appartient à 18% à l'état et 1% à China Northern. Ganzhou Chenguang Rare Earths New Material Co.,Ltd un des deux grands fournisseurs de terres rares du Jiangxi d'après l'entretien avec YG Magnet. Shenghe travaille également avec CHALCO (=Chinalco? Dans le Sichuan) d'après leur site. Ganzhou Chenguang Rare Earth New Material Co., Ltd (Ganzhou Chenguang) produit des OTR, des TR metal et des alliages.

- Composition : 30% TR, 70% Fe, 1% Bore

CLIENTS

- YG Magnets vend préférentiellement directement aux clients, mais passent parfois par des traders. Le passage par des traders se fait souvent à la demande des clients pour deux raisons principales : 1) les traders assument la responsabilité en cas de problème 2) ils ont une proximité culturelle (la langue notamment) et géographique avec le client
- Le marché chinois s'oriente vers l'automobile et les escalators. Il y a aussi les climatiseurs.
- Une part très faible de vente pour les éoliennes
- Une grande part des ventes chinoises d'aimants est à destination de l'étranger (d'après la responsable des ventes environ 80%), les américains par exemple consomment beaucoup de climatiseurs. La présence de JV avec des entreprises étrangères consommatrice d'aimants en Chine augmentent les ventes d'aimants sur le territoire chinois. Mais ça ne veut pas dire que le produit final n'est pas destiné à l'étranger.
- YG Magnet vend souvent aux équipementiers.
- 70% des aimants passent par Ningbo, exemples d'entreprises : Geely Auto [le troisième fabricant chinois de voiture] à Ningbo et Ningbo Jinji Strong Magnetic Material Co., Ltd
- Les entreprises de Ningbo travaillent surtout dans le découpage d'aimants, il existe une centaine d'entreprises avec une ou deux personnes. YG Magnet produisent des blocs d'aimants et Ningbo fait la forme de ces aimants. YG magnet envoie généralement le surplus de productivité, ce qui n'est pas vendu pour les climatiseurs chez les découpeurs d'aimants à Ningbo sous forme de blocs.
- YG magnet vend aussi dans le Shandong et à Shanghai, également des entreprises qui découpent des aimants.
- La province du Jiangxi se concentre de plus en plus sur la vente aux utilisateurs finaux

CRISE DES TR ET TECHNOLOGIE ALTERNATIVE

- En 2011 certains clients ont pu passer à la ferrite. Le PDG ne pense pas que le prix remonte à moyen terme, mais même maintenant que les prix ont chuté certains clients continuent de s'inquiéter.
- Cette crise a amené à la création des 6 consortiums et le gouvernement a fait des stocks
- En 2011, il y a eu la fermeture généralisée de toutes les petites mines risquées et illégales. La fermeture de ces mines n'a pas eu de conséquence pour YG Magnet qui ne s'approvisionnait pas chez les petits.

Vision des enjeux :

Coûts sociaux épuisement :

RECYCLAGE

- Des personnes ou des entreprises privées se dédient spécifiquement à la récupération des chutes de production à Ningbo (swarfs)
- YG Magnet ne s'approvisionnent pas directement chez les recycleurs
- La rentabilité du recyclage dépend de la teneur en terbium et dysprosium (terres rares lourdes). Comme le prix des terres rares devrait être stable les prochaines années, ils préfèrent travailler directement à diminuer les coûts économiques de la production.
- Il a été envisagé de travailler avec une entreprise américaine pour recycler des aimants afin de produire des aimants liés. Mais la technique n'en est qu'à ses débuts donc cela pose encore des questions de fiabilité.
- Ne connaissent pas d'entreprises qui recyclent les swarfs [donc ne font probablement pas de récupération]

Observation visite d'usine :

- Pas de stockage de swarf

Xiamen Tungsten : Entretien 10

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif avec traductrice

Cadre : RDV au siège à Xiamen, puis visite d'usine de Longyan Rare Earth Industrial Park près de Changting.

Date : 20/07/2016 et 21/07/2016

Identité organisation :

- *Nom : Xiamen Tungsten (XTC), filiale Fujian Changting Golden Dragon Rare-Earth Co., Ltd*
- *Informations contextuelles :* XTC fait partie des 6 consortiums chinois en charge d'intégrer la filière et d'ordonner l'exploitation des terres rares. 5 personnes différentes ont été interrogées : PDG de la filiale de Fujian Changting, responsable des ventes et vendeuse du département des oxydes de TR, responsable de la production métallurgique des TR métaux, responsable marketing
- Maillon de la chaîne : depuis la mine jusqu'à la fabrication d'aimants
- Pays : Chine
- Lien avec autres acteurs : Vendent et achètent des produits à chaque étape de transformation

Vision de la CGV néodyme :

- PRODUCTION :
  - 2016 : traitement de 5000 tonnes d'OTR par an [à l'entrée du procédé] et de 2000 tonnes de TR métal [selon Guyonnet et al. TR métal=0,85 OTR cela ferait 5000t de OTR = 4250t de métal : plus de la moitié est donc revendue sous forme OTR].
  - En 2012, ils produisaient 3000 tonnes d'aimants Nd-Fe-B. XTC veut doubler cette production (6000 t).
  - 2009 : commence la production minière en rachetant une vielle licence qui produit 200 tonnes d'OTR, puis ouverture d'une usine de traitement par an depuis, donc en 2016 : 7 usines de traitement (vraisemblablement de traitement chimique), jusqu'à arriver à la production de 5000 tonnes par an.
  - L'unique site de production minière est opéré par la filiale Sanming Rare-Earth Development en JV avec la commune de Longyang et venait d'ouvrir en 2016. Ce projet de récupération de terres rares lors de travaux de déblaiements (mis en place de fondations pour un projet immobilier) est le seul projet actif au moment de l'entretien en 2016. XTC est donc obligé d'acheter des matériaux.
  - Il n'y aurait qu'un seul site de séparation pour le groupe
  - Il y a 5 produits principaux de cette filière : vente d'OTR, vente de TR métal, batteries Li-ion, aimants Nd-Fe-B et phosphores. Il y a 40% de plus de TR lourdes et moyennes par rapport à Baotou.
- APPLICATIONS AIMANTS : Media (climatisation), Eoliennes (la plus grosse production d'énergie éolienne du monde dans le Xinjiang et Siemens), et autres.
- GISEMENT : dans le Fujian la ressource est dispatchée contrairement à la Mongolie intérieure
- CA : les TR représentent 10% du CA annuel de XTC. Le CA est de 7,75 milliards de RMB (2015)
- STRUCTURE CGV : GDRE dit être le seul des consortiums à être une entreprise intégrée de la mine aux aimants, cependant les entretiens montrent que les produits sont achetés et revendus à chaque étape de la filière. Notamment la mise en place d'une production « à la demande » (*lean management*, mais surtout au sens d'éviter le gaspillage et la surproduction*)* privilégie l'achat de matière première plutôt que leur production en interne [puisqu'il est difficile de mettre en route de la production métallurgique et minière pour de

faibles quantités]. Il est confirmé par les entretiens lors de la visite d'usine qu'une part négligeable des alliages est produite à partir de leur propre TR. L'achat des TR se fait auprès du Hunan, de Ganzhou et du Gangzhou. Cette information donnée par le PDG n'a pas pu être vérifiée lors de la visite d'usine puisque l'achat de minerai de TR par GDRE était considéré comme confidentiel, géré uniquement par le département des achats de GDRE et la commune de Longyang, les personnes sur site disaient ne pas connaître la provenance. De même la majeure partie des alliages produits par GDRE est revendue à des clients. L'unité de production des aimants ne se fournit pas auprès de la production d'alliage de GDRE mais achètent leurs propres alliages : les unités de production d'alliage et d'aimants fonctionnent séparément. Les étapes sur lesquelles ils cherchent à faire de la valeur ajoutée et à mettre en place ce « lean management » serait plutôt les étapes aval telles que la production des aimants.

Le management de XTC serait « plus horizontal » que celui de Baotou, très hiérarchique.

- EMPLOI : GDRE : 1200 employés
- EXPORTS : C'est le premier exportateur des terres rares dans les phosphores pour tubes cathodiques (ou matériau luminescent contenant des terres rares) et le second producteur de ces substances en Chine.
- ACTIONNARIAT XTC : 2016 : Actionnariat de XTC à 50% des petits actionnaires privés. Minmetals actionnaire à 27%. Actionnariat des entreprises minières appartenant à XTC : Longyan Rare-Earth Development, Sanming Rare-Earth Development et Sanming Jinming Rare-Earth, ce sont des JV avec les municipalités (commune de Longyang). XTC actionnaire à 100% de GDRE et GDRE est actionnaire à 100% de Zhujiang Optonix New Material.

  Au niveau national les consortia ont un actionnariat de l'état d'au moins 51%, mais XTC a réussi à négocier 49%, car ils ont un capital confiance élevé auprès des pouvoirs publics.
- HISTORIQUE XTC : 1958-1982 : XTC fondé en 1958. A cette époque à cause du régime socialiste, les entreprises « ne gagnaient pas d'argent ». 1982 : découverte du tungstène, Liu Tong Gong étudie le *deep processing* pour le tungstène. 2002 : côté en bourse. 2004 : entrée dans l'industrie des TR avec le mischmétal, se lance dans le business des batteries (TR) pour les voitures hybrides de Toyota (client). 2006 : usine de séparation des TR. Commence le *deep processing* des terres rares. 2009 : commence la production minière en rachetant une vielle licence qui produit 200 tonnes d'OTR, puis ouverture d'une usine de traitement par an depuis [donc en 2016 : 7 usines de traitement], jusqu'à arriver à la production de 5000 tonnes par an. C'est également la date de construction de Longyan Rare Earth Industrial Park. 2014 : devient un des 6 consortia
- TECHNOLOGIE : taux de récupération des terres rares dans l'étape de séparation des OTR serait de 92% (5000 tonnes à l'entrée par an)

  GDRE dit avoir l'exclusivité de la technologie « Grain Boundary Diffusion : GBD Technology"(découverte par un étudiant à GDRE), technologie travaillant sur la cristallisation des grains des aimants et permettant d'utiliser moins de terres rares moyennes et lourdes (en particulier le dysprosium ce qui permet un gain de coûts) en gardant les mêmes propriétés magnétiques [cependant dans les entretiens réalisés d'autres fabricants ont évoqués cette technologie].Ils seraient capables de faire des aimants sans aucun dysprosium.

  Leur centre de recherche a déposé 170 brevets concernant les terres rares (sont en échange avec The Chinese Academy of Sciences West Coast (Xiamen) RE Research Institute). Automatisation des étapes permettant normalisation du produit notamment pour l'étape de moulage des aimants qui se fait à la main dans d'autres usines

  Ils achètent comme tout le monde les équipements étrangers pointus (importation), mais après ils les copient et les fabriquent eux-mêmes

- RESERVES : Plus de 4 millions de tonnes de réserves de terres rares dans la province du Fujian d'après GDRE. Ils détiennent 88 permis minier. L'ensemble des permis d'exploitation du Fujian appartiennent à GDRE
- PRIX/Marché : Aujourd'hui si le prix des terres rares continue à chuter l'industrie est menacée. Le marché des lampes à fluorescences [produit TR phosphores] s'effondre avec l'apparition des LED. La baisse devrait se stabiliser et le marché ne devrait pas disparaître complètement. Ils s'attendent à une augmentation des commandes à la suite de l'arrêt des quotas. Cherchent d'autres clients étrangers. Ils vendent principalement à des petits clients mais travaillent un peu aussi avec les traders. Ils vendraient à hauteur de 30% pour les éoliennes [Goldwin]

Vision des enjeux :

CGV :

- D'après XTC, le consortium construit par Minmetals est fragile : en effet c'est au départ une entreprise commerciale et pas industrielle, qui ne connaît pas grand-chose à l'exploitation industrielle de la ressource. Minmetals aurait fait l'acquisition de nombreuses exploitations précaires. XTC prédit la fermeture de Minmetals d'ici 5 ans pour avoir fait trop de fusion de petites exploitations dans des mauvaises conditions sous l'impulsion du pouvoir centrale.

- D'après XTC, les entreprises du Jiangsu qui achètent des terres rares pour faire uniquement de la séparation n'ont aucun intérêt économique et devraient être fermées.

- Les acteurs de Ningbo ne font pas de traitement et de séparation, mais achètent les TR métalliques pour faire uniquement de la production d'aimants.

Coûts sociaux épuisement :

- RECYCLAGE .
    - Les métaux recyclés sont vendus. Ils achètent parfois les copeaux des autres producteurs. Le recyclage est fait en interne pour les scraps (chutes et poudres) depuis 2016 seulement. Ils ne font pas de recyclage des aimants en fin de vie pour les clients pour l'instant
    - Ils travaillent à la mise en place du recyclage des liquides pour le coating (objectif de 50% de récupération).
- PERTES :
    - GDRE travaille avec des fours de frittage (sintering furnace) « plats» qui comparés aux fours classiques permettent de limiter les blocs d'aimants défectueux, le « lean management » se ferait pour des raisons environnementales et d'éviter les pertes
    - Les personnels de l'usine confirment qu'il n'y a pas de vente en blocs d'aimants, seulement des aimants découpés en fonction des commandes des clients
- RESERVE : GDRE constitue des stocks de terres rares

  Dans le Jiangxi l'attribution des permis miniers est chaotique d'après XTC.
  XTC considère détenir suffisamment de ressources de TR pas besoin d'en acquérir plus.

Coûts sociaux :

- Déplacement de population : en 2008 ils ont racheté et déplacé un village pour construire l'usine.
- Conditions de travail : (avec les 4 machines de lamination pouvant traiter 300kg d'alliage par fournée et avec 4 à 6 fournées par jour, pour atteindre les 3000 tonnes d'aimants par an il faut une production 24h/24h)

Coût environnemental :

- Certifié ISO 14000
- Le lean management aurait été mise en place pour des raisons environnementales et éviter les pertes

Baotou Solvay Rare Earth Co. Ltd : Entretien 11

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif en anglais

Cadre : RDV àsur site à Baotou

Date : 25/07/2016

Identité organisation :

- Nom *:* Baotou Solvay Rare Earth Co. Ltd
- Informations contextuelles *:* Producteur de poudre de polissage (LaCe : produit breveté Cerox®). Responsable technique et de production.
-
- Maillon de la chaîne : Externe
- Pays : Chine
- Lien avec autres acteurs : Achète des Terres rares chez Lynas

Vision de la CGV néodyme :

- Avant 2013 tout l'approvisionnement de Solvay venait de Baiyun Ebo et tout était séparé dans le Jiangsu par Liyang Solvay Rare Earth New Materials Co.,Ltd. Liyang continue à séparer l'Europium. De même pour l'usine de Baotou. Maintenant Solvay s'approvisionne en grande partie en Australie chez Lynas ou éventuellement en Inde dans l'usine de Toyota [JV Toyota Tsusho Corporation et Indian Rare Earth] pour éviter les risques d'approvisionnement chinois. Pour l'instant malgré la situation tendue de Lynas ils ont des gros volumes de production.
- La séparation a été arrêtée en 2012 car la politique des 6 consortiums du gouvernement ne permet plus aux entreprises étrangères et/ou privées d'avoir leur propre séparation.
- Il réalise parfois les étapes de concentration et l'étape de traitement chimique pour obtenir les chlorures (puis séparation faite par un autre acteur et ils rachètent les OTR séparées)
- [En moyenne 200Mt de concentré à 50% à Baotou, et 21Mt de chlorures à 90%, donc les environ 80Mt restantes de Baotou doivent être vendues ailleurs pour la séparation]
- ACHATS : sous forme de LaCe carbonate (il y a un traitement supplémentaire après la séparation et avant leur achat)
- Traitement : dissolution de LaCe carbonate avec de l'acide et du carbonate de sodium puis calcination pour obtenir LaCe plus pur
- PRODUITS : LaCe
- PRIX des TR: le prix bas des terres rares n'est pas intéressant pour eux car ils vendent le produit fini moins cher. De plus cela augmente leur nombre de concurrents : il y a de nombreux concurrents de petites tailles aujourd'hui.
- COMPARAISON avec les aimants :

Le marché des aimants est plus gros et plus lucratif que celui des poudres de polissages (La et Ce étant des TR pas chères). Dans les aimants il y a des très gros acteurs qui ont fait des introductions en bourse (« *Initial Public Offering* » IPO). Les prix bas bénéficient à ces gros acteurs qui ont accès directement aux end-users. Dans les plus gros il y a : [Ningbo Yunsheng à Zhejiang, Ningbo et Zhongke sanhuan, basée à Beijing, mais ont plusieurs usines]

    - Il y a une évolution sur le shaping des aimants qui est de plus en plus fait sur place en Mongolie intérieur. Avant tout était envoyé à Ningbo et au Japon et maintenant il y a une grosse entreprise à Baotou qui fait du shaping et qui se porte très bien.
    - L'externalisation du shaping (vente sous forme de blocs) peut aussi être liée à la **surcapacité** et surproduction. C'est un problème commun en Chine : on investit trop dans l'augmentation de capacité et après on est en surproduction et on ne peut pas tout écouler.
- INNOVATION : Une grande différence avec les aimants est que le produit de Solvay (Cerox) est très stable dans le temps, alors que les pour les aimants les produits changent tout le temps, **surtout la forme** (évolution technologique et les clients/secteurs d'utilisation qui changent) [pourrait expliquer l'organisation du shaping avec plein de petits acteurs à Ningbo qui permet une plus grande flexibilité]

Vision des enjeux :

Coûts environnementaux :

- Transports : Tous les produits issus de Mongolie intérieure partent vers Shanghai en camion (le transport en train est très rare)
- Il n'y a pas de travaux prévus à court terme pour traiter le parc à résidus
- Il y a eu de nombreux investissements cependant pour la protection de l'environnement et notamment pour diminuer le rejet de produits dans l'eau
- Certaines entreprises affirment que le rejet d'ammoniac est nul mais c'est peu probable : pour un seuil plus élevé comme celui de la Rochelle en France les normes sont difficiles à respecter donc il est peu probable que les entreprises chinoises de traitement/séparation des terres rares atteignent le zéro rejet sans difficulté]

Coûts sociaux secteur informel :

- Il reste des mines illégales aujourd'hui. Les mines illégales vendent du concentré de mauvaise qualité fait sur place
- Mais : il y a des réelles mesures de lutte contre le secteur informel :
    - Vidéo de sécurité chez les séparateurs et meilleur équipement de sécurité
    - Il y a des factures officielles pour chaque achat. S'il y a de la fraude cela leur coupe l'accès à l'assurance sociale.
    - La politique des 6 consortia : droit de production et licence d'exportation. Concrètement ça se traduit aussi par le fait que les compagnies minières officielles n'approvisionnent plus d'autres séparateurs que les séparateurs étatiques
    - Augmentation des contrôles aux frontières

Baotou Jinshan Magnetic Material Co., Ltd : E*ntretien 12*

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif et visite d'usine

Cadre : Usine Baotou

Date : 26/07/2016

Identité organisation :

- *Nom : Jinshan Magnetic*
- *Informations contextuelles :* Société privée produisant des aimants. Entretien avec PDG.
- Maillon de la chaîne : Transformateur (fabricants d'aimants)
- Pays : Chine

Vision de la CGV néodyme :

- PRODUCTION : la capacité est de 2500 tonnes d'aimants et veulent la doubler pour atteindre 5000 tonnes (Japon seulement 10 000 tonnes).
    - 1 *strip casting machine* (machine de coulée en bande métallique)
    - 4 *jet milling machines* (*broyeurs à jets d'air)*
    - 37 *sintering machines* (machines de frittages)
    - Produisent 3,5 t par jour
- TECHNOLOGIE : les machines sont achetées à des JV Chine-Japon
- ACHATS : ils achètent les alliages
- CGV (différents stages) : ils font le shaping eux-mêmes, ils revendent les scrap à des recycleurs (dans le Jiangxi, le Jiangsu, et à Baotou) et peuvent éventuellement les remettre dans le process. Ils ne vendent que des aimants déjà taillés
- La compagnie est originaire du Jiangxi et serait toujours en activité là-bas (mais avec des sites de production de plus petites tailles)
- VENTES : les principaux clients : 1) l'automobile 2) les éoliennes 3) moteurs. La plupart des ventes sont pour la Chine, un peu en Europe, en Corée, et commence tout juste avec la Russie. Les clients sont plutôt stables dans le temps.
- INNOVATION : en revanche la forme change souvent pour suivre les produits qui changent souvent
- PRIX : le prix bas n'est pas une bonne chose pour les producteurs d'aimants, car cela augmente la compétition. Pour maintenir des relations stables avec les clients (et ne pas faire jouer la concurrence) il faut des prix plus haut

Vision des enjeux :

Coûts sociaux épuisement :

- RECYCLAGE (lien avec secteur informel) : les scraps se vendent mieux dans le sud car à Baotou il y a trop de MPM donc pas de marché.
- L'investissement dans le recyclage ne leur paraît pas intéressant

Coûts sociaux environnementaux :

- China Northern vend du minerai concentré principalement à Baotou, mais aussi dans d'autres provinces notamment à Ganzhou
- Utilisent 10 000 L d'eau par jour pour le refroidissement de la production des aimants

Dépenses publiques :

- Pas d'aide du gouvernement (VS leur investissement leur a coûté 85 millions de RMB)

Baotou Jinmeng Magnetic Materials Co., Ltd.: Entretien 13

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif et 2 visites d'usines

Cadre : Premier entretien lors de la visite de l'usine de fabrication d'aimants frittés à Baotou et 2ème entretien visite de l'usine de recyclage un peu à l'écart de Baotou

Date : 26 et 29/07/2016

Identité organisation :

- *Nom :* JinMeng Joint Magnetics Material
- *Informations contextuelles :* Jinmeng Group est actionnaire à 100% de JinMeng Joint Magnetics Material (« Baotou Jinmeng Magnetic Materials Co., Ltd. », s. d.) et Baotou Jinmeng Rare Earth Co Limited est détenu à 51% par China Northern. Même si sur le site de JinMeng il est seulement noté « partenaire de Baotou steel Rare-Earth ». Entretien avec le PDG.

- Maillon de la chaîne : Transformateur (séparateur et fabricant d'aimants) et recycleur.
- Pays : Chine
- Lien avec autres acteurs : Achète des TR à China Northern et vend des aimants à différents acheteurs

Vision de la CGV néodyme :

- PRODUCTION :

  AIMANTS
  - 1 *strip casting machine*
  - 5 *hydrogen decrepitation*
  - 3 ou 4 *jet milling*
  - 12 *sintering machines*
  - **2,4 tonnes par jour**
  - Ils font des aimants frittés. Sont en développement pour faire une petite production d'aimants liés à Beijing (pour la climatisation)
  - La composition des aimants dépend des clients.
  - Organisation de la production aimants à Baotou (sauf cutting and coating) /cutting and coating à Ningbo et Tianjin/ Séparation et recyclage à (Bayannaoer Shi, Neimenggu Zizhiqu, Chine)

  TRAITEMENT CHIMIQUE/ATTAQUE ACIDE
  - Traitement chimique avant séparation = « ATTAQUE ACIDE » [étape préalable de la séparation dont les produits sont chlorures et carbonates]

  Concentré à 50% d'oxydes de TR ($REECO_3$ ou $REEPO_4$) –----ajout H2SO4 à 0,25%--→ obtention Re-SO_4 → autre réaction permet l'obtention de RECL3
  - Pour le recyclage : capacité de traitement de 150 tonnes de Nd-Fe-B par mois.

  SEPARATION
  - Première étape : 2 RECl3 +3(NH4HCO3) → précipitation de $RE2(CO3)_3$

    $RE2(CO3)_3 + NH_4Cl + H2O$

  AFFINAGE :
  - 5 machines d'affinages (NdOx→Nd metal) pour l'électrolyse
- VENTE :
  - La demande baisse. Si le gouvernement intervient moins la demande va remonter. Pour l'instant les clients ont peur d'une nouvelle politique de restriction de l'état, malgré le fait que la Chine ait perdu à l'OMC
  - Il vend à des traders et directement au client
  - Hauts parleurs de voiture>Moteurs >Vibreurs de téléphone portable
  - 30% de clients japonais (stable) et 70% de clients chinois. Pour les clients, la moitié est stable, essentiellement représentée par Samsung, et l'autre moitié aléatoire
  - Ne vendent pas à l'industrie automobile, car cela nécessite des brevets et ils n'en ont pas.
- ACTIONNARIAT : sont détenu en partie par China Northern [à 51% par China Northern (ex Inner Mongolia Baotou Steel Rare-Earth (Group) Hi-Tech Co (China Daily, 2012). Même si sur le site de JinMeng il est seulement noté « partenaire de Baotou steel Rare-Earth »]
- STOCKAGE : font du stockage pour China Northern
- TECHNOLOGIE : le PDG a travaillé avec des experts de Solvay (à l'époque Rhodia, probablement Anthony Mariano) pour la mise en place des procédés. 8 brevets sont détenus par des entreprises chinoises pour les aimants (voir Bo-ping, 2016)
- INTEGRATION : 70% des oxydes de terres rares produites par JM servent à la fabrication d'aimants de JM. Le reste est vendu.
- EMPLOYES : 1100 employés

- PRIX et évolution MARCHE : les prix baissent et les coûts du travail sont trop élevés. La demande baisse aussi : Veulent se reconvertir pour produire 50% d'aimants ferrite, la transition est un moment compliqué. Pour l'automobile s'ils veulent retourner au Nd-Fe-B ils en ont pour 3 à 5 ans. Les clients préfèrent les aimantes ferrites aujourd'hui. Pour JM les craintes sont partagées entre producteurs d'aimants et clients sur une forte augmentation des prix.
  Exemple des climatiseurs : Ferrite → Nd-Fe-B → 2011 : pic prix : Ferrite → chute du prix : Nd-Fe-B
- CONCURRENT : des concurrents comme XTC se portent mieux pour 2 raisons éventuelles : aide de l'état et sont moins intégrés qu'eux.

Vision des enjeux :

Coûts sociaux épuisement :

- RECYCLAGE
  - Ont une usine de séparation dans laquelle ils font le recyclage
  - PROCEDE RECYCLAGE : le liquide de découpage des blocs d'aimants est envoyé à l'usine de séparation (scraps) et mélangé avec du concentré (50%REO) pour subir l'attaque acide
  - En moyenne les scraps sont à 24% de terres rares (Tb, Dy, Nd, Pr)
  - La majorité des scraps viennent de l'usine de JM
  - Les opérations de recyclage des scraps ont commencé il y a 6 ans (2010)
  - Ils font du recyclage d'aimant en fin de vie, pour Panasonic notamment, de la même manière que pour les scraps. Ils font payer les clients qui veulent recycler « un petit frais » pour le désemballage (cela fait donc au recycleur de la matière première gratuite). Une autre possibilité serait que le client paye pour un service « aimant recyclé » mais cela leur reviendrait beaucoup plus cher. Pour des produits envoyés tels que des téléphones, il revient trop cher de faire un démontage, le téléphone est donc cassé pour récupérer l'aimant. Mais c'est essentiellement les haut-parleurs qui sont recyclés, car les aimants sont d'une taille plus importante
  - Pour JM le business du recyclage n'est pas dépendant de la relation avec le client (stabilité etc.), les entreprises qui font beaucoup de recyclage de scraps à Ningbo et Ganzhou le font surtout parce qu'il y a beaucoup d'entreprises d'aimants aux alentours.
  - JM fait du recyclage, comparé à d'autres fabricants d'aimants qui n'en font pas (ou vendent), parce qu'ils ont une usine de séparation. Ils récupèrent les déchets des partenaires et leur vendent des REO.
  - Les aimants liés sont moins intéressants pour le recyclage car ils contiennent moins de TR : 18%.
- PERTES :
  - Création de scraps **:** Hauts parleurs de voiture, disque puis font des trous (30*16,5*8cm)
  - Le surplus des blocs part à Ningbo et Tianjin (dans leurs propres usines, ce sont des usines qui doivent découper et faire le coating pour d'autres producteurs également)
  - Récupération des scraps pour le recyclage (Scraps ramassés et envoyés au recyclage/scraps générés) : 92,5%.
  - Ils traitent 150 à 200 tonnes de scraps par an (mais une partie ne provient pas de chez eux donc difficile de savoir quel pourcentage de la production devient des scraps)
  - Les anciens tas de déchets de production d'aimants ont été entièrement récupérés par « des fouilleurs » en 2011 quand les prix étaient hauts. Il n'en reste plus maintenant

- Il serait possible de faire une concentration du minerai à 60% mais c'est plus cher. La concentration s'est plutôt améliorée avant c'était 30% (Minerai 5% → 15% après tri → 50% après concentration)

Coûts sociaux environnementaux :

- Les opérations de recyclage et de séparation sont à l'écart de la ville de Baotou, car sont polluantes. Elles sont situées à (Bayannaoer Shi, Neimenggu Zizhiqu, Chine)
- L'utilisation de NH_4Cl demande des installations de traitement des effluents, 5 usines partagent ces installations de traitement des effluents. Cette installation se situe à 1,5 km de l'usine de séparation de JM)
- Quand JM a commencé ces opérations de traitement et séparation (en 2000) avec NH4 notamment, il n'y avait pas de traitement des eaux, ni des gaz, et cela a généré beaucoup de pollution. Ce traitement est récent.
- Les cuves pour l'attaque acide étaient à l'air libre, semi-enterrées, semblaient corrodées : l'imperméabilisation ne semblait pas garantie

Coûts sociaux sanitaires:

- Pas de port de masque (y compris dans les zones de traitement avec ammoniaque)

Propositions / actions pour améliorer l'épuisement dans la filière du néodyme :

- L'état devrait moins intervenir et laisser faire le marché pour apaiser la fluctuation des prix et les craintes des clients

Baotou xinyuan rare earth hi-tech and new material Co.Ltd : Entretien 14

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif

Cadre : Visite de l'usine de Baotou

Date : 26/07/2016

Identité organisation :

- *Nom :* Baotou xinyuan rare earth hi-tech and new material Co.Ltd
- *Informations contextuelles :* société privée [détenue au moins en partie par société publique]
- Maillon de la chaîne : Transformateur (séparation des TR)
- Pays : Chine
- Lien avec autres acteurs : Baotou Xinyuan Rare Earth Hi-tech est détenu à 51% par China Northern, ex Inner Mongolia Baotou Steel Rare-Earth (Group) Hi-Tech Co (China Daily, 2012))

Vision de la CGV néodyme :

- ACHATS : les deux matières premières sont : chlorures de TR (sous forme liquide) ou les carbonates (sous forme solide). Une partie seulement vient de China Northern.
- PROCEDE : Les chlorures peuvent directement être utilisés pour le procédé de séparation, alors que les carbonates doivent être dissous. Les carbonates ont un rendu plus pur et sont disponibles en quantité supérieure que le chlorure.
    - Chlorures → Procédé de séparation +lavage + calcination
    - Carbonates → Chlorures → Procédé de séparation +lavage + calcination

En général les deux types sont mélangés à l'entrée du procédé de séparation

- → Obtention de différentes poudres de terres rares (PrNd, Chlorures de Cerium pour les catalyseurs, Pr et N vert fluo pour le textile)
- Ils utilisent du Carbonate d'Ammoniac [?] [$2(Nh_3)CO_3$]

- PRODUCTION :
  - 300 jours par an
  - Capacité de production 400 tonnes /mois

Vision des enjeux :

Coût social environnemental :

- 70 000 L/jour d'eau utilisée dans le procédé de séparation
- L'utilisation d'ammoniac nécessite un traitement des eaux : ils évaporent l'eau pour récupérer le carbonate d'ammoniac et le revende. L'entreprise a affirmé avoir un rejet nul d'ammoniac, mais cela semble peu probable (voir entretien Baotou Solvay).

Coût social sanitaire :

- Pas de port de masques dans les unités de traitement

Baotou Research Institute of Rare Earths : Entretien 15

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif

Cadre : Au musée d'exposition de Baotou Research Institute of Rare Earths

Date : 27/07/2016

Identité organisation :

- *Nom : Baotou Research Institute of Rare Earths (BRIRE)*
- *Informations contextuelles :* BRIRE est un institut de recherche intégré couvrant les domaines de la métallurgie des terres rares, de la protection de l'environnement, des nouveaux matériaux fonctionnels pour terres rares, de l'application des terres rares dans l'industrie des hautes technologies, de la mise à niveau technique dans l'industrie traditionnelle, du test et de l'inspection des terres rares et de l'information sur les terres rares. Il existe quatre centres de recherche qui participent à renforcer l'industrie des terres rares chinoises, ainsi qu'une base pilote de nouveaux matériaux à base de terres rares, la plus grande de Chine. Au-delà des activités de recherche BRIRE compte 14 filiales en propriété exclusive, ou en tant qu'actionnaires, dans les domaines du développement scientifique, des services à l'industrie et de la production. Personne interrogée en charge de l'animation scientifique.
- Maillon de la chaîne : Pouvoirs publics
- Pays : Chine
- Lien avec autres acteurs : [il doit exister des liens étroits avec China Northern mais difficultés pour les documenter]

Vision de la CGV néodyme :

- PRODUCTION de CHINA NORTHERN : produits : concentré (sous forme de poudre, concentré à 50%), et chlorure et carbonate à Baiyun Ebo
- SEPARATION : se fait dans une zone à l'ouest de Baotou
- USAGES AUTOMOBILES : l'automobile ne va pas revenir aux aimants terres rares, car cela est trop compliqué de changer les lignes de production

Vision des enjeux :

Coûts sociaux de l'épuisement :

- Il y a 3 open pit à Baiyun Ebo, l'open pit le plus récent à l'ouest est de teneur plus faible que les deux autres.
- Très peu de recherche du BRIRE sur les questions de récupération des métaux dans les stériles, résidus et sur le recyclage. Il y a eu des travaux sur le thorium dans le passé mais pas actuellement du fait des prix bas

Coûts sociaux environnementaux :

- Transport : le concentré et les chlorures et carbonates quittent Baiyun Ebo « pas uniquement par train »
- Le travail de recherche du BRIRE est très actif sur les questions environnementales pour respecter les standards sur les lignes de production

Tianhe Magnets : Entretien 16

Type de récolte d'informations : Entretien semi

Cadre : RDV sur site, pas de visite de la production

Date : 27/07/2016

Identité organisation :

- *Nom :* Tianhe Magnets
- *Informations contextuelles :* personnes interrogées : responsable des ventes, responsable de la production
- Maillon de la chaîne : Transformateur (fabricants d'aimants)
- Pays : Chine
- Lien avec autres acteurs :

Vision de la CGV néodyme :

- PRODUCTION : 700 machines à découper les aimants
- ACHATS : les alliages sont tous acheté à Baotou. Mais ont une JV à Ganzhou avec le comté de Longnan (pour l'approvisionnement TR lourdes) ainsi que Guangsheng Tianhe,
- TECHNOLOGIE : ont un certificat de qualité pour les aimants Sm-Co (TS16949). Ils sont les leaders mondiaux pour la production d'aimants Sm-Co. Pour le Nd-Fe-B : ils ont développé une technologie *grain boundary diffusion process* (DDP) qui serait différente de la GBD [de XTC]. Cette technologie consisterait à mettre le Dy et Tb dans les *grain boundary* et non dans les grains pour en économiser.
- CLIENTS :
    - 700 clients
    - Ils travaillent beaucoup avec l'industrie automobile qui est l'une des plus exigeantes en termes de stabilité et de qualité des produits. La proportion des ventes pour l'automobile est en augmentation. Des clients qui avaient arrêté recommencent.
    - Les ventes sont à 60% sur le territoire chinois. Autres territoires : Corée, Japon, Allemagne et un peu Russie et USA.
    - Comme grandes marques clientes européenne : Valeo, Bosch, Siemens (15 à 20% de la production) et d'autres marques chinoises.
    - 2MW=1 tonne d'aimant
- INNOVATION et recherche de coûts bas :

- En moyenne c'est 2 à 3 ans de développement pour un produit
- Les projets/contrat avec les clients peuvent aller jusqu'à 10ans
- CELA DEPEND DES SECTEURS : L'industrie automobile change pas facilement de fournisseur VS l'électronique et IRM sélectionnent leur fournisseur en fonction du coût le plus bas. Pour les IRM ils sont en contact avec l'industrie consommatrice et pour l'électronique sont en contact avec les assembleurs

Vision des enjeux :

Coûts sociaux épuisement :

- RECYCLAGE :
  - Des aimants défectueux au stade de la décrépitation**.** Le recyclage est lié aux demandes des clients : Volkswagen leur a demandé d'économiser sur les coûts depuis 2011 et d'être transparents sur le prix. Ce recyclage est souvent réalisé par les fabricants d'aimants.
  - Les autres déchets sont vendus aux séparateurs. Ou ils demandent de recycler les déchets et récupèrent les métaux affinés. Cela était déjà fait avant 2011.

Chinese Society of Rare Earths, CSRE : Entretien 17

Type de récolte d'informations : entretien semi-directif avec présence de traductrice

Cadre : The 8th International Conference on Rare Earth, Development and Application &The 3rd China Rare Earth Summit, 2016, Lanzhou, Chine

Date : 05/08/2016

Identité organisation :

- *Nom : Chinese Society of Rare Earths*, CSRE

6. *Informations contextuelles :* c'est une organisation sociale (étant définies comme telles en Chine les organismes sociaux, ainsi que les fondations ou unités privées qui ne sont pas des entreprises) nationale chinoise, universitaire et à but non lucratif ayant été créée en 1979 et composée de travailleurs dans le domaine des sciences et technologies relatives aux terres rares et autres unités apparentées (The Chinese Society of Rare Earths, 2018). La CSRE compte 4 000 membres individuels, 58 organisations membres et 15 comités professionnels. La CSRE parraine quatre revues, dont "*Journal of Rare Earths* " (bimestriel en chinois et en anglais). La personne interrogée est secrétaire général adjoint de la CSRE, fut précédemment directeur adjoint, doyen adjoint, et doyen de l'Institut de recherche sur les terres rares de Baotou, directeur du groupe des terres rares en Mongolie intérieure, président du Centre national d'ingénierie pour la métallurgie des terres rares et les matériaux fonctionnels, vice-président de la Société des terres rares de Chine, secrétaire général adjoint de l'association des industries des terres rares de la Mongolie intérieure.

- Maillon de la chaîne : Pouvoirs publics
- Pays : Chine
- Lien avec autres acteurs : L'objectif affiché de cette association est de faire le lien entre le parti communiste chinois et le gouvernement chinois d'une part et les travailleurs en science et technologie dans le domaine des terres rares d'autre part, pour le développement scientifique national pour l'industrie des terres rares. Cette organisation sociale est enregistrée auprès du ministère des Affaires civiles et est sous la direction du Parti communiste chinois. C'est une société nationale affiliée à l'Association chinoise pour la science et la technologie. (The Chinese Society of Rare Earths, 2018).

Vision de la CGV néodyme :

- 120 à 130 000 tonnes d'aimants Nd-F-B sont produits par an. Ce qui représente 88% de la production d'aimants

Vision des enjeux :

Coûts environnementaux :

- l'estimation citée par Guo (Guo, 2012) du traitement de la pollution pour la seule province du Jiangxi qui atteindrait 38 milliards de yuans est une estimation politique de la part du MIIT à la séance inaugurale d'une réunion du CSRE. Ce n'est pas une estimation basée sur des données scientifiques ou sur un rapport d'expertise c'est une estimation purement théorique. D'après la personne interrogée cela semble un coût plutôt bas. Il est certain que le coût de traitement de la pollution sera très élevé.

- Pour la personne interrogée, il y a bien 2000 tonnes de déchets produits par tonne de terres rares [comme dit par (Wang Caifeng, China's Deputy Director-General of the Materials Department of the MIIT, 2009 Minor Metals and Rare Earths Conference, Beijing, China in Hurst, 2010)], ceci est valable dans le sud pour une teneur de 0,5% en REO [VS 0,2 % d'oxydes de terres rares d'après (Gupta & Krishnamurthy, 2005)], c'est bien sûr une teneur moyenne qui est prise donc cela peut dépendre.

Coûts sociaux épuisement :

- Les aimants sont l'application en vue par les pouvoirs publics chinois pour mettre en place du recyclage. C'est la seule application où il y a des progrès sur le recyclage. Il est facile pour les producteurs de terres rares d'obtenir l'agrément des pouvoirs publics pour pouvoir traiter des scraps en revanche il est compliqué d'obtenir l'agrément pour créer une nouvelle usine qui serait dédiée au traitement des scraps, car ils pourraient en profiter pour traiter du minerai. La deuxième application en vue est les batteries rechargeables NiMH (nickel-métal-hydrure) qui sera un gros poste de recyclage quand elles arriveront en fin de vie [contiennent La, Ce, Pr, and Nd].
- Le problème du recyclage des aimants défectueux après décrépitation est que ça donne un produit de moins bonne qualité.
- Le recyclage des aimants en fin de vie et des scraps en provenance du Japon par les producteurs chinois se faisait avant 2010 et après il y a eu une diminution des exports vers la Chine.
- Le recyclage des scraps est avantageux financièrement par rapport au traitement du minerai de terres rares. La majeure partie des scraps est récupérée. Cependant il y a moins de scrap qu'avant car il y a eu beaucoup de progrès sur le procédé et la forme des aimants est maintenant la plus proche possible de la forme finale. Il y a une diminution du pourcentage de scrap émis sur la production.
- La volonté de produire du Cerium et du mischmétal est un obstacle au recyclage des scraps. Mais cette production se limite à 10 000 tonnes/an ce qui n'est pas beaucoup.
- La récupération des déchets miniers de Baotou présente une grande opportunité pour récupérer des terres rares, qui serait la plus grande réserve de TR du monde. La mise au point de procédé de récupération fait l'objet de recherches fructueuses en Chine avec l'obtention de concentré à 50%. Le plus facile est de récupérer du mischmétal. Mais cette récupération peut attendre, pour l'instant la Chine n'en a pas besoin.
- Il n'existe pas actuellement d'évaluation officielle des coûts de la récupération/recyclage des différents déchets de production et produits en fin de vie.

Propositions / actions pour améliorer l'épuisement dans la filière du néodyme :

- Le gouvernement porte une attention croissante à la question du recyclage et les mots de « mine urbaine » sont très utilisés. Le *Chinese* ministry of industry and technology (*MIIT*) voudrait mettre en place un système de quotas de production accordés aux producteurs en échange de la prise en charge d'aimants en fin de vie.
- Pour la personne interrogée le principal problème du recyclage est le problème de la collecte

Gansu Rare Earth New Material Limited-Liability Company : Entretien 18

Type de récolte d'informations : Observation

Cadre : Visite d'usine

Date : 06/08/2016

Identité organisation :

- *Nom :* Gansu Rare Earth New Material Limited-Liability Company
- *Informations contextuelles :*
- Maillon de la chaîne : Transformateur (séparation des TR)
- Pays : Chine
- Lien avec autres acteurs :

Vision de la CGV néodyme :

- Achats de concentrés principalement en provenance de Baiyun Ebo, parfois du Sichuan et réalisent le traitement chimique et la séparation sur place
- Production de 6 000 tonnes par an d'oxydes de terres rares

Vision des enjeux :

Enjeux environnementaux : réalise un traitement pour faire précipiter l'ammoniac avec les chlorures, ce qui constituerait un sous-produit de l'ordre de 6000t/an

Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth International Trading Co.,Ltd : Entretien 19

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif

Cadre : Baotou conference of rare earth 2016

Date : 08/08/2016

Identité organisation :

- *Nom :* Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth International Trading Co.,Ltd.
- *Informations contextuelles :* Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth International Trade Co., Ltd a été créée le 10 décembre 2008 par huit actionnaires, dont Inner Mongolia Baotou Steel Rare-Earth Hi-Tech Co., Ltd (actuellement China Northern), Inner Mongolia Hi-tech Holding Co., Ltd et Baotou HUAMEI Rare Earth Products Co., Ltd etc. La société fournit des oxydes de terres rares, des composés, des métaux, des métaux précieux et des matériaux nouveaux à base de terres rares. La société envisage de jouer un rôle important dans l'élimination de la

concurrence désordonnée et la stabilisation du marché des terres rares (Asian Metal, 2012). La personne interrogée était trader pour l'organisation.
- Maillon de la chaîne :
- Pays : Chine
- Lien avec autres acteurs : la société mère de Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth International Trading Co.,Ltd est **China Northern Rare Earth (Group) High-Tech Co., Ltd** (précédemment nommée Inner Mongolia Baotou Steel Rare-Earth (Group) Hi-Tech Co., Ltd.)

Vision de la CGV néodyme :

- Inner Mongolia Baotou Steel Rare Earth International Trading Co.,Ltd. Est une société de trading et produit également des terres rares. Le centre d'activité est surtout la vente et l'achat de terres rares. L'achat concerne surtout les terres rares lourdes, mais pas uniquement. Il est intéressant de vendre pour évacuer le surplus, et il est intéressant d'acheter des matières [dont ils n'ont pas besoin] comme le néodyme pour connaître les conditions du marché.
- Il est difficile de planifier la production pour ne pas être en sous-production ou surproduction
- MARCHE/CLIENTS : Le marché de la vente d'aimants par China Northern est très variable au court du temps. Actuellement : téléphones mobiles, voitures (mini-moteurs et moteurs électriques), éoliennes

Vision des enjeux :

Coûts sociaux épuisement :

- Ils font de la récupération de scraps. Ils n'ont pas de stocks de scraps cependant.

Ningbo Yunsheng Co.,Ltd : Entretien 20

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif

Cadre : Baotou conference of rare earth 2016

Date : 09/08/2016

Identité organisation :

- *Nom :* Ningbo *Yunsheng* Co., Ltd.
  Informations contextuelles : un des plus grands fabricants d'aimants chinois. *Les personnes interrogées étaient r*esponsables du support technique et Responsable des ventes
- Maillon de la chaîne : Fabricant d'aimants
- Pays : Chine
- Lien avec autres acteurs :

Vision de la CGV néodyme :

- Ningbo Yunsheng est une structure purement commerciale en Europe. Le lieu de production est Ningbo.
- Structure du prix CGV/CLIENTS : les clients européens veulent de la haute qualité et souvent de la qualité supérieure à ce dont ils ont vraiment besoin en terme technique : pour les maillons intermédiaires de la chaîne ça leur permet de vendre plus cher à leurs clients mais ce n'est pas forcément dans l'intérêt des fabricants d'aimants. Exemple de clients

européens : Valeo et Vacuumschmelze GmbH & Co. KG. Ningbo Yunsheng vend en Europe des aimants frittés et des aimants liés (epoxy). Ningbo Yunsheng Europe ne vend pas d'aimants pour les éoliennes, en revanche Vacuumschmelze vend pour des gros clients dans l'éolien.

- TECHNOLOGIE : les aimants sont de basse qualité en Chine. Dans les gros systèmes comme les servomoteurs et les moteurs électriques, dans les éoliennes, les alterno-démarreurs et les certains moteurs électriques [sauf les moteurs asynchrones ou moteurs à induction, utilisés pour Renault Twizy, Tesla, etc.] pour les automobiles ce sont des aimants frittés. Les aimants liés sont plus utilisés dans la miniaturisation. Dans tous les petits moteurs utilisés dans l'automobile aujourd'hui, il y a beaucoup d'aimants ferrites en Europe.
- CHINA NORTHERN : ils font seulement de la vente de matières premières, ce ne sont donc pas des acteurs intéressants pour le recyclage.
- PRODUCTEURS D'AIMANTS européens : Vacuumschmelze, Arnold Magnetics, un producteur suisse [probablement Bomatec (Suisse avec une société de trading à Ningbo)], et d'autres petits producteurs (en Croatie, en Allemagne dans la forêt noire, en Slovénie à Ljubljana)

Vision des enjeux :

Coûts sociaux épuisement :

- TECHNOLOGIE : le recyclage des aimants est de basse qualité en Chine
- Ils font le recyclage des scraps en vendant à des recycleurs. Ils vendent à de nombreux recycleurs différents
- Comme le recyclage d'aimants est du downcycling, ils recyclent uniquement les aimants défectueux de haute qualité. Les aimants de basse qualité obtenus sont pour le marché chinois.
- Ne font pas de recyclage des produits en fin de vie.

Doshisha University faculty of economics : Entretien 21

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif

Cadre : Visite à l'université

Date : 16/08/2016

Identité organisation :

- *Nom : Doshisha University faculty of economics*
- *Informations contextuelles :* recherche en économie écologique sur les coûts sociaux de la radioactivité et notamment des terres rares en Malaisie
- Maillon de la chaîne : Externe
- Pays : Japon
- Lien avec autres acteurs : La personne interrogée a étudié les impacts d'Asian Rare Earth, une filiale de Mitsubishi Chemicals en Malaisie

Vision de la CGV néodyme :

- Asian Rare Earth qui exploite les terres rares en Malaisie est une joint-venture avec comme actionnaire majoritaire Mitsubishi Chemicals (à l'époque Mitsubishi Kasei) à 35%.
- Avant les années 1970 Mitsubishi produisait des terres rares à partir de la monazite au Japon. A partir de 1968, le *Japanese Nuclear Reactors Control Act* a été modifié et la régulation est devenue plus stricte. Mitsubishi arrête sa production en 1971 et c'est la même chose pour d'autres compagnies. RE a commencé ses opérations en 1982. 100% des produits de terres rares ARE étaient exportés au Japon

- Lynas (décembre 2015) : produisait 20 000tonnes par an de terres rares et exportait 8500 tonnes vers le Japon. Le Japon (sous forme d'une JV entre Sojitsu trading compagny et la JOGMEC, avec JOGMEC majoritaire) a prêté 2,25 milliards de Yen japonaise dans le projet et investi 250 millions de yen japonaise. En tout, cela représentait 30% du coût de construction.

Vision des enjeux :

Coûts sociaux sanitaires :

- POLLUTION ARE : 400 tonnes de déchets radioactifs par an, pas de gestion des déchets les 2 premières années (jeté près d'une étendue d'eau), pas d'étude d'impact environnementale (alors qu'ils avaient déjà été condamné pour négligence d'étude d'impact environnementale au Japon), puis les déchets sont stockés de manière inadaptée). Résultat pollution de l'eau de l'air et des cours d'eau. L'occurrence des leucémies est 40 fois supérieure au niveau normal. En 1987, la Monocytopénie infantile (diminution du nombre de globules blancs) était du même niveau que les îles Marshall juste après les essais de bombes H, etc. Il y a eu une attaque en justice en 1992, mais la condamnation de l'entreprise a sauté en 1993. Mitsubishi a stoppé les opérations en 1994 pour importer depuis la Chine pour des raisons économiques. Un stockage permanent des déchets radioactifs n'a été construit qu'en 2003.
- Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) [la compagnie nationale japonaise qui s'occupe de sécuriser l'approvisionnement des métaux et du pétrole notamment en finançant des entreprises japonaises extractives] n'a pas de guidelines environnementales

Propositions / actions pour améliorer l'épuisement dans la filière du néodyme :

- Le Fonds de développement lié aux terres rares devrait être établi au niveau international. Le fonds servira à l'élimination définitive du thorium et d'autres résidus radioactifs. Le fonds devrait être fourni par les sociétés minières et d'affinage. (Le principe du pollueur-payeur, PPP)
- La politique commerciale des pays devrait également être utilisée pour faire pression sur les entreprises/investisseurs en termes de plans de réduction de la pollution
- Généraliser des dispositifs tels que le «Super Fund Act» des Etats-Unis qui impose aux «prêteurs une responsabilité» en termes de comportement des bénéficiaires de prêts. Si les bénéficiaires du prêt contaminent le site de l'installation, les financeurs seront tenus pour responsables.
- La CIPR et l'AIEA devraient devenir plus neutres et indépendants (de l'industrie et des gouvernements). Ils devraient embaucher plus d'épidémiologistes.
- La résolution entre l'AIEA et l'OMS en 1959 devrait être annulée. (Résolution WHA12.40, adaptée à la 12ème Assemblée mondiale de la santé, le 28 mai. Tous les documents officiels de l'OMS sur des sujets liés à la radioactivité doivent être approuvés par l'AIEA avant publication).
- L'empreinte nucléaire/en termes de radiation devrait être considérée et non seulement l'empreinte carbone

Tokyo Eco Recycle : Entretien 22

Type de récolte d'informations : Entretien Semi Directif

Cadre : Visite du site de récupération des aimants

Date : 19/08/2016

Identité organisation :

- *Nom : Tokyo Eco Recycle*
- *Informations contextuelles :* Filiale de Hitachi Group Company. Hitachi premier producteur d'aimants au Japon et l'entreprise détenant le plus de brevets au monde sur les aimants Nd-Fe-B. Les deux personnes interrogées étaient un ingénieur sénior et un responsable du Material Resources Recycling Group de Hitachi, et Tokyo Eco Recycle
- Maillon de la chaîne : Recycleurs
- Pays : Japon
- Lien avec autres acteurs : En lien avec Shin-Etsu pour le recyclage des scraps et la revente des aimants récupérés dans l'usine de Tokyo Eco Recycle. Cette usine est issue d'une volonté des pouvoirs publics japonais : « Le METI a ainsi choisi Hitachi pour son projet de recherche sur des solutions techniques pour le recyclage des métaux rares à partir des mines urbaines. L'entreprise a donc une stratégie efficace de récupération des métaux rares dans les appareils électroniques en fin de vie, notamment en ce qui concerne le recyclage des aimants permanents. » (Feuardant, 2016) et a donc été subventionné par le Japon.

Vision de la CGV néodyme :

- Ce projet de recyclage a commencé depuis 8 ans et était soutenu par le gouvernement [2008 donc].
- CLIENTS : pour les aimants produits par Hitachi : 1) Automobile : moteurs Hybrides principalement, mais aussi direction assistée (Tous les producteurs japonais mais également Tesla) 2) les ascenseurs (Mitsubishi) 3) Les compresseurs pour Fujitsu, Sharp, Mitsubishi, Hitachi
- TECHNOLOGIE : tous ce qui est grosse machinerie utilise des aimants frittés [même affirmation que pour Entretien 20]

Vision des enjeux :

Coûts sociaux épuisement :

- Hitachi affiche une volonté de conservation des ressources via le recyclage (vision 2025)
- DEPENSES PUBLIQUES : D'après Tokyo Eco Recycle, le développement du projet industriel de Tokyo Eco Recycle a couté 300-400 millions de yen, dont la moitié investi par l'état. Comme cité plus loin, la ville doit également dépenser de l'argent pour la collecte des déchets.
- RECYCLAGE :
    - Il existe des problèmes de collecte et d'extraction.
    - Collecte : les disques durs sont achetés. Les frigos, télévisions et machines à laver sont apportées par la ville de Tokyo.
    - REGLEMENTATION :
        - La loi sur le recyclage des ordinateurs assure l'approvisionnement en HDD de l'usine. Hitachi est obligé de récupérer les disques durs qu'ils ont vendus. Normalement la récupération des HDD devrait se faire au niveau des municipalités, mais Hitachi bénéficie d'une autorisation spéciale pour récupérer directement les disques durs dans tout le Japon. Ils existent donc 10 centres Hitachi de démantèlement des ordinateurs au Japon qui renvoient les HDD vers Tokyo Eco Recycle. À Tokyo le fonctionnement est différent, ils récupèrent les disques durs quel que soit la marque
        - Ils achètent également des disques durs à des sociétés de recyclage mais en plus petite quantité.

- Les activités de Tokyo Eco Recycle consistent en du démantèlement automatique d'aimants frittés. Les applications prises en charge sont les HDD (chocs et vibrations pendant 35 min) et les compresseurs de climatiseurs et de réfrigérateurs (découpage), ils enlèvent la colle par chauffage. Sablage sur un autre site.
- Les objectifs du gouvernement japonais :
  - Court terme : stock et diminution de la consommation des ressources métalliques critiques
  - Moyen terme : Recyclage et mise en place d'une diplomatie économique
  - Long terme : Substitution et mine
- L'extraction des terres rares à partir des aimants n'est pas faite par Tokyo Eco Recycle. Un laboratoire travaille sur le procédé, mais l'extraction industrielle n'est pas faite par eux. Le procédé :
  - A été codéveloppé avec Toho Titanium Co., Ltd.
  - Utilise un ratio massique de magnésium de Mg/magnet=10 pour une efficacité optimale
  - [Le « revêtement de surface en nickel [… est passé] par un grenaillage au sable pour l'éliminer. Puis, l'aimant est plongé dans un bain de magnésium fondu (un procédé breveté Hitachi), les métaux rares (néodyme à 72,4%, praséodyme à 20,6% et dysprosium à 5,9%) passent en phase liquide et on retire le fer encore solide. »(Feuardant, 2016)]
  - Le taux de récupération du dysprosium n'est pas actuellement à 80% comme cela est indiqué dans les rapports officiels (Feuardant, 2016). 80% correspond au taux qu'il faudrait atteindre pour que le procédé soit rentable.
  - Le taux de récupération moyen en 2016 de ce procédé toutes terres rares confondues est actuellement : (TR récupérées en sortie de processus) / (TR présentes dans l'aimant après sablage)= 61%
- Les deux voies actuelles de recyclage utilisées par Hitachi sont bien les voies « habituelles » :
  - Scrap : attaque acide, extraction par solvant et molten salt electrolysis (pour obtenir les TR sous forme métallique) [il s'agit d'une réintégration dans la chaîne de traitement des TR primaires]
  - Recyclage des aimants : au niveau du « Vacuum melting » dans la fabrication des aimants
- EFFICACITE : le rendement du recyclage des scraps en procédé de réinsertion dans la chaîne classique serait de 60% et celui en cuve à magnesium serait autour de 61% pour l'instant, on peut se poser la question de l'intérêt d'utiliser ce nouveau procédé. D'après Hitachi, ce nouveau procédé est plus rentable car il utilise des quantités faibles d'intrants (ici le magnésium) et d'énergie comparé au procédé classique.
- Les aimants ainsi récupérés par Tokyo Eco Recycle sont revendus à Shin-Etsu ou gardés par Hitachi et utilisés pour la production d'aimants frittés. Hitachi ferait appel à un prestataire de service japonais pour la séparation en TR de ces aimants récupérés. Ce prestataire n'est pas Shin-Etsu qui refuse de séparer les aimants pour Hitachi. En revanche Shin-Etsu réalise la séparation à partir des scraps d'Hitachi.
- Tokyo Eco Recycle affirme que les aimants restent sur le territoire japonais [contradiction entretien Shin-Etsu]

Coût sociaux environnementaux :

- Hitachi affiche une volonté de lutter contre le changement climatique via l'augmentation de l'efficience énergétique (vision 2025)

- Hitachi affiche une volonté de préserver les écosystèmes via la diminution des impacts sur l'eau et l'air (vision 2025)
- D'après Tokyo Eco Recycle les activités de démantèlement automatique des aimants n'ont pas d'impacts environnementaux.

Shin-Etsu Chemical Co.,Ltd : Entretien 23

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif

Cadre : RDV hors site

Date : 20/08/2016

Identité organisation :

- *Nom :* Shin-Etsu Chemical Co.,Ltd
- *Informations contextuelles :* 2ème producteur d'aimants au Japon (BRGM, 2015)
- Maillon de la chaîne : Fabricant d'aimants et transformateurs (séparateurs et recycleurs)
- Pays : Japon
- Lien avec autres acteurs : Bénéficierait également de la JV avec Asian Rare Earth et récupérerait des scraps de Hitachi et achèterait aussi les aimants récupérés par Hitachi

Vision de la CGV néodyme :

- ETAPES DE PRODUCTION :
  - MINERAI : ils envisagent d'acheter à Lynas, mais seraient obligés de passer par la Chine pour la réduction de toute manière.
  - SEPARATION : ils ont une usine de séparation qui est petite et représente une petite partie de leur approvisionnement. C'est surtout pour les terres rares lourdes : cette usine de séparation ne peut récupérer que 4 terres rares : Nd, Pr, Dy, Tb. Ceci est dû au nombre de batteries d'*extraction par solvants : une vingtaine de batteries au Japon et environ 200 en Chine.*
  - *REDUCTION DES OXYDES : un peu de réduction est faite au Vietnam par Shin-Etsu*
  - *PRODUCTION DES ALLIAGES ET DECREPITATION : à Changting. Le point de départ pour la chaîne de Shin Etsu est la fusion des métaux pour fabriquer les alliages. Ils achètent presque toutes les terres rares métalliques pures (sauf Dy en alliage avec Fe). Ils ont créé cette JV en Chine après la crise des terres rares [pour économiser sur les coûts], mais continuent à acheter plus de 50% des alliages. Hitachi n'a pas d'installations métallurgiques pour la fusion des TR donc achètent les alliages à Shin-Etsu et à d'autres.*
  - *ASSEMBLAGE DES HDD : en Chine*
- *Historique : il y a 50 ans ils faisaient la séparation et l'affinage pour produire des aimants Sm-Co.*
- CLIENTS :
  - Futur : Eoliennes : selon l'acteur interrogé les applications les plus prometteuses sont les éoliennes (notamment Siemens qui s'approvisionne surtout en Chine mais ont commencé à faire quelques commandes au Japon). Pour l'instant on ne sait pas si ce sont les générateurs à induction (Mistubishi) ou les générateurs synchrones à aimants permanents qui vont dominer le marché.
  - Actuel : les voitures et les climatiseurs restent la première utilisation mais elle diminue depuis 2010. Sur les voitures : Toyota, GM, Nissan. Pour l'Europe : Volkswagen veut faire de plus en plus d'électrique, et Valeo. Hyundaï qui veulent

faire des hybrides. L'automobile peut se permettre de vouloir mettre le prix et de vouloir la qualité car finalement la pièce est petite par rapport à la voiture (pourcentage du prix final pas si élevé).

- TECHNOLOGIE : dans les applications qui exigent moins de qualité que les voitures, les produits sont généralement plus stables. Pour toutes les applications cités (réfrigérateurs, machines à laver, climatiseurs, automobiles et éoliennes) on parle d'aimants frittés. Les aimants liés représentent 10% de la production japonaise
- AUTRES PRODUCTEURS ; producteurs d'aimants liés au Japon : Aichi-steel et Daido-Steel (HDDR technology : Daido Electronics Co., Ltd., filiale à 100% de Daido Steel, produit en série des aimants au néodyme en utilisant la méthode de déformation à chaud, qui est différente de la méthode de production de frittage typique des aimants au néodyme.). Daido Steel et Honda adoptent le premier aimant de moteur de véhicule hybride au monde sans éléments de terres rares lourdes. Alors que Toyota utilise toujours des terres rares lourdes.

Vision des enjeux :

Coûts sociaux épuisement :

- DEPENSES PUBLIQUES : reçoivent de l'argent du gouvernement pour le recyclage.
- RECYCLAGE :
    - SCRAPS : ils font du recyclage des scraps. Ils recyclent tous leur scraps et achètent un peu de scrap sur le marché japonais. **La production des scraps représente 35 à 40% des alliages de départ.**
    - Le recyclage est fait soit dans l'usine de séparation de Takefu, soit dans l'usine de recyclage qu'ils ont au Vietnam (récupère Nd, Pr, Dy, Tb). L'usine de recyclage du Vietnam est plus grande. Ils ne peuvent récupérer que les 4 éléments cités précédemment (voir séparation plus haut)
    - **Recycling rate est environ égal à 90% (pour les scraps et aimants)**
    - Aimants en fin de vie : ils recyclent des aimants de Tokyo Eco Recycle qui sont broyés avec des scraps
    - Aimants défectueux : ils sont tous recyclés après avoir été broyé, ils sont mis au niveau de l'attaque acide. Apparemment aux Etats-Unis certains acteurs subventionnés sont en train de mettre au point une méthode de recyclage des aimants défectueux plus moderne (diminution de la quantité d'oxygène avec une nouvelle méthode de *jet milling* et l'ajout d'alliage au niveau du jet milling)
    - MARCHE RECYCLAGE : c'est Santoku qui rachète la majorité des scraps et des aimants en fin de vie [c'est sûrement eux qui font la prestation de service de séparation des aimants en fin de vie pour Hitachi]
    - ECOCONCEPTION : Toyota fait attention à pouvoir enlever l'aimant après. Au Japon, comme la prise en charge est obligatoire pour les machines à laver, les réfrigérateurs et les climatiseurs, cela pousse à l'écoconception.
    - POUR LE RECYCLAGE : on parle uniquement des aimants frittés, car c'est beaucoup plus compliqué pour les aimants liés [voir entretien JM qui confirme que les aimants liés contiennent moins de TR]
- SUBSTITUTION :
    - Les recherches sur la *grain boundary* ont permis une diminution de moitié de l'utilisation de la quantité de dysprosium. Mais cette diminution a augmenté le Terbium utilisé pour maintenir les caractéristiques CFL.

Propositions / actions pour améliorer l'épuisement dans la filière du néodyme :

- Pour l'acteur interrogé le principal problème stratégique pour remonter la chaîne des terres rares et se passer de la dépendance à la Chine n'est pas la séparation (extraction par solvant)

maîtrisée par Lynas, Molycorp, Solvay. Le problème c'est la réduction des oxydes de terres rares. Cette technologie est vielle et a très peu évolué contrairement à d'autres matériaux comme l'aluminium ou des économies d'échelle et de l'automatisation a été mise en place. Au Japon c'est d'autant plus un problème que l'électricité est chère, il faut donc faire des recherches sur la réduction avec des sels fondus au lieu de la réduction métallothermique à haute température actuelle. Aujourd'hui personne ne veut se pencher sur ce problème parce que c'est une petite utilisation et ça ne serait pas profitable, que c'est moins cher d'acheter les alliages en Chine (même s'ils font un peu de réduction au Vietnam).

Eco- systèmes : Entretien 24

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif

Cadre : RDV hors site

Date : 20/09/2016

Identité organisation :

- *Nom : Eco-systèmes*
- *Informations contextuelles : Eco-systèmes* est un *éco-organisme* à but non lucratif agréé par les pouvoirs publics pour la collecte et le recyclage des appareils électriques et électroniques usagés. [Depuis le 1er janvier 2018, *Eco-systèmes* et Récylum se sont regroupés au sein d'ESR. La Directive Européenne DEEE définit des objectifs de collecte et de recyclage pour les éco-organismes en charge des anciens appareils électriques et électroniques. Ces objectifs sont définis par année et par flux, pour aller vers toujours plus d'appareils collectés et une meilleure qualité du recyclage]
- Maillon de la chaîne : Recycleurs
- Pays : France
- Lien avec autres acteurs :

Vision des enjeux :

Coûts sociaux épuisement :

DEPENSES PUBLIQUES : quelques millions d'euros de dépenses publiques ont été réalisées pour le projet de recyclage des poudres luminophores avec Solvay. Puis les produits du recyclage se sont retrouvés sans marché avec le passage au LED

RECYCLAGE :

- 2 projets de recherche et développement des pouvoirs publics sont en cours pour mettre en place une politique de recyclage des terres rares.
    - Le projet Extrade (BRGM, Eco-Systèmes) vise à caractériser les teneurs en TR dans les flux de déchets. Les applications concernées pour les aimants Nd-Fe-B : HDD, Haut-parleurs, petits moteurs électriques. Les véhicules ne sont pas pris en compte car c'est une autre filière.
    - Il y a également le projet Prosum qui vise à harmoniser les sources de données sur les flux de Terres Rares à l'échelle européenne
- Travaille avec le BRGM sur la faisabilité du recyclage : faisabilité de sortir les aimants (Gallo dans le nord) de les démagnétiser, les broyer, pour les réduire en poudre, puis travaux sur la séparation en cours (BRGM).

Freins à la mise en place du recyclage des aimants :

- Grande variabilité de la composition des aimants en fonction des fabricants et dans le temps. Les équipements collectés sont très mixtes en termes de technologie [cela doit être un peu limité dans les centres de démantèlement spécialisés Hitachi]. C'est

cette variabilité de la composition en petits métaux qui rend les éco-organismes réfractaire à communiquer les quantités de petits métaux dans les flux car après les objectifs de recyclage pourrait être indexés sur ces quantités
    - Difficulté de prévoir la rentabilité : si les coûts sont chiffrables, le prix de vente ne l'est pas (trop fluctuant)
    - La substitution est un obstacle à la mise en place du recyclage : si les producteurs changent de technologie quand le prix est haut l'investissement dans le recyclage a été fait pour rien [voir exemple des lampes en France et des travaux de Alexander Kean, qui travaille sur les matériaux critiques aux Etats-Unis et qui souligne que parfois la sécurité de l'approvisionnement et l'objectif de réduction de matière ne vont pas dans le même sens : exemple substitution/changement de technologie VS recyclage, cela pose la question entre les lignes de la cohérence des politiques publiques en termes de matière]
    - Les faibles tonnages disponibles via Eco-systèmes, le prix bas et volatile, fait qu'aujourd'hui les acteurs industriels ne sont pas intéressés.
- Sur les stocks de Nd dans les aimants en fin de vie :
    - Aujourd'hui on ne sait pas ce qu'il y a dans les décharges et les sites d'enfouissement. Les fines finissent en décharge.
    - Rien n'est « mis de côté » pour être recyclé plus tard quand les filières seront en place (cela existe pour les dalles LCD, mais il faut une visibilité à court termes ce qui n'est pas le cas pour le Nd).

Propositions / actions pour améliorer l'épuisement dans la filière du néodyme :

- Comment décorréler la rentabilité du recyclage de la variation du prix ? Cela a été possible pour les métaux précieux car les prix sont très élevés. Aujourd'hui le recyclage d'Umicore des métaux précieux dans les d3e est rentable principalement grâce au stockage et à la revente lorsque les cours sont élevés. Mais ce modèle n'est pas réplicable sur d'autres matériaux où l'on n'est pas sûr de la teneur en matériaux onéreux et donc pas sûr de pouvoir amortir le coût même via stockage. Une étude est en cours à la DGE pour trouver les leviers financiers pour ne pas être dépendants de la volatilité des cours.
- Arrêter la politique de recyclage au coup par coup comme avec les luminophores et Solvay, qui est assez onéreuse.

Ministères des affaires étrangères et du développement international : Entretien 25

Type de récolte d'informations : Entretien semi-directif

Cadre : RDV au ministère

Date : 25/10/2016

Identité organisation :

- *Nom : Direction des entreprises de l'économie internationale et de la promotion du Tourisme du Ministères des affaires étrangères et du développement international*
- *Informations contextuelles : Personne interrogée c*hargée du soutien aux secteurs stratégiques Ressources minérales [ressources minérales non énergétiques : suivi des politiques européennes sur ce sujet, point de contacts des opérateurs métallurgiques français BRGM, Eramet ex-Al Pechiney pour le ministère des affaires étrangères, coopération développement et technique]. Siège au CA du BRGM en tant que représentante du ministère des affaires étrangères. Membre du COMES
    - Maillon de la chaîne : Pouvoirs publics

- Pays : France
- Lien avec autres acteurs :

Vision de la CGV néodyme :

- Pouvoirs publics : 4 piliers de la diplomatie économiques : soutien des entreprises françaises à l'étranger, modernisation des dispositifs de stratégie business, attractivité pour les investisseurs étrangers et prise en compte des entreprises dans les négociations internationales plus larges.
- Cependant la diplomatie économique sur les matières premières en France n'est pas complètement formalisée. En Europe il y a quelques initiatives en revanche : partenariat Union africaine et Euromed sur les phosphates, l'Allemagne a des partenariats bilatéraux basés sur l'échange (aides publiques conditionnées à la sécurisation de l'approvisionnement notamment via l'exigence de transparence du secteur extractif, d'adoption de code minier, etc.)
- Pour les terres rares : il n'y a pas de groupe d'étude visant à une meilleure transparence du marché, il n'y a d'ailleurs pas de cotation des terres rares, et à une meilleure coopération entre producteurs et acheteurs, comme les groupes de Lisbonne pour le Nickel [International Nickel Study Group (INSG)] et pour le plomb [International lead and zinc study group (ILZSG) formé par les nations unies en 1959], identifié en Europe sur les TR donc sujet difficile à suivre
- La Chine a mis en place des marchés de métaux pour inciter les traders à négocier les prix en Chine. Cela part d'une volonté de remonter la chaîne de valeur et d'influencer les prix. Une de ces bourses, le Fanya Metal Exchange avait fait des stocks de certains métaux dont les terres rares et avait mis en place un instrument d'épargne qui était plus ou moins une pyramide de Ponzi. Aujourd'hui la crainte est sur la remise sur le marché des stocks accumulés par ce marché. Avec une interrogation sur ce que sont les stocks réels et une difficulté d'avoir des informations transparentes sur ce marché.
- Les terres rares sont un instrument diplomatique pour la Chine pour remonter la chaîne de valeur et attirer entreprises et investissements sur le sol chinois. La Chine n'est pas le seul pays à mettre en place des instruments en ce sens (exemple du Botswana).
- La manipulation des prix de la part de la Chine apparaît clairement avec l'échec des projets de Lynas et Molycorp. Ces projets ont un CAPEX (dépenses d'investissement de l'anglais *capital expenditure*) élevé de l'ordre de 500 millions à 1 milliard de dollars [ordre de grandeur confirmé par (Sykes, 2013)]. La Chine a essayé de prendre 51% du projet de Lynas, mais n'a pas réussi.
- L'Europe est moins exposée que le Japon au niveau du risque économique lié à une rupture d'approvisionnement
- Prise de contrôle des chaînes de valeurs et RSE : la RSE est un argument de compétitivité dans la diplomatie économique à l'étranger. A l'heure actuelle les pays africains se questionnent sur les investissements chinois en lien avec ces questions de RSE. Les entreprises européennes peuvent respecter des normes élevées.

Vision des enjeux :

Coûts sociaux environnementaux : pas sur la filière Nd mais sur les problématiques de mercure pour l'orpaillage en Afrique de l'Ouest.

Coûts sociaux conflits : pas sur la filière Nd.

- Sur les minerais de conflits : 3T et or, loi union européenne en cours.
- Sur les diamants : la France fait partie des 5 membres du conseil de sécurité de l'ONU, or dans les régimes de sanctions il y a un volet ressources naturelles qui a pu concerner cette matière.

Coûts sociaux et environnementaux de la filière néodyme pour la France :

- Le coût de l'incertitude sur l'approvisionnement et des ruptures d'approvisionnement
- [Le coût de la désindustrialisation (chômage, etc.) et en coût futur le coût de mettre en place des politiques publiques pour récupérer des compétences et de l'industrie]

Propositions / actions pour améliorer l'épuisement dans la filière du néodyme :

- La mine responsable française : on ne peut pas décréter que les problèmes sociaux et environnementaux sont un problème de pays producteur, c'est pour ça que la relance de la mine en France est intéressante.
- Les investissements français miniers à l'étranger doivent être maintenus pour assurer l'approvisionnement.
- Actions des pouvoirs publics sur les questions de responsabilité pourquoi s'intéresser particulièrement aux questions de minerais de conflits :
    - Minerai de conflits : il y a eu l'initiative de la due diligence qui était plus large que les questions de financement des zones de conflits. Si les pouvoirs publics se sont intéressés à légiférer sur la question des minerais de conflits c'est parce qu'il y avait une forte pression de la société civile avec un narratif simple repris par les médias. Aujourd'hui c'est bien visible que ce narratif était trop simple (exemple du rapport de Somo qui montre que l'on peut démultiplier la question des conflits armés). L'Europe essaye de tirer parti des erreurs des Etats-Unis sur les échecs de Dodd Franck pour légiférer (notamment essaye d'éviter le report sur la contrebande). Volonté de respecter le souhait des industriels d'avoir des procédures de reporting extra financier qui soient standardisées internationalement. Sur la question : l'intérêt de la France pour les minerais de conflit par rapport à une stratégie militaire : il n'y a pas d'approche coûts-bénéfice sur la question de l'intervention armée de la France dans ces zones. L'effet purement militaire de ce type de législation est d'ailleurs très incertain.
    - Absence de législations/actions publiques sur les questions environnementales comme en Chine : 1) cette question est peu connue et mobilise peu 2) d'un point de vue diplomatique ce n'est pas du tout la même situation car l'état chinois n'est pas victime de la situation alors que la RDC si. Il s'agirait là de pousser la Chine à se mettre en conformité avec nos standards ce qui est compliqué (par exemple sur le standard CCMC minerais de conflits de l'OCDE). Si on avait des indicateurs intégrés sur les impacts sociaux environnementaux de chaque minerai il serait plus facile d'avoir une approche globale du problème
- D'après l'acteur interrogé le fait qu'il n'y ait pas de consentement à payer pour un produit plus responsable (« conflict free », problème de lisibilité) est un frein au changement. La sanction du consommateur se fait au coup par coup sur quelques scandales liés à des produits

Entretien anonyme : Entretien 26

Vision des enjeux :

- Traçabilité/contrebande : Selon l'acteur interrogé, la contrebande entre la Chine et le Vietnam est organisée par les traders qui s'appuient sur des agents en Chine pour faire passer la marchandise au Vietnam pour ne pas payer les taxes d'exportations. Les petits acheteurs européens n'ont pas de contacts directs avec les producteurs chinois n'ayant pas les moyens d'avoir un bureau de représentation en Chine, ils passent par des traders.

Entretien anonyme : Entretien 27

Vision des enjeux :

- Perspectives d'agrandissement des consortiums : le rachat des mines doit se faire de manière prudente car demande beaucoup d'investissement, donc il faut être sûr de la qualité de l'achat.

Annexe 4

Traduction de l'article de Xu et Shi, 2005 : Xu, G. X., & Shi, C. X. (2005). The emergency appeal on the protection of thorium and RE resources of Bayan Obo to avoid radioactive contamination in Yellow River and Baotou. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, *20*(6), 448-450.

Texte original :

http://www.cas.cn/zt/jzt/wxcbzt/zgkxyyk2005ndlq/ysyxb/200511/t20051117_2667814.shtml

关于保护白云鄂博矿钍和稀土资源 避免黄河和包头受放射性污染的紧急呼吁 文章来源：中国科学院院刊 发布时间：2005-11-17 您现在的位置： 首页 > 专题 > 旧专题 > 文献出版专题 > 中国科学院院刊2005年第六期 > 院士与学部 一 保护钍和稀土资源的重要性和紧迫性 我国稀土资源储量居世界第一位，钍资源居世界第二位。最主要的稀土和钍矿在内蒙古包头的白云鄂博主矿和东矿，现在两矿作为铁矿已开采了40%，但其中的稀土利用率不到10%，钍利用率则为0%。同时，钍对包头地区和黄河造成放射性等三废污染，若再不采取措施，35年后矿藏全部采完，将进一步加剧对黄河的污染，形势十分紧迫。 能源是支撑我国经济高速发展的关键问题。国际上对石油资源的竞争非常激烈，高油价将长久冲击市场，因此，采用核能发电是大势所趋。钍是重要的核能资源之一，我国已查明的钍工业储量为286335吨(二氧化钍)，仅次于居世界第一位的印度(343000吨)，其中,白云鄂博矿221412吨，占77.3%。美国国防部和日本防卫厅都把钍、铀、钚和除钷以外的16种稀土元素定为战略元素，法律规定国家要有一定量的储备。 白云鄂博矿是以铁、稀土、钍、铌等为主的多元素共生矿。矿区内有五个矿体，其中主要的	Urgent appeal for the protection of the Baiyun Obo mine and rare earth resources to avoid radioactive pollution of the Yellow River and Baotou Source: Chinese Academy of Sciences Publication Date: 2005-11-17 The importance and urgency of protecting thorium and rare earth resources China's rare earth resource reserves rank first in the world, and its resources rank second in the world. The most important rare earth and thorium ore are the Baiyun Ebo main mine and the eastern mine in Baotou, Inner Mongolia. Nowadays 40% of the two mines have been mined as iron ore, but the recovery rate of rare earth is less than 10% and the recovery rate of thorium is 0%. At the same time, the tailings caused radioactive pollution to the Baotou area and the Yellow River. If no measures are taken, the mines will be completely exhausted after 35 years, which will further intensify the pollution of the Yellow River. The situation is very urgent. Energy is a key issue supporting the rapid development of China's economy. International competition for oil resources is fierce, and high oil prices will hit the market for a long time. Therefore, the use of nuclear power generation is the general trend. Thorium is one of the important nuclear energy resources. China has identified 286,335 tons of thorium (cerium oxide), second only to India (343,000 tons), which ranks first in the world, of which 221,412 tons are from Baiyun Obo. 77.3%. […]. The Baiyun Obo Mine is a multi-element symbiotic ore with iron, rare earth, thorium and niobium There are five ore bodies in the mining area, of which three are mainly: main mine, east mine and west mine. The main mine and the east mine have 600 million tons of proven ore, with an average grade of about 34% for iron, about 5% rare earth, and about 0.032% thorium. The West Mine has 800 million tons of proven ore, which is a low rare earth, low thorium, low phosphorus and low fluorine deposit mainly composed of iron (33.15%), which is suitable for iron ore mining. Rare earth is a necessary strategic element for high and new technology. China has proven 43 million tons of rare earth industrial reserves, ranking first in the world. Among them, Baiyun Ebo has 30 million tons of east mines, 5 million tons of west mines, and 8 million tons of Sichuan, Shandong, southern provinces and Taiwan.

有三个：主矿、东矿和西矿。主矿和东矿有探明矿石6亿吨，平均品位含铁约34%，稀土约5%，钍约0.032%。西矿有探明矿石8亿吨，是以铁(33.15%)为主的低稀土、低钍、低磷、低氟的矿床，适宜作为铁矿开采。

稀土是高新技术必需的战略元素，我国已探明稀土工业储量4300万吨，居世界第一位。其中白云鄂博主东矿3000万吨，西矿500万吨，四川、山东、南方五省、台湾等地共800万吨。

二 白云鄂博矿钍和稀土资源亟待保护和

合理利用

上世纪50年代，我国包钢开始建厂，前苏联把白云鄂博主东矿设计为单纯的铁矿，未考虑稀土和钍的综合利用，是一个错误的决策。自1958年包钢投产以来，主东矿已开采2.5亿吨，尚余3.5亿吨。现在开采量达每年1000万吨，照此开采下去，主东矿不到35年就开采完毕，我国将成为稀土和钍的资源小国，重蹈钨矿的履辙。已开采的2.5亿吨主东矿矿石中稀土和钍的走向如下表所示。

包钢三废排放含有放射性钍的废气、尾矿飞尘、废水和废渣，不但严重污染包头地区，而且是黄河的主要污染源之一，已引起国家环保总局的高度重视。因此钍的回收、尾矿坝的保护和三废治理不可再延缓。

[...]

三 建议国家采取紧急措施保护白云鄂博

矿钍和稀土资源

第一，为扭转白云鄂博矿目前不合理的开采方式，避免钍和稀土等宝贵资源被进一步大量丢弃和缓解对环境的污染，希望国家有关主管部门限制白云鄂博主矿和东矿的开采量，增加西

2. The Baiyun Obo mine and rare earth resources need to be protected and Rational use must be put in place

In the 1950s, China Baotou Steel began to build factories. The former Soviet Union designed the Baiyun Obo East Mine as a pure iron ore. It was a wrong decision without considering the comprehensive utilization of rare earths and thorium. Since the commissioning of Baotou Steel in 1958, the main and east mine has already extracted 250 million tons, leaving 350 million tons. Now the amount of mining reaches 10 million tons per year. According to this mining pace, the main and east mine will be mined in less than 35 years. China will become a small resource country for rare earths and thorium and repeat the fate of tungsten mines. The trends of rare earths and thorium in the 250 million tons of main and east ore that have been mined are shown in the table below.

The three main wastes of Baotou Steel discharge are waste gas, tailings fly dust, waste water and waste residue, which not only seriously pollute Baotou area, but are also one of the main pollution sources of the Yellow River, which has attracted the attention of the State Environmental Protection Administration. Therefore, the recovery of thorium, the protection of tailings dam and the treatment of those three wastes can no longer be delayed.

[…]

3. It is recommended that the state take urgent measures to protect Baiyun Ebo Mine and rare earth resources

First, in order to reverse the current unreasonable mining methods of the Baiyun Ebo mine, to avoid further discarding of precious resources such as thorium and rare earths and to alleviate environmental pollution, it is hoped that the relevant state authorities will limit the amount of mining of the Baiyun Obo main mine and the east mine. Increase the amount of mining in the west. In 2004, the actual mining of the main and east mine was 10 million tons. It is recommended to reduce it year by year from 2005 to 5 million tons by the end of 2007. In 2009, it will be reduced to 3 million tons. In 2012, mining will be stopped, and the main and east mine will be sealed up. The mine dam (tailing pound) will provide the need for rare earths and vegetation will be restored to protect the environment.

Second, in order to ensure the feasibility of the above measures, that it will not affect the current steel production of Baotou Steel and to avoid 20,000 employees of Baiyun Obo Mine to be laid off and unemployed. Academician Xu Guangxian was in front of the Baotou Rare Earth Research Institute of Baotou and Baotou Steel Company in April 2005. Professor Ma Pengqi and Dean of Baotou Mining Research Institute and other relevant comrades conducted research

矿开采量。2004年主东矿实际开采1000万吨，建议2005年起逐年减少，至2007年底减少到500万吨，2009年减少到300万吨，2012年起停止开采，把主东矿封存起来，用尾矿坝提供稀土的需要，并恢复植被，保护环境。

第二，为核实上述措施的可行性，不致影响包钢现在的钢铁生产量和造成白云鄂博矿山20000名职工下岗失业，徐光宪院士曾于2005年4月在包头与包钢公司包头稀土研究院前院长马鹏起教授和包钢矿山研究院院长等有关同志进行了研究，认为主东矿在三年内减少开采500万吨是可行的。500万吨矿石按目前选矿水平，只能生产190万吨铁精矿粉，回收率只有70%。如果把我国自主创新并已在高纯单一稀土分离工业中发挥重大作用的"串级萃取理论"应用到选矿中，回收率可以提高到90%，铁精矿产量可提高25%，800万吨矿石可顶1000万吨，缩减200万吨，若再增加西矿开采量300万吨，就可缩减主东矿开采量500万吨。目前西矿已建成选矿厂，开采300万吨是可以做到的，到2009年再增加200万吨开采量，把主东矿开采量减少到300万吨，至2012年就可把宝贵的主东矿封存起来。

为此，需要国家拨款100万—200万元作为提高选矿收率的研发经费。

第三，目前萃取分离钍和稀土技术已很成熟，成本增加很小，2005年计划生产5万吨稀土，应提取300吨二氧化钍。若国家以每吨1万—2万元成本价收购作为战略能源储备，可同时解决对环境的放射性污染问题，以后钍⊡铀233反应堆技术成熟时，就可利用储备的二氧化钍制备核燃料。国际上是以每吨13万美元生产成本作为是否值得开采的铀矿评价标准。钍和铀是同样重要的核能资源，用每吨1万—2万元人民币收购作为战略储备，是非常值得的战略投资，以免再造成钍资源的浪费和污染环境。

and concluded that it is feasible for the main and east mine to reduce mining of 5 million tons within three years. According to the current beneficiation level, 5 million tons of ore can only produce 1.9 million tons of iron concentrate powder, and the recovery rate is only 70%. If the "cascade extraction theory", which has been independently innovated in China and has played a major role in the high-purity single rare earth separation industry, is applied to beneficiation, the recovery rate can be increased to 90%, and the iron concentrate production can be increased by 25%, 8 million tons. The extracted ore at 10 million tons could be reduced by 2 million tons. If the mining volume of the west mine is increased by 3 million tons, the mining capacity of the main and east mine can be reduced by 5 million tons. At present, the West Mine has completed a concentrating plant, and it is achievable to mine 3 million tons. By 2009, another 2 million tons of mining will be added, and the amount of mining in the main and east will be reduced to 3 million tons. By 2012, the Main and East Mine could be sealed up.

To this end, the state needs to allocate 1 million to 2 million yuan as research and development funding to improve the beneficiation yield.

Third, the current technology for extracting and separating thorium and rare earth is very mature, and the cost increase is very small. In 2005, it plans to produce 50,000 tons of rare earth, and 300 tons of thorium should be extracted. If the country purchases as a strategic energy reserve at a cost price of 10,000-20,000 yuan per ton, it can solve the problem of radioactive pollution to the environment at the same time. When the technology of the thorium reactor is mature, the reserve of thorium can be used to prepare nuclear fuel. Internationally, the production cost of US$130,000 per ton is used as a uranium evaluation standard worthy of exploitation. Thorium and uranium are equally important nuclear energy resources. The acquisition of 10,000-20,000 yuan per ton as a strategic reserve is a very worthwhile strategic investment, to avoid wasting resources and polluting the environment.

To this end, the state needs to allocate 3 million to 6 million yuan as a strategic resource reserve and environmental management fees.

Fourth, due to the large-scale mining of iron ore, the stock of tailings dam has reached 150 million tons, of which about 9.3 million tons of rare earth and about 90,000 tons of thorium. In fact, this is a new mine of rare earth and thorium that we have left for future generations and should be managed. First, don't let it fly or lose. The tailings dam is a lake with only river inlets and no outlets. It balances the amount of water by evaporation. However, when the bottom of the lake is uneven, when the water surface is low, some of the tailings are exposed to the air. Because it is a fine powder of 200 mesh, it will fly and lose in the environment. Secondly, the tailings have been mixed with the sediment at the bottom of the lake. Measures should be taken to prevent the contents of rare earths and

为此，需要国家拨款300万—600万元作为钍资源战略储备和环境治理费。

第四，由于多年来铁矿的大量开采，尾矿坝存量已达1.5亿吨，其中稀土约930万吨，钍约9万吨。实际上这是我们留给子孙后代的一个新的稀土和钍矿，应设法予以保护。首先，不让它飞散或流失。尾矿坝是一个只有河流进口，没有出口的湖，靠蒸发平衡水量。但湖底高低不平，水面低时，部分尾矿暴露在空气中，因为是200目的细粉，会飞散损失并污染环境。其次，尾矿目前已和湖底泥沙混合，应采取措施不让其稀土和钍的含量进一步被其它杂质所稀释，造成今后提取稀土和钍的困难。

为此，需要国家拨款100万—200万元作为保护尾矿坝的研究和采取措施的费用。

以上三项共需国家拨款500万—1000万元。

第五，现在包钢公司向国家交纳的矿产资源开采费，是按照矿区每平方公里500万元收取的。目前主矿和东矿占地3平方公里，由包钢公司开采，每年向国家缴纳开采费1500万元，西矿占地42平方公里，若开采每年要交纳2.1亿元，现因包钢未交开采费，所以无权管理西矿，造成西矿乱采滥挖现象十分严重，这是我国矿山管理工作中的漏洞。建议国土资源部收取白云鄂博矿开采费时按照开采矿石量计费，如每年开采1000万吨，交纳1500万元。这样包钢以开采西矿代替主东矿，可不必增加开采费。因为这也是包钢不愿开采西矿的原因之一。

第六，关于国家加快快堆和钍⊡铀233核反应堆的研究开发，建议组织院士专家深入调查研究，进一步咨询和论证。有关我国核能发展的整体战略，中国科学院学部核能发展战略咨询组正在研究。

以上6条建议，以前3条最为紧迫。

strontium from being further diluted by other impurities, which will cause difficulties in extracting rare earths and thorium in the future.

To this end, the state needs to allocate 1 million to 2 million yuan as a cost to study and take measures to protect the tailings dam.

The above three items require a total of 5 million to 10 million yuan.

Fifth, the mining resources paid by Baotou Steel Company to the state are now charged at 5 million yuan per square kilometer in the mining area. At present, the main mine and the east mine occupy an area of 3 square kilometers and are mined by Baotou Steel Company. The annual mining fee is 15 million yuan, and the west mine covers an area of 42 square kilometers. If mining costs 210 million yuan per year, it is not due to Baotou Steel. The mining fee is paid, so there is no right to manage the west mine, which causes the phenomenon of indiscriminate mining in the western mine. This is a loophole in the mine management work in China. It is recommended that the Ministry of Land and Resources charge the Baiyun Obo mining fee according to the amount of mining ore, such as mining 10 million tons per year, pay 15 million yuan. In this way, Baotou Steel replaces the main and east mine with mining west mines, and it is not necessary to increase the mining cost. Because the mining fee is one of the reasons why Baotou Steel is not willing to exploit the West Mine.

Sixth, regarding the research and development of the national accelerated fast reactor and the thorium reactor, it is recommended to organize academicians to conduct in-depth investigation and research, and further consultation and argumentation. The overall strategy for the development of nuclear energy in China is being studied by the Nuclear Energy Development Strategy Advisory Group of the Chinese Academy of Sciences.

Annexe 5

Different possible uses of social and environmental costs evaluation: comparison of methodologies used by True Price and le Basic on the case of cocoa value chain

Foreword

This note was written by the doctoral student during her thesis work at Basic and CentraleSupélec. This note was intended for Basic to summarize the methodological and conceptual differences between the different uses of the concepts of externalities and social costs for the purpose of producing studies on the sustainability of value chains. Indeed, the thesis work was done in CIFRE in the company Basic. The thesis work focused on developing a framework for analysing the impacts (social, environmental and economic) of the mineral raw material sectors. The development of this analytical framework had two main objectives for Basic: to extend / verify the applicability of the social cost analysis methodology developed by Basic on agricultural sectors to mineral sectors, and to bring key conceptual and methodological elements to strengthen the social cost analysis framework already used by Basic. This appendix thus makes it possible to expose the framework which was the starting point of the doctoral student in his research on the social costs. This framework was then enriched by a reflection on depletion presented in this thesis and on the criteria to be used to use KW Kapp's conceptual framework (see Chapter 2, paragraph 5.2.). This appendix also makes it possible to present some of the differences in the methodologies used by other economic actors like True Price. It is also important to note that the appendix presents a description of the analytical frameworks used by True Price and the Basic in 2016, at the time of the production of this methodological note and could have since evolved.

The purpose of this paper is to see through a case study how the analysis of True Price and Basic about social costs of production and consumption processes are different. Thus, we will see that the initial observations and objectives are not the same and are reflected in the choice of the conceptual frameworks mobilized, and briefly review the differences in the results for the case study of the cocoa sector in Ivory Coast.

Background of True Price

Extra-financial reporting

In 2014, the EU adopted a directive requiring large companies to report on their impacts or "extra-financial information" (EU, 2014). The work of the International Integrated Reporting Council (IIRC) has allowed companies to integrate more and more information on impacts into their annual report.

Monetary valuation of these impacts

At the global level, the United Nations has put in place the *System* of *Environmental-Economic Accounting* (SEEA) initiative to help produce internationally comparable statistics on the environment and its relationship with the economy. Non-governmental efforts include general reporting standards such as Global Reporting Initiative (GRI), Sustainability Accounting Standards Board (SASB) and IIRC. Other important efforts are sustainability accounting, the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) who put in place with the World Resources Institute (WRI) the Greenhouse gas protocol (GHG protocol), the Declaration of Natural Capital and the European Business and Biodiversity Platform.

Date of creation	*Name*	*Size*	*Description*	*Country*	*Source*
2000	Trucost Plc	51 à 200	It is an environmental research organization that was created to help businesses and investors understand the environmental impacts of business activities. Trucost provides data and analysis on business emissions and the use of natural resources and presents them in financial and quantitative terms. It is a subsidiary of S & P Global (Standard & Poor's one of the top 3 rating agencies) led by S & P Dow Jones Indices (which is defined as the world's leading index database, and their indices would be the first in terms of investment decision)	UK	(Bourghelle, Jemel, & Louche, 2011)
2012	True Price	11-50	True Price is a social enterprise[126] serving multinationals, SMEs, NGOs and government organizations. True Price offers help with risk management and strategic decisions by providing insight into their impacts, risks and opportunities. True Price proposes a "true price" measure measuring the "sustainability" of products and services through the measurement of negative, social and environmental externalities across the value chain.	Netherlands	(« About us | True Price », s. d.) (« True Price », s. d.)

1. Economic, social and environmental findings mobilized by Basic and True Price for their "Business Case"

We present here the starting point for the analysis of each organization. We will then show how those divergent findings relate to the conceptual frameworks mobilized.

Basic: expanding economy, increasing impacts and insufficient socio-institutional framework

The analysis of the Basic is based on the acknowledgment of the attack on the limits of the planet generated by the growing impacts of economic activities. The search for ever higher profitability globally is seen as one of the determinants of this attack. National regulatory frameworks are struggling to stem this phenomenon and voluntary commitments have been proven insufficient. "In recent decades, the growing diffusion of the consumer society model has been accompanied by a geographic breakdown of economic activities that were previously carried out within the company's boundaries. Accelerated by the increasing liberalization of trade, this evolution has been accompanied by a dynamic of economic concentration: certain actors who are able to control the information necessary for the smooth operation of the globalized chains thus capture a growing share of the economic value (Ronald W. Cotterill, 2001). At the same time, to achieve ever higher levels of profitability, these chains generate increasing impacts that are reported on the community and individuals in the different territories: pollution, climate change, resource depletion, precarious working conditions, standard of living below the vital minimum... Faced with these growing impacts of globalized chains, the national systems of regulation carried by the States are more and more out of date, and the procedures of Corporate Social Responsibility (CSR) deployed by the economic actors show their limits. Indeed, most of the extra-financial evaluations are limited to the study of internal processes without measuring their impact" (Alliot, Cortin, Feige-Muller, Ly, & Pigneur, 2016).

[126] According to the Dutch social enterprise platform, True Price is in line with the European definition of social entrepreneurship

True Price: Increasing impacts, but growing consideration of externalities by economic actors

For True Price, externalities are increasing (True Price, Deloitte, EY and PwC, 2014), but this is opposed by a growing movement of internalisation of externalities by economic actors (de Groot Ruiz & Fobelets, 2016, p. 13, True Price, Trucost, Fairtrade International, forthcoming, 9), mainly due to the lowering of the cost of information, international agreements and pressure from civil society.

Indeed, for True Price, externalities are related to transaction costs (True Price, Deloitte, EY and PwC, 2014, p.13), citing the work of Ronald Coase. They consider that if the transaction costs decrease, externalities are automatically internalized in the market:

« From an economic point of view, interventions to internalize externalities can be found that are mutually beneficial. Finding and implementing these interventions, however, have costs called transaction costs. If these transaction costs are sufficiently low, then naturally the involved stakeholders will find and implement a solution to internalize externalities in a free market. If transaction costs are sufficiently high, however, then stakeholders will not find or implement a solution in a free market (Coase, 1960). »

True Price then finds that transaction costs decrease with several observations (True Price, Deloitte, EY and PwC, 2014, p. 14-15) :

- the cost of information decreases
- several non-binding international agreements (OECD guidelines, etc.) are behind the internalisation of externalities.
- "reputational risk" (True Price, Trucost, Fairtrade International, à paraître, p. 9) is reinforced by the emergence of social networks

Beyond these considerations on the supposed drop in transaction costs, regulation is also seen as a lever for internalising social costs. At last, for True Price the "willingness" of governments to regulate to internalize externalities is dependent on their level of development.

2. What goals are behind the calculation of social costs for Basic and True Price?

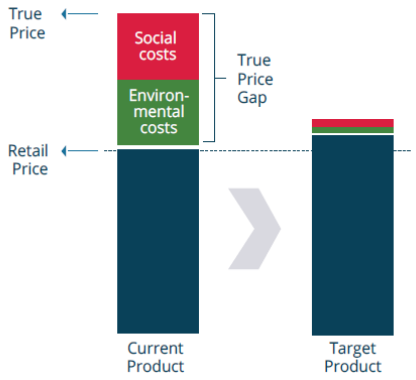
Basic: comparing models and promoting the most responsible models

The Basic investigates the links between: on the one hand, the governance of global value chains (GVC) and the distribution of the corresponding value, and on the other hand, the social and environmental impacts and the social costs that result from them. The aim is to "question in depth the relevance of established economic models regarding their impacts on society, in order to initiate and then drive the ecological and social transitions that are essential today."

For Basic, the fact of using the monetary unit does not necessarily mean giving a price, and giving a price does not necessarily mean creating a market: "we must not confuse monetarization [and] commodification" (Gadrey & Lalucq, 2015). Indeed, it is less a matter of calculating the fair price of consumer goods than of making visible to citizens, civil society, public authorities and economic actors how and why the sectors generate societal costs today, so to identify levers of action on the economic and socio-institutional level.

True Price: internalisation of externalities in price

For True Price, the goal is to sum up all externalities in order to help the actors to "internalize" them by increasing the price. This price increase can be mitigated by phenomena presented as indispensable in the management of externalities: better risk management, cost reduction, innovations and branding improvement (de Groot Ruiz & Fobelets, 2016, p. 13).



True pricing according to True Price. Source: True Price, Deloitte, EY and PwC. (2014). *The Business Case for True Pricing*

In one word, the goal is to make the market more efficient.

3. True Price / Basic comparison on the case of the cocoa sector in Côte d'Ivoire

The case study of the cocoa sector in Ivory Coast (Alliot, Cortin, Feige-Muller, & Ly, 2016; de Groot Ruiz & Fobelets, 2016) was chosen to compare the methodologies, since the calculation of social costs and externalities was conducted in the same economic sector, in the same time and geography.

Summary of differences in methodological and conceptual framework

Conceptual background:

	Basic (Alliot, Cortin, Feige-Muller, & Ly, 2016)	**True Price** (de Groot Ruiz & Fobelets, 2016)
Reference to conceptual frameworks	Kapp and Global Value Chains: Challenging the organization of value chains that create / perpetuate unequal power relations between actors, which are not mitigated by market mechanisms. Role of institutions to reduce costs	Pigou is not mentioned, but it is clearly his definition of externalities and some of his proposals (taxes) that are put forward. Reference to Coase Theorem (True Price, Deloitte, EY and PwC, 2014, p. 13) to argue that transaction costs, and externalities are related.
Definition of social costs	‘’All direct and indirect losses, both present and future, that are borne by third parties or the community due to the social, health and environmental impacts of production and consumption patterns." <u>Reference</u>: the "set of damages and negative consequences borne by third parties or the community as a whole" generated by "modes of production" and consumption, whose private actors "are not held responsible" and who "would could have been avoided " (Kapp, 1963)	« External costs are costs caused by economic activities which are not reflected in the prices charged for the goods and services being provided. » <u>Reference</u> (not explicit): "the effect of the action of one economic agent on another which is exercised off market" (Pigou, 1932). But in Pigou, reintegration into the market is not necessarily done directly by the price.
Choice of studied impacts	- Choice of the studied impacts: bibliographical review of the stakes of the sector - Additional impact compared to True Price: The contribution of the sector to the essential services (collective organization aspect)	- Choice of the studied impacts: p.6: problems identified by the NGOs and p.7: True Price says that it corresponds to all that is important and all on which they were able obtain data
Cost calculation and results: (see next paragraph for details)	- (p.8) Willingness to evaluate "Actual Expenses", that is to say money really spent at the public expenses	- Model: a non-monetary impact (footprint) multiplied by its price (whose determination is not explicit)

	Basic (Alliot, Cortin, Feige-Muller, & Ly, 2016)	**True Price** (de Groot Ruiz & Fobelets, 2016)
Recommendations	The recommendations are not made factor by factor (deforestation, child labour), but in the reinforcement of logic or in interventions countering the negative impact loops and reinforce the positive loops: - Reorganization of the value chain - Proposal for a lower impact agricultural model (agroforestry) - Valorisation of the terroir etc.	(p.29) Using the results: ex-ante: compare the interventions with the strongest "return on investment" (the example given is to increase pesticides to reduce deforestation). The recommendations are not hierarchical and not very precise. They can even be potentially contradictory, because the study of the links between the impacts and the dynamics is not made (ex: to increase the yields and to use less pesticides, without saying how) ex-post: measuring the impact of the intervention
Presentation of the results	p.10 : Comparing societal costs and value to discuss costs and benefits for each link within the chain: the price mechanism is not enough to reduce social costs	p.12, Figure 3 The cost is internalized in the price, the increase is temporary, until the problem disappears thanks to the increase of the price which allows to gain in "global" performance
Limitations identified in the study	p.7 : - no completeness or precision of calculations - weakness linked to the consolidation of studies based on different methodologies	- On the causality label -> reduction of impacts True Price warns about "the effect of selection" : the label would certify those already having the best practices.
Transparency on the methodology	- The details of the cost estimate are explained p.60 to 65	- Only the externalities calculation grid is provided p.11 - In other reports and presentations (True Price, Trucost, Fairtrade International, à paraître) we find a little more detail on the nomenclature, but never the coefficients

The True Price conceptual framework appears close to Chicago school of economics, including George Stigler's (Stigler, 1966) reinterpretation of the Coase Theorem, which is not quoted, but which seems closer to True Price's argument than Coase's article (Coase, 1960): Stigler shows that when the transaction costs are equal to 0 the problem of externalities is self-regulating. Indeed, True Price points out that these transaction costs, and hence the externalities, have an almost natural tendency to fall (see paragraph 3 above).

However, True Price (TP) points out that there are barriers to internalise externalities. TP briefly mentions the fact that some economic actors oppose the internalisation of externalities (True Price, Deloitte, EY and PwC, 2014, p. 15), but this is presented as punctual and as a result of a misunderstanding issues and not as a result of potentially divergent interests and institutionalized power relations within an economic model. Finally, the main obstacle, that True Price intends to address, to reducing transaction costs and integrating externalities is referred to as the lack of access to information on these externalities. The idea is to show that companies have an interest in

worrying as soon as possible to integrate those externalities as they will be internalized anyway one day and therefore to inquire with True Price.

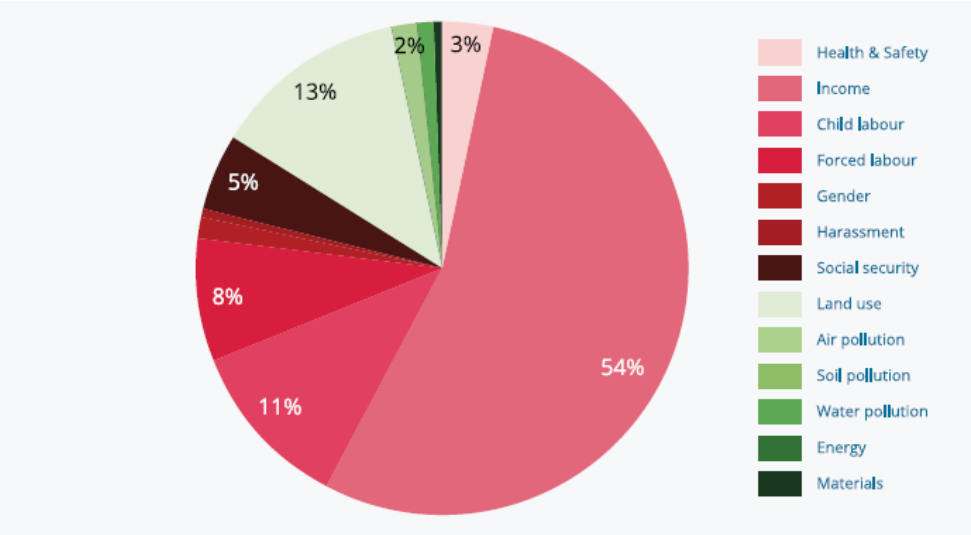
On the other hand, the starting point of Basic, which is part of Kapp's social cost theory, is that there is no reason for private economic actors to take spontaneously externalities into account. Indeed "it can be more profitable to operate a factory without a safety device" (Kapp, 1963), in the absence of "developed social legislation". The existence of the externalities themselves is driven by the desire to maximize profit at all levels. If True Price and Basic share a similar finding on the need to determine the current social and environmental consequences in terms of costs, the goal of Basic is to identify levers of action on the economic and socio-institutional level to restrain those costs, which could be done through the question of price, but not only.

Brief comparison of results

Underestimation VS claim to completeness

True Price

- Total of the social costs: 83% for the social work (11% for child work, 54% for income corresponding to the underpayment of the Basic nomenclature), 3% environmental, and 13% "land use" (deforestation)



Share of each externality in the total external costs of conventional cocoa cultivation. Source: de Groot Ruiz, A., & Fobelets, V. (2016). *The True Price of Cocoa from Ivory Coast*.

Basic (Alliot, Cortin, Feige-Muller, & Ly, 2016, fig. 38 and 41) :

47%	underpayment
14%	child labour
21%	deforestation
19%	essential services
0,2%	water pollution

The proportions are therefore roughly comparable (the category "no contribution to essential services" calculated by the Basic represents about 20% of the total, and is not calculated by True Price, but it corresponds in proportion to the 20% of various problems. not calculated by Basic: health, forced labour, gender and harassment).

However, the total amount is much higher in the evaluation of True Price: 1.8 euros/kg for Basic (Alliot, Cortin, Feige-Muller, & Ly, 2016, p. 63)and 5.75 euros/kg for True Price (de Groot Ruiz & Fobelets, 2016, p. 15).

This is due to Basic's desire to provide a minimal estimate of social costs (undervaluation), which is different from True Price's desire for completeness (over-evaluation).

Comparison of the calculation methodology

Basic	True Price
- Basic looks at 'real expenditure', except for the living wage - For the living wage and essential services, the evaluation is compared to a social norm set collectively as prescribed by Kapp. But for the environmental and social impacts the norm appears less directly in the report - If we compare with True Price: the Basic mainly consider abatement costs (see right): how much we pay to remove the problem and not how much the problem is currently costing to the society.	- a model where a non-monetary impact (footprint) is recorded and multiplied by its price (the determination of which is not explicit) - The costs are separated into 2 types: the damages (what is lost ; calculated with mainly with contingent valuation) and the abatement cost (the price of prevention / rehabilitation)

Bibliographie

About us| True Price. (s. d.). Consulté 10 mai 2017, à l'adresse http://trueprice.org/about-true-price/

Alliot, C., Cortin, M., Feige-Muller, M., & Ly, S. (2016). *La face cachée du chocolat*. Le Basic, PFCE.

Alliot, C., Cortin, M., Feige-Muller, M., Ly, S., & Pigneur, J. (2016). Les coûts sociétaux comme indicateurs de développement durable des chaînes globales de valeur. L'exemple de la filière cacao en Côte d'Ivoire et au Pérou. In *RIODD 2016*. Saint-Étienne, France. Consulté à l'adresse https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01349957

Bourghelle, D., Jemel, H., & Louche, C. (2011). Changing the Dominant Convention: The Role of Emerging Initiatives in Mainstreaming ESG. In R. P. William Sun Céline Louche (Éd.), *Finance and sustainability: towards a new paradigm? A post-crisis agenda* (p. 85-117). Emerald. https://doi.org/10.1108/S2043-9059(2011)0000002011

Coase, R. H. (1960). The problem of social cost. *The Journal of Law and Economics*, *III*, 79-81. https://doi.org/10.1002/sres.3850090105

De Groot Ruiz, A., & Fobelets, V. (2016). *The True Price of Cocoa from Ivory Coast*. Consulté à l'adresse http://www.chocolatemakers.nl/wordpress/wp-content/uploads/2016/04/TP-Cocoa.pdf

Gadrey, J., & Lalucq, A. (2015). *Faut-il donner un prix à la nature?* Paris: Petits matins [u.a.].

Pigou, A. C. (1932). *The economics of welfare [1920]* (McMillan&Co.). London ; New York.

Stigler, G. J. (1966). *The Theory of Price*. Prentice Hall PTR.

True Price. (s. d.). Consulté 10 mai 2017, à l'adresse https://www.linkedin.com/company/true-price

True Price, Deloitte, EY and PwC. (2014). *The Business Case for True Pricing*. Consulté à l'adresse http://trueprice.org/wp-content/uploads/2015/02/True-Price-Report-The-Business-Case-for-True-Pricing.pdf

True Price, Trucost, Fairtrade International. (à paraître). *The external costs of banana production: a global study*.

Annexe 6

Formulaire synthétisant les variables et constantes utilisées dans l'évaluation des coûts sociaux des déchets miniers et de leur lien avec la dynamique d'épuisement de la ressource au chapitre 3

Variables et constantes	Définition	Formules	Valeurs constantes		
			1980 1994	1995 1999	2000 2016
Teneur OTR_n	Teneur moyenne d'exploitation de l'année n pour Baiyun Ebo : la masse d'OTR rapportée à la masse totale de minerai extraite	= $POTR_n$ / $PMin_n$*Rdt OTR (1) = (ROTR- ∑_n 〖E OTR_n〗)/(RMin- ∑_n 〖$PMin_n$〗) (2)			
$POTR_n$	Production massique d'oxydes de terres rares de Baiyun Ebo pour l'année n		Voir Tableau 12		
RdtOTR	Rendement du procédé permettant d'obtenir des OTR (du minerai jusqu'à obtention des TR séparées)		3,2%	6,3%	10,0%
RdtχOTR	Rendement de l'étape de traitement chimique des terres rares		80%	80%	80%
RdtsepOTR	Rendement de l'étape de séparation des terres rares		92%	92%	92%
$PMin_n$	Production massique de minerai de terres rares de Baiyun Ebo pour l'année n	= $POTR_n$ / Teneur OTR_n * Rdt OTR			
ROTR	Réserves en OTR du gisement		5 millions t gisement Ouest 30 millions t gisement Principal-Est		
RMin	Réserves en minerai du gisement		800 millions t gisement Ouest 600 millions t gisement PE		
$EOTR_n$	Masse d'OTR qui a été enlevée du gisement au cours du temps	= $POTR_n$/Rdt			
$PRweikuang_n$	Masse de résidus ajoutée dans le parc à résidus de Weikuang à l'année n	= $PMin_n$-$PconcOTR_n$- PconcFen (3)			
$PconcFe_n$	Quantité de concentré en Fe produit à Baotou à l'année n	=RdtconcFe*$PMin_n$ (4)			

Variables et constantes	Définition	Formules	Valeurs constantes 1980 1994	 1995 1999	 2000 2016
RdtconcFe	Rendement de la production de concentré permettant de passer de PMin à PconcFe		38% pour la Mine PE 37,05% pour la Mine Ouest		
$PconcOTR_n$	Quantité de concentré en OTR produit à Baotou à l'année n	$=POTR_n/((RdtχOTR * RdtsepOTR)*TeneurconcOTR)$ (5)			
TeneurconcOTR	Teneur en OTR dans le concentré			55%	
$PRconcTh_n$	Flux de thorium dans les résidus issus de la concentration	$=PMin_n *TeneurTh*RdtRconcTh$ (6)			
Teneur Th	Teneur du thorium dans le minerai			0,032%	
RdtRconcTh	Rendement permettant de passer du Th contenu dans le minerai au Th contenu dans les résidus de concentration			80,63%	
PRχThn	Flux de thorium dans les résidus issus du traitement chimique	= Teneur concTh*$PconcOTR_n$ (7)			
Teneur concTh	Teneur du thorium dans le concentré			0,21%	
$PRThWeikuang_n$	Quantité totale de thorium rejetée dans le parc à résidu Weikuang	= $PRconcTh_n$ + $PRχTh_n$ (jusqu'en 2002) = $PRconcTh_n$ (après 2002) (8)			
$PRconcOTR_n$	Flux d'OTR dans les résidus issus de la concentration	= $EOTR_n$ – ($PconcOTR_n$ * TeneurconcOTR) (9)			

Déséconomies OTR_n	Déséconomies « strictes » : la part irrécupérable des ressources perdues. Il est considéré que 20% des terres rares entrant dans un parc à résidus sont dispersées et perdues	= 20% (($PMin_n$*$TeneurOTR_n$) - 80% ($POTR_n$/(RdtχOTR*RdtSepOTR))) (10)	
		Scénarii	
Variables	**Définitions**	**Formules Scénarii 1 à 5**	**Formules Scénario 6**
$PRconc_n$	Masse de résidus de concentration	= $PMin_n$-$PconcOTR_n$- $PconcFe_n$	
$PRnouveau_n$	Quantité de résidus ajoutée dans le nouveau parc à l'année n	= ($PRconc_n$ + $PRweikuang_{1965-2016}$/15) – 95% * ($PRconcTh_n$ + $PRThWeikuang_{1965-2016}$/15)	= $PRnouveau_n$ = $PRconc_n$ – 95% * $PRconcTh_n$
PRnouveau cumulée	Quantité cumulée de résidu dans le nouveau parc		
PRWeikuang cumulée	Quantité restante de résidus dans l'ancien parc de Weikuang	= $PRWeikuang_{1965-2016}$ -x ($PRWeikuang_{1965-2016}$/15) x le nombre d'année à partir du début de la dépollution (1=2017)	