



ULB

UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES, UNIVERSITÉ D'EUROPE

Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire

Faculté des Sciences

Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

L'approvisionnement en métaux, menace pour les énergies renouvelables ?

La question des réserves, de l'énergie de production et de la criticité

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

Année Académique : **2015-2016**

Directeur : **PROF. KUNSCH, PIERRE-LOUIS**

Résumé

Les systèmes de production d'énergie renouvelable sont en fort développement, en particulier les éoliennes et les panneaux solaires photovoltaïques.

Un certain nombre d'études scientifiques analysées dans le cadre de ce travail se posent la question de la disponibilité d'une quantité suffisante de métaux pour mettre en œuvre ces systèmes de production d'énergie à grande échelle. En outre, quelques études cherchent à savoir si l'énergie de production de ces métaux pourrait avoir des conséquences néfastes sur le EROI des systèmes de production d'énergie.

Autrement dit, la question qui est posée est celle des contraintes que ferait peser la disponibilité en métaux sur le développement des systèmes de production d'énergie renouvelable. Ce travail s'est penché de façon plus approfondie sur la contrainte des réserves, celle de l'énergie de production et les conséquences sur le EROI, et sur la question de la criticité. La méthode suivie dans ce travail a consisté en une analyse des mécanismes de ces contraintes à l'aide de la littérature scientifique spécialisée. Afin de quantifier certaines contraintes, ont été effectués les calculs du rapport réserve sur production, du futur EROI d'une éolienne selon l'évolution de l'énergie de production du cuivre, enfin du HHI ou indice de concentration de la production. Ce travail s'est concentré sur les systèmes de production d'électricité que sont les éoliennes et les panneaux photovoltaïques. Du point de vue des métaux, il s'est limité aux tellure, indium, dysprosium, néodyme et cuivre.

Les résultats détaillés dans ce travail mettent en évidence une absence de menace immédiate du point de vue des réserves, notion par ailleurs dynamique dont il a été montré qu'elle ne constitue pas le meilleur marqueur de rareté pour un métal. La question du EROI en lien avec l'énergie de production des métaux est probablement une contrainte de long terme, qui a fait l'objet d'un nombre réduit d'étude et mériterait d'être davantage approfondie. Les menaces les plus présentes actuellement sont celles développées dans les études de criticité, parmi lesquelles la plus prégnante est la question de la concentration de la production des terres rares. Le problème des impacts environnementaux et de ses conséquences sur des législations plus restrictives envers la production minière, ainsi que la question des coproduits ont également été pointés comme contraignantes pour la production de certains métaux.

Parmi les pistes de solutions aux problèmes présents ou futurs soulevés, on citera le recyclage qui est déjà mis en œuvre actuellement mais pour lequel des progrès sont encore possibles. Le « *Design For Recycling* » est un des moyens de rendre le recyclage plus performant. Ce travail aborde également les pistes des « *éléments de l'espoir* », philosophie consistant à produire prioritairement avec les éléments chimiques les plus abondants. On parlera également de la substitution au niveau du concept, ou au niveau du métal, des accords commerciaux pour faciliter l'accès aux matières premières, de la question de la législation en matière minière et de la durée de vie des systèmes.

Pour finir, ce travail émet quelques critiques sur les limites des études nécessairement menées sur des scopes limités et pose la question de l'intégration des différentes études. Outre cette limitation, on met également en évidence une limite de la présente étude, qui est celle de la sensibilité des éoliennes et des panneaux photovoltaïques face au manque de tel ou tel métal.

Table des matières

Introduction.....	1
1 État de l’art et méthodologie	2
1.1 Introduction.....	2
1.2 État de l’art.....	2
1.3 Choix méthodologiques.....	3
2 Sensibilité des systèmes aux métaux	5
2.1 Introduction.....	5
2.2 Éolienne – Nd – Dy	5
2.3 Panneaux PV – Te – In	7
2.4 Le cuivre	7
2.5 Conclusions.....	8
3 Les réserves	9
3.1 Introduction.....	9
3.2 Définition des termes	9
3.3 Croûte terrestre et gisements	10
3.4 Variation historique.....	11
3.5 Variation spatiale.....	13
3.6 Substitution atomique.....	14
3.7 Impact du prix/marché.....	14
3.8 Prédications - déplétion	14
3.9 Futur des réserves	15
3.10 Conclusions.....	16
4 Teneur des gisements et énergie	17
4.1 Introduction.....	17
4.2 Définitions	17
4.3 Évolution historique	17
4.4 Mécanismes économiques	19
4.5 Prévisions.....	20
4.6 Énergie de production selon la teneur.....	20
4.7 Autres facteurs jouant sur énergie.....	22
4.8 Progrès possibles énergie.....	23
4.9 Conclusions.....	25
5 Le EROI.....	27
5.1 Pourquoi parler du EROI ?	27
5.2 Définitions	27
5.3 Facteurs affectant calcul EROI.....	28

5.4	Limites EROI sur économie.....	29
5.5	Valeur du EROI minimum	29
5.6	Conséquences baisse EROI.....	30
5.7	Impact de la teneur sur le EROI.....	31
5.8	Conclusions.....	33
6	Criticité	34
6.1	Introduction.....	34
6.2	La criticité	34
6.3	Concentration de la production	34
6.4	Risque du pays.....	35
6.5	Dépendance des coproduits.....	36
6.6	Environnement et législation	37
6.7	Conclusions.....	38
7	Étude quantitative.....	39
7.1	Introduction.....	39
7.2	Réserves – production.....	39
7.3	Teneur – énergie – EROI.....	42
7.4	HHI	46
7.5	Conclusions.....	49
8	Solutions.....	50
8.1	Le recyclage	50
8.2	Le « Design for Recycling »	52
8.3	La substitution	53
8.4	Les « <i>Elements of Hope</i> » (Diederer, 2010a)	53
8.5	Durée de vie	54
8.6	Accords commerciaux	55
8.7	Législation.....	55
8.8	Conclusions.....	55
9	Conclusions.....	56
9.1	Conclusions sur les contraintes	56
9.2	Réflexions sur les limites des études.....	57
10	Bibliographie.....	58
11	Annexes	63
11.1	Annexe 1 : analyse des études	63
11.2	Annexe 2 : calculs étude quantitative	69

Table des figures

FIGURE 1 : LISTE DES ÉTUDES PORTANT SUR LE LIEN ENTRE SYSTÈMES DE PRODUCTION D'ÉNERGIE ET DISPONIBILITÉ DES MÉTAUX	2
FIGURE 2 : DENSITÉ ÉNERGÉTIQUE DES AIMANTS (GUTFLEISCH ET AL., 2011, PAGE 823).....	5
FIGURE 3 : AVANTAGES D'UN MOTEUR À AIMANTS PERMANENTS SUR UN MOTEUR À INDUCTION (GUTFLEISCH ET AL., 2011, PAGE 829)	6
FIGURE 4 : ARBRE DES OPTIONS CONCEPTUELLES POUR UNE ÉOLIENNE (HABIB ET WENZEL, 2016, PAGE 3857).....	6
FIGURE 5 : SCÉNARIO D'ÉVOLUTION DES PARTS DE MARCHÉ DES DIFFÉRENTS TYPES DE PANNEAUX PV (CANDELISE ET AL., 2012, PAGE 4978)	7
FIGURE 6 : RÉSERVES ET RESSOURCES (MCKELVEY, 1974, PAGE 76)	9
FIGURE 7 : DÉCOMPOSITION DE L'URR, ADAPTÉ DE (CANDELISE ET AL., 2012, PAGE 4976)	10
FIGURE 8 : LES PRINCIPAUX ATOMES CONSTITUANT LA CROÛTE CONTINENTALE TERRESTRE (SKINNER, 1979, PAGE 4214).....	10
FIGURE 9 : ÉVOLUTION DE LA PRODUCTION MINIÈRE DE PLUSIEURS PAYS AU FIL DU TEMPS (SKINNER, 1979, PAGE 4213).....	11
FIGURE 10 : PRODUCTION MONDIALE DE CUIVRE (MEINERT ET AL., 2016, PAGE 6).....	13
FIGURE 11 : UN SCÉNARIO DE PRODUCTION MONDIALE DE CUIVRE PAR TYPE DE GISEMENT (NORTHEY ET AL., 2014, PAGE 196).....	15
FIGURE 12 : ÉVOLUTION DE LA TENEUR MOYENNE DES GISEMENTS DE CUIVRE 1770-2008 (CROWSON, 2012, PAGE 69)	18
FIGURE 13 : ÉVOLUTION HISTORIQUE DE LA TENEUR DES GISEMENTS DE CUIVRE POUR PLUSIEURS PAYS ET MODÉLISATION DE LA TENEUR FUTURE (NORTHEY ET AL., 2014, PAGE 197)	18
FIGURE 23 : NOMBRE DE GISEMENTS ET TENEUR PAR TYPE DE GISEMENT DANS LE MONDE (CROWSON, 2012, PAGE 61).....	19
FIGURE 24 : PART DE LA PRODUCTION MINIÈRE DE CUIVRE À L'ÉCHELLE PAR CONTINENT (CROWSON, 2012, PAGE 60).....	20
FIGURE 14 : ÉNERGIE UTILISÉE POUR L'EXTRACTION ET LA PRODUCTION DE CUIVRE ISSU DE CHALCOPYRITE (CUFeS ₂), ADAPTÉ DE SKINNER (1979, PAGE 4215)	20
FIGURE 15 : ÉNERGIE NÉCESSAIRE À CHAQUE ÉTAPE DE LA PRODUCTION DE CUIVRE, POUR DIFFÉRENTS VALEURS DE TENEUR (UNEP, 2013, PAGE 88)	21
FIGURE 16 : ÉNERGIE DE PRODUCTION DU CUIVRE EN FONCTION DE LA TENEUR POUR DIFFÉRENTS PROCÉDÉS (NORTHEY ET AL., 2014, PAGE 191).....	21
FIGURE 17 : DISTRIBUTION PROBABLE DES MÉTAUX RARES DANS LA CROÛTE TERRESTRE - TONNAGE EN FONCTION DE LA TENEUR (SKINNER, 1976, PAGE 263)	22
FIGURE 18 : ÉNERGIE DE PRODUCTION DU CUIVRE EN FONCTION DE LA TENEUR, POUR DEUX TYPES DE GISEMENTS DIFFÉRENTS - ÉCHELLE LOGARITHMIQUE (SKINNER, 1979, PAGE 4215)	22
FIGURE 19 : ÉNERGIE DE PRODUCTION EN FONCTION DE LA FILIÈRE DE PRODUCTION (UNEP, 2013, PAGE 83)	23
FIGURE 20 : RAPPORT ENTRE L'ÉNERGIE DE PRODUCTION RÉEL ET LE MINIMUM THÉORIQUE (UNEP, 2013, PAGE 79)	24
FIGURE 21 : INTERVALLES D'ÉNERGIE DE PRODUCTION (DE L'EXTRACTION MINIÈRE AU RAFFINAGE) ENTRE UNITÉS DE PRODUCTION ET VALEURS MOYENNES POUR PLUSIEURS MÉTAUX (UNEP, 2013, PAGE 83).....	24
FIGURE 22 : COMPARAISON ENTRE L'ÉNERGIE MOYENNE ET L'ÉNERGIE MINIMALE RÉALISÉE EN PRATIQUE POUR DIVERS POSTES DE DÉPENSE ÉNERGÉTIQUE POUR L'EXTRACTION MINIÈRE ET LA PRODUCTION MÉTALLIQUE AUX USA (UNEP, 2013, PAGE 92) ..	25
FIGURE 25 : LES STADES DE DÉVELOPPEMENT D'UNE SOCIÉTÉ HUMAINE EN FONCTION DU EROI GLOBAL (LAMBERT ET AL., 2014, PAGE 164)	29
FIGURE 26 : EROI DES SYSTÈMES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ, TENANT COMPTE OU NON DU BUFFERING, ET SEUIL ÉCONOMIQUE DU EROI (WEIßBACH ET AL., 2013, PAGE 219)	30
FIGURE 27 : POURCENTAGE DE L'ÉNERGIE PRODUITE DISPONIBLE POUR LE RESTE DE L'ÉCONOMIE, EN FONCTION DU EROI DE LA SOURCE DE PRODUCTION	31
FIGURE 28 : EROI DE SYSTÈMES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN FONCTION DE LA TENEUR DU MINÉRAI DE CUIVRE (ÉCHELLE LOGARITHMIQUE) (FIZAINE ET COURT, 2015, PAGE 113)	32
FIGURE 29 : EROI DE SYSTÈMES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN FONCTION DE LA TENEUR (1=TENEUR ACTUELLE) POUR UN CERTAIN NOMBRE DE MÉTAUX RARES (FIZAINE ET COURT, 2015, PAGE 114).....	32
FIGURE 30 : IMPACT SUR LE EROI D'UNE ÉOLIENNE « MOYENNE DE 2050 » DE LA HAUSSE DE L'ÉNERGIE DE PRODUCTION (=GER) DU CUIVRE TENANT COMPTE ÉGALEMENT DU CÂBLAGE DE RACCORDEMENT AU RÉSEAU TERRESTRE (HARMSSEN ET AL., 2013, PAGE 71)	33
FIGURE 31 : PRODUCTION DE TERRES RARES PAR PAYS, EN TONNES D'OXYDE DE TERRE RARE (REO) (GOLEV ET AL., 2014, PAGE 54).....	35
FIGURE 32 : COMBINAISON DU RISQUE DE CONCENTRATION DE LA PRODUCTION ET DU RISQUE DES PAYS POUR LA PLUPART DES MÉTAUX (SIEVERS ET AL., S.D., PAGE 8)	36
FIGURE 33 : COPRODUITS EN FONCTION DE LEUR MÉTAL-HÔTE (GRAEDEL, 2011, PAGE 327)	37

FIGURE 34 : RÉSERVES, PRODUCTION ANNUELLE ET RAPPORT R/P POUR 6 MÉTAUX	40
FIGURE 35 : RÉSERVES, PRODUCTION ANNUELLE, RAPPORT R/P AVEC OU SANS TAUX DE CROISSANCE DE LA PRODUCTION POUR 5 MÉTAUX	41
FIGURE 36 : ÉNERGIE DE PRODUCTION (GER) EN FONCTION DE LA TENEUR DU MINÉRAI DE CUIVRE, ADAPTÉ DE HARMSSEN ET AL. (2013, PAGE 68)	43
FIGURE 37 : EROI DE L'ÉOLIENNE OFFSHORE EN FONCTION DE LA TENEUR DU MINÉRAI DE CUIVRE QUI LA COMPOSE.....	44
FIGURE 38 : EROI D'UNE ÉOLIENNE OFFSHORE EN FONCTION DU TEMPS POUR TROIS TAUX ANNUELS DE DÉCROISSANCE DE LA TENEUR DU MINÉRAI DE CUIVRE	45
FIGURE 39 : HHI DES RÉSERVES ET DE LA PRODUCTION ANNUELLE POUR 5 MÉTAUX	48
FIGURE 40 : PRODUCTION PRIMAIRE ET SECONDAIRE (INDICE 100 EN 2000) ET PART DE LA PRODUCTION SECONDAIRE DANS LE TOTAL, SELON HYPOTHÈSES FORMULÉES DANS LE TRAVAIL.....	50
FIGURE 41 : POUR UN MÉTAL DONNÉ, PART DE LA PRODUCTION SECONDAIRE DANS LE TOTAL SI TAUX DE RECYCLAGE DE 50%, POUR DIFFÉRENTS TAUX DE CROISSANCE DE LA PRODUCTION PRIMAIRE ET DIFFÉRENTES DURÉES DE VIE MOYENNES DES ÉQUIPEMENTS UTILISANT CE MÉTAL.....	51
FIGURE 42 : ÉCONOMIES D'ÉNERGIE PERMISES PAR LE RECYCLAGE (UNEP, 2013, PAGE 86)	52
FIGURE 43 : SUBSTITUTION DES MÉTAUX, D'APRÈS GRAEDEL (2012, PAGE 328)	53
FIGURE 44 : « ELEMENTS OF HOPE », » FRUGAL » ET « CRITICAL ELEMENTS » (DIEDEREN, 2010b)	54
FIGURE 45 : DURÉE DE VIE DE DIVERS SYSTÈMES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ, ADAPTÉ DE FIZAIN ET COURT (2015, PAGE 112). 54	54

Table des acronymes

CdTe = Cadmium-Tellure = Type de panneau photovoltaïque de deuxième génération

CIGS = Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium = Type de panneau photovoltaïque de deuxième génération

Cu = Cuivre

Dy = Dysprosium

EROI = Energy Return On Invested = Retour Énergétique Sur [énergie] Investie = ratio entre l'énergie produite par un système de production d'énergie sur sa durée de vie et l'énergie qu'a nécessité la production de ce système

GER = Gross Energy Requirement = Énergie totale dépensée pour la production d'un matériau

HHI = Herfindahl-Hirschman Index = indice quantifiant le degré de concentration d'un marché ; plus il est élevé, plus le marché s'approche d'un monopole

In = Indium

Nd = Néodyme

PV = photovoltaïque

SPER = Système de Production d'Énergie Renouvelable (par exemple, une éolienne ou un panneau PV)

Te = Tellure

URR = Ultimately Recoverable Resources = Ressources Ultimement Récupérables = total des ressources qui auront été extraites d'un gisement (ou à l'échelle de la planète) à l'issue de l'exploitation

Introduction

Les énergies renouvelables connaissent un fort développement depuis les dernières années, et devraient continuer à progresser à l'avenir. En Europe par exemple, le plan 20-20-20 (et au-delà) ambitionne d'accroître la part de production d'énergie d'origine renouvelable, et parmi les différents systèmes existant, le solaire photovoltaïque ainsi que l'éolien figurent en bonne place.

Or il s'avère que ces systèmes sont composés d'un certain nombre de métaux. On présentera à quel niveau interviennent cinq métaux (dysprosium, néodyme, tellure, indium et cuivre) dans les éoliennes et les panneaux photovoltaïques (chapitre 2).

La question qui est au centre de ce travail est celle de la disponibilité de ces métaux pour assurer la production des systèmes de production d'énergie renouvelable (qu'on abrégera en SPER dans ce travail). La disponibilité en métaux peut influencer la production de SPER de différentes façons. Parmi la multitude de liens pouvant exister, ce travail se concentrera sur trois d'entre eux.

Le premier concerne la question des réserves (chapitre 3). On va se poser les questions suivantes : Que sont les réserves ? Comment évoluent-elles ? Qu'est-ce qui peut les faire évoluer dans un sens ou dans un autre ? Quelles sont les tendances spatiales et temporelles ? Risque-t-on à un moment de manquer des métaux nécessaires à la production de SPER ?

La deuxième question est celle de l'énergie de production des métaux (chapitre 4) et du EROI (chapitre 5). Comment évolue la teneur (concentration en métal) des gisements ? Quelle influence cela a-t-il sur l'énergie de production des métaux ? Quelle conséquence la hausse de l'énergie de production peut-elle avoir sur le EROI des SPER ?

La troisième question est en fait un ensemble de questions issues des études de criticité (chapitre 6). Quel est l'impact de la répartition géographique de la production métallique sur le risque d'approvisionnement ? En quoi la coproduction impacte-elle la disponibilité en certains métaux ? Quelles sont les contraintes environnementales et réglementaires pour l'exploitation minière ?

Pour répondre à ces trois catégories d'interrogations, on va travailler en deux axes : un axe qualitatif, dans lequel il s'agira de décrire les mécanismes qui influent sur la disponibilité en métaux. Le deuxième axe est quantitatif, il s'agira de quantifier chacune des trois questions soulevées, celle des réserves, celle de l'énergie de production et du EROI, et celle de la criticité (qu'on limitera à l'étude de l'indice de concentration de la production, le HHI). Ce deuxième axe constitue le chapitre 7.

Ensuite, on essaiera de répondre à la question des solutions (chapitre 8) : Comment réduire le risque de rupture d'approvisionnement ? Peut-on se passer d'un métal s'il devient trop rare ? Le recyclage est-il une option ?

Finalement, les conclusions (chapitre 9) clôtureront ce travail. On y discutera également des limites de cette étude et d'autres études sur le sujet.

Mais au préalable, nous allons procéder à un état de l'art consacré aux études sur la question du lien disponibilité des métaux – SPER, et à partir de là, développer la méthodologie de ce travail. On y détaillera le cadrage et le contenu des chapitres. C'est l'objet du prochain chapitre (chapitre 1).

1 État de l'art et méthodologie

1.1 Introduction

Un certain nombre d'études posent la question de ce mémoire, ou du moins des questions proches. Ce chapitre aura pour objet de présenter ces études et de résumer leurs principales conclusions sur les risques que la rareté des métaux pourrait faire peser sur la transition énergétique. Le détail de ces études ne sera pas présenté ici, mais certaines d'entre elles seront citées dans d'autres chapitres de ce travail.

Par la suite, on expliquera les choix méthodologiques, le cadrage du travail, et le contenu des chapitres un petit peu plus en détails.

1.2 État de l'art

1.2.1 Liste des études

Les études suivantes se sont explicitement attaquées au sujet du mémoire, à savoir la menace que fait (ou ne fait pas) peser l'épuisement de certaines ressources en métaux sur les systèmes de production d'énergie renouvelables.

Titre	Auteur-date
Dynamic analysis of the global metal flows and stocks in electricity generation technologies	Elshkaki et Graedel, 2013
The impact of copper scarcity on the efficiency of 2050 global renewable energy scenarios	Harmsen et al., 2012
Metal requirements of low-carbon power generation	Kleijn et al., 2011
Considerations of resource availability in technology development strategies : the case study of photovoltaics	Zuser et Rechberger, 2011
Dysprosium, the balance problem, and wind power technology	Elshkaki et Graedel, 2014
Materials availability for thin film (TF) PV technologies development : A real concern ?	Candellise et al., 2011
Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling	Habib et Wenzel, 2014
Sustainability of photovoltaics : The case for thin-film solar cells	Fthenakis, 2009
Assessing the dynamic material criticality of infrastructure transitions : A case of low carbon electricity	Roelich et al., 2014
Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies ?	Hoenderdaal et al., 2012

Figure 1 : Liste des études portant sur le lien entre systèmes de production d'énergie et disponibilité des métaux

1.2.2 Analyse des études

L'annexe 1 comprend un tableau dans lequel sont repris pour chaque étude le titre de l'article, les grandes lignes de leur méthodologie, les métaux et les SPER sur lesquels portent l'étude, les conclusions quant à leur criticité ou non, ainsi que d'autres commentaires et conclusions.

1.2.3 Conclusions sur ces études

La première conclusion est qu'il y a une grande diversité d'approches entre toutes ces études. Certaines mettent le focus sur un nombre restreint de technologies et de métaux, quand d'autres tentent d'en balayer tout le spectre. Il y a des études dynamiques (étude de l'évolution de divers paramètres sur une période d'étude), d'autres statiques (« photo » d'une situation une année x). Pour beaucoup d'études, il s'agit de savoir si la production de certains métaux suffira au regard des anticipations de production de SPER, mais certaines étudient plutôt l'aspect énergétique du problème

(impact sur EROI du SPER étudié), ou encore le risque de rupture d'approvisionnement (donc plutôt une sorte de probabilité plutôt qu'une affirmation sur la suffisance ou l'insuffisance).

On constate néanmoins une certaine convergence sur la période couverte par les études, qui est souvent comprise entre le moment de l'étude et 2050. Deux explications possibles à ce quasi consensus : la première est que beaucoup d'études se basent sur des scénarios du type de l'AIE qui sont établis jusque cette date, qui est donc reprise par les auteurs. La seconde est que 2050 (soit un horizon temporel d'une quarantaine d'années) constitue la limite admise de ce qui est raisonnablement prévisible. Les deux explications ne sont pas antinomiques et se complètent probablement.

Il n'y a pas d'unanimité absolue sur les métaux qui seront plus particulièrement critiques dans un proche avenir. Cela découle en partie du fait que toutes les études ne portent pas sur des champs d'étude identiques. Cependant, on constate que certains métaux ressortent plus particulièrement de ces études : il s'agit du tellure et de l'indium dans le cas des panneaux PV, du néodyme et du dysprosium dans celui des éoliennes.

Au niveau des contraintes sur l'approvisionnement, on constate une certaine convergence dans la conclusion que la contrainte géologique n'est pas bloquante d'ici à 2050. Au contraire, les contraintes qui pourraient avoir le plus rapidement un impact sur l'approvisionnement en métaux pour les SPER sont : le rythme de production insuffisant, le risque géopolitique découlant de la concentration de la production, l'insuffisance des capacités de purification pour le silicium, le prix élevé, la dépendance aux métaux-hôtes pour certains coproduits.

Le recyclage est présenté comme une solution à développer, mais qui ne pourra jouer un rôle de premier plan dans l'approvisionnement que sur le long terme.

Constatons finalement une faiblesse de ces études, qui est la nécessité de fixer un grand nombre de paramètres (via scénarios notamment) et de ne faire varier qu'un nombre limité de grandeurs. Or dans la réalité, il y a de nombreuses interactions entre tous les paramètres, par exemple la capacité de production s'adapte en fonction du prix, il peut y avoir report d'une technologie sur une autre face à une contrainte, etc. On approfondira cette critique dans les conclusions de ce travail.

1.3 Choix méthodologiques

1.3.1 Cadrage

Devant le nombre élevé de métaux et de SPER existants, on a choisi de limiter l'étude à un nombre restreint de ceux-ci.

Concernant les SPER, on a dès le début de l'étude choisi de limiter celle-ci aux cas des éoliennes et des panneaux PV. Ces technologies ont été choisies car parmi les SPER, elles sont à la fois relativement matures, ce qui permet de disposer d'études et de chiffres réalistes et pas uniquement de projections sur base de prototypes ou d'installations à petite échelle (au contraire par exemple de l'exploitation de l'énergie des vagues), tout en ayant encore des marges de progression importantes pour ce qui concerne la puissance installée (à l'inverse par exemple des barrages hydroélectriques, du moins dans nos régions).

Pour limiter l'étendue de l'étude principalement dans sa partie quantitative, on a limité celle-ci à cinq métaux sur base de ceux présentés comme potentiellement critiques dans les études présentées au point précédent : ce sont l'indium, le tellure, le néodyme et le dysprosium. À ces quatre métaux on ajoute le cuivre, pour une raison quelque peu différente : cherchant à mettre le focus sur la question géologique et celle de l'énergie d'extraction, il a paru pertinent de traiter le cuivre, d'une part car ce

métal a été très étudié, d'autre part en raison de son importance globale dans le monde industriel, et en particulier dans toutes les applications électriques, en ce compris les SPER tels les panneaux PV (au moins indirectement via le réseau électrique) et les éoliennes. Autrement dit, on a deux ensembles de métaux : quatre « petits » métaux utilisés pour des applications spécifiques et un « grand » métal à large spectre d'utilisation.

1.3.2 Les chapitres

Le travail commence par un petit chapitre expliquant les usages des métaux étudiés (Nd, Dy, In, Te et Cu) et leur utilisation dans le cadre des systèmes de production d'énergie renouvelable.

Dès le début du travail, une importance a été accordée à la question de la ressource d'un point de vue géologique. C'est pourquoi un chapitre traitera de la question des réserves (qui s'avérera n'être pas que géologique). Une autre question importante qui a guidé ce travail est celle de l'énergie nécessaire à la production des métaux, en lien avec la teneur des gisements ainsi que ses répercussions sur le EROI (Energy Return On Invested) des SPER, objets de deux chapitres. Bien que ces questions n'ont pas été désignées comme très critiques à l'horizon 2050 par les études vues précédemment, nous avons fait le choix d'aborder ces thèmes, d'une part à des fins de compréhension du contexte géologique, d'autre part pour comprendre en quoi elles seraient ou non critiques, enfin pour tenter d'estimer l'échelle de temps en jeu (pour la question de l'énergie et du EROI principalement). Enfin, on traitera de la notion de criticité, qui traite du problème de l'approvisionnement en métaux d'une manière plus large que la simple question géologique, en abordant les aspects de la concentration de la production, de la stabilité des pays producteurs, de la question des coproduits, ... Un chapitre également.

Ces quatre premiers chapitres sont vus sous un angle qualitatif. Autrement dit, ils auront pour objet de comprendre les mécanismes de la contrainte d'approvisionnement en métaux. On fera appel pour cela à la littérature scientifique, de nombreux articles ayant abordé le sujet. C'est le premier axe du travail.

Le deuxième axe est l'axe quantitatif. À l'aide de chiffres collectés dans la littérature ou auprès de sources comme l'USGS, on va quantifier certains aspects de l'étude : rapport entre la production annuelle et les réserves existantes, impact sur le EROI des éoliennes de la baisse de la teneur des gisements de cuivre et HHI (indice quantifiant la concentration géographique de la production). À part pour le EROI, les calculs seront effectués pour les cinq métaux décrits précédemment. Tout cela constituera un chapitre.

Finalement, un chapitre présentera les pistes de solutions permettant de faire face à de potentielles contraintes sur l'approvisionnement (le recyclage, la substitution, etc). Le dernier chapitre comprendra les conclusions finales de ce travail, et les perspectives, pistes d'améliorations et autres idées qui en découlent.

2 Sensibilité des systèmes aux métaux

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va expliquer où interviennent les métaux ciblés dans l'étude dans les éoliennes et les panneaux PV. On montrera brièvement les différentes technologies existantes et leurs besoins respectifs en métaux, dans le but de montrer la sensibilité de chaque technologie par rapport à l'approvisionnement en un métal donné.

2.2 Éolienne – Nd – Dy

Lorsqu'on évoque la présence de néodyme et de dysprosium dans les éoliennes, il s'agit en fait de l'utilisation de ces métaux dans les aimants permanents constituant les génératrices de l'éolienne. Détaillons.

2.2.1 Utilisation dans les aimants permanents

Il existe des aimants de différentes compositions, chacune possédant des caractéristiques particulières. Une caractéristique importante des aimants est la densité énergétique. On voit sur le schéma ci-dessous qu'un aimant contenant du néodyme (Nd-Fe-B) peut stocker bien plus d'énergie par unité de volume qu'un aimant en ferrite, par exemple.

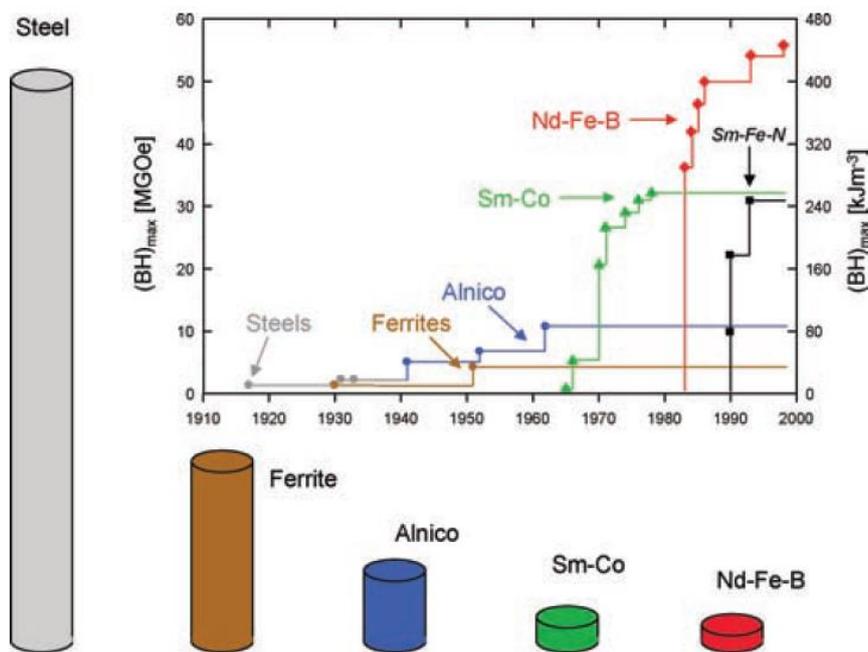


Figure 2 : Densité énergétique des aimants (Gutfleisch et al., 2011, page 823)

Cependant, d'autres caractéristiques entrent en compte dans le choix d'un aimant pour une application donnée. Ainsi, dans le cas des moteurs électriques, l'aimant Nd-Fe-B n'est pas approprié, en raison de son mauvais comportement à température élevée. C'est pourquoi dans un tel cas, on utilisera plutôt un aimant de type $(Nd_{10}Dy_4)Fe_{80}B_6$, dans lequel une partie du Nd est remplacé par du Dy (Gutfleisch et al., 2011, page 824).

2.2.2 Avantages des aimants permanents

Par rapport aux électroaimants, les aimants permanents présentent plusieurs avantages :

- Il n'y a pas de perte à l'excitation

- Ils possèdent un couple plus élevé à volume égal
- Ils possèdent de meilleures performances dynamiques (Gutfleisch et al., 2011, page 828)

Les moteurs à aimants permanents sont moins lourds et moins encombrants pour une puissance donnée :

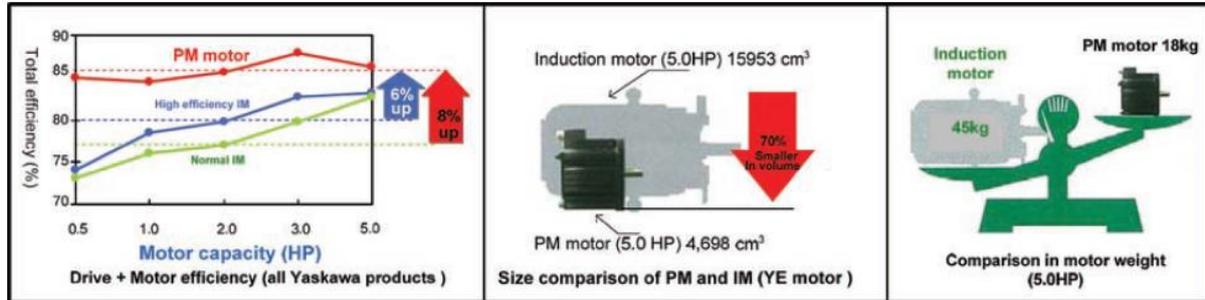


Figure 3 : Avantages d'un moteur à aimants permanents sur un moteur à induction (Gutfleisch et al., 2011, page 829)

2.2.3 Utilisations concurrentes

Le néodyme et le dysprosium sont également utilisés dans des aimants pour les moteurs des voitures électriques ou hybrides, par exemple la Prius de Toyota avec 1,3kg d'aimants Nd-Dy-Fe-B par voiture (Gutfleisch et al., 2011, page 831), technologie dont certains anticipent une croissance importante, au même titre que les éoliennes.

Citons également pour le néodyme l'utilisation pour la catalyse dans certains procédés de l'industrie pétrolière, ou l'utilisation dans les ordinateurs portables et les casques audio (Haque et al., 2014, page 617).

2.2.4 Technologies alternatives

À la conception d'une éolienne, on dispose d'une série d'options pour les techniques à mettre en œuvre. Chaque option a des conséquences sur la consommation de matériaux. Habib et Wenzel (2016, page 3857). Ci-dessous un arbre des options de conception pour la turbine d'une éolienne. Cela montre que le néodyme et le dysprosium peuvent être très utiles à la production d'une éolienne (on a vu certains avantages de recourir à ces métaux), mais qu'ils ne constituent pas une condition sine qua non à leur fabrication.

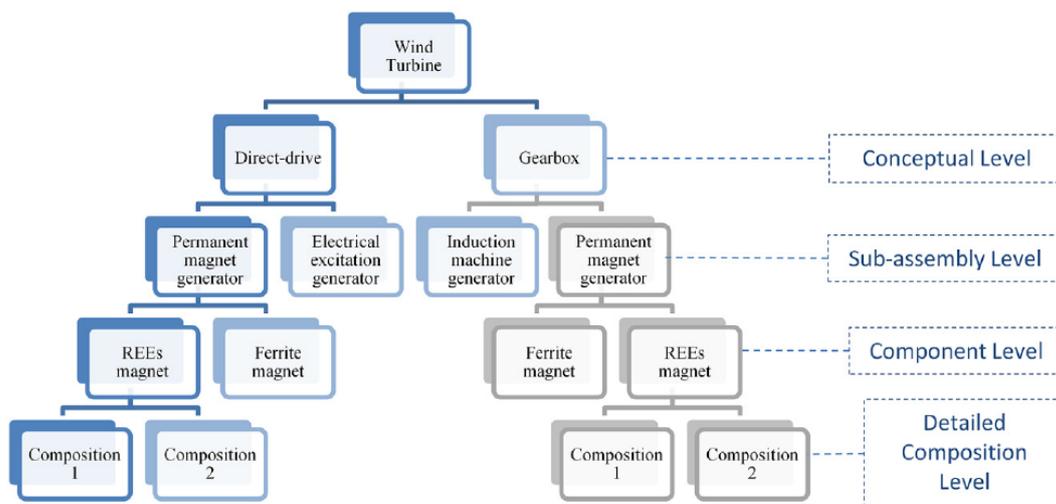


Figure 4 : Arbre des options conceptuelles pour une éolienne (Habib et Wenzel, 2016, page 3857)

2.3 Panneaux PV – Te – In

On classe les panneaux photovoltaïques en différentes catégories, voici un des classements trouvés dans la littérature (Candelise et al., 2012, pages 4972-4973 ; nef.org.uk, s.d. ; Marshall et Dimova-Malinovska, 2002, page 18) :

- Les panneaux de première génération : cela comprend les panneaux à base de silicium cristallin (c-Si) ; il existe des panneaux cristallins et monocristallins. Cela correspond au type dominant sur le marché actuel.
- Les panneaux de deuxième génération : les couches minces ou thin-film (TF), notamment les panneaux de type telluride de cadmium (CdTe), ceux composés de sélénium-cuivre-indium-gallium (CIGS), et ceux au silicium amorphe (a-Si). Le principal argument en leur faveur est leur prix de production largement inférieur aux panneaux au silicium. Par contre on relève l'inconvénient de la toxicité du cadmium, et donc du risque de pollution associé. Cette génération de panneaux a été commercialisée plus récemment que la première et gagne des parts de marché.
- La troisième génération : celle-ci comprend des technologies encore au stade de recherche et développement.

D'après Candelise et al. (2012, page 4978), les parts de marché des panneaux de deuxième génération sont appelés grignoter celles de la première, avant que la troisième génération ne vienne à son tour s'imposer.

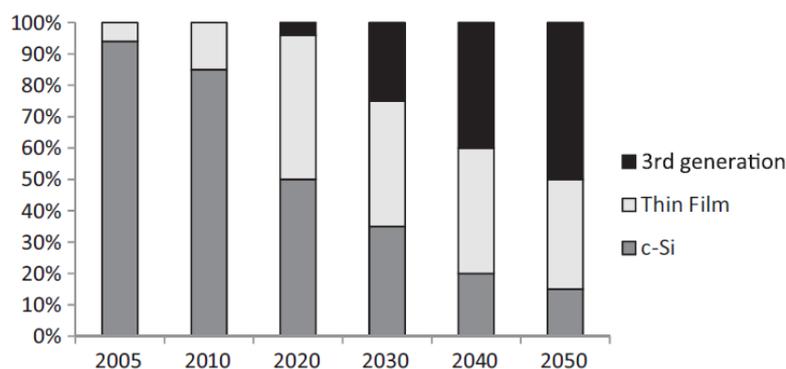


Figure 5 : Scénario d'évolution des parts de marché des différents types de panneaux PV (Candelise et al., 2012, page 4978)

2.3.1 Utilisations concurrentes

Le tellure est par ailleurs utilisé dans certains alliages pour en améliorer les propriétés et prévenir la corrosion acide. Autres usages : colorant de céramiques et verre, additif dans le caoutchouc, circuits intégrés et instrumentation médicale (USGS Mineral Resource Program, 2014).

Les autres usages de l'indium sont les revêtements, la soudure et les alliages, la recherche et d'autres usages industriels (U.S. Geological Survey, 2005).

2.4 Le cuivre

Le cuivre est un métal utilisé à beaucoup plus grande échelle que les précédents, et entre dans la composition d'une multitude d'applications. En particulier, il est très présent dans toutes les applications électriques : câblage, moteurs électriques, relais, etc.

Au niveau de nos systèmes de production d'énergie renouvelable, les éoliennes comprennent plusieurs tonnes de cuivre par [MW] de puissance installée (on détaillera cela dans l'étude quantitative). Les cellules photovoltaïques CdTe ou CIGS n'en comportent pas, d'après Elshkaki et Graedel (2013, page 272) (en fait il y a un petit peu de cuivre dans l'alliage CIGS). Ces panneaux nécessitent cependant des raccords électriques et autres équipements annexes (onduleur) dans lequel figureront du cuivre.

De plus, une grande partie des systèmes de production d'énergie renouvelable sont en fait des systèmes de production d'électricité. Leur développement implique donc un développement du réseau électrique et donc une plus grande consommation de cuivre dans les pays concernés (Harmsen et Patel, 2013, page 67).

2.5 Conclusions

Le néodyme et le dysprosium interviennent dans la constitution d'une catégorie d'éoliennes, les éoliennes à aimant permanent. L'indium et le tellure sont utilisés dans les panneaux PV de deuxième génération respectivement de type CIGS et CdTe. Chacun de ces métaux a également quelques autres usages pouvant entrer en concurrence avec les SPER.

Ces métaux apportent des avantages intéressants à leurs applications respectives, mais en leur absence des alternatives sont possibles (d'autres types de panneaux, d'autres types d'éoliennes).

Le cuivre est massivement utilisé dans toutes sortes d'applications en particulier électriques, et également dans les éoliennes. Indirectement, il est lié à tous les SPER électriques, par son importance dans le réseau.

3 Les réserves

3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de déterminer dans quelle mesure les réserves de métaux constituent ou non un problème pour la fabrication de systèmes de production d'énergie renouvelable.

Il s'agira de comprendre ce que sont les réserves et quels sont les mécanismes qui peuvent les faire varier dans le temps ou dans l'espace, ainsi que les facteurs pouvant influencer les réserves (notamment économiques).

3.2 Définition des termes

McKelvey (1974, page 76) a développé un diagramme repris peu ou prou par la plupart des articles traitant du sujet des ressources minérales. On voit que ce qu'on appelle ressource est la catégorie la plus large, qui englobe aussi bien les ressources prouvées que celles dont on ne fait que supposer l'existence, de même qu'elle comprend les ressources économiquement non exploitables aussi bien que celles qui sont exploitées.

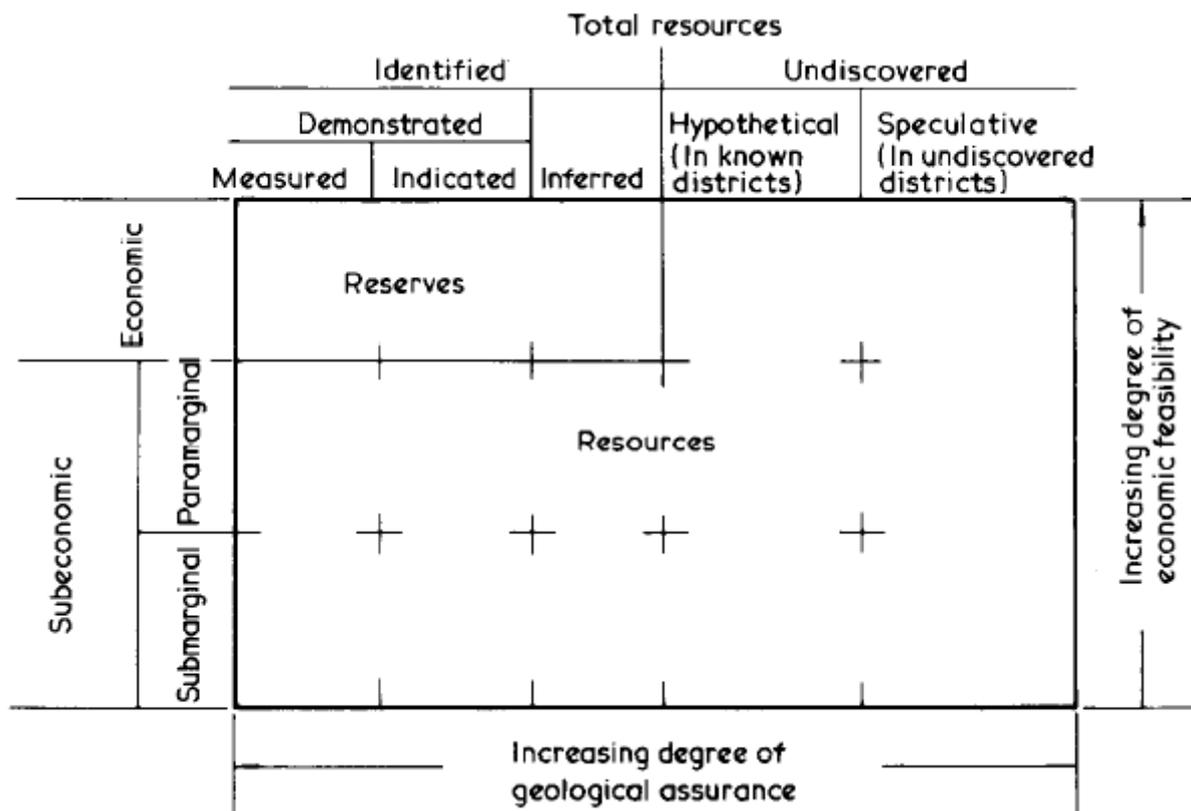


Figure 6 : Réserves et ressources (McKelvey, 1974, page 76)

Les réserves constituent une fraction des ressources : ce sont les ressources identifiées, c'est-à-dire dont on connaît la localisation et dont on a mesuré la quantité et la qualité (McKelvey, 1974, page 80). Pour être classée dans les réserves, la ressource doit de plus être exploitable économiquement au moment de l'évaluation.

Plus on se déplace vers le haut du diagramme et plus le gisement est rentable. Plus on se déplace vers la gauche et plus l'existence du gisement est certaine.

Les **réserves** à un moment T correspondent à la partie des ressources dont l'existence a été prouvée, et qui sont exploitables de façon économique et avec les moyens techniques disponibles à ce moment T. Il s'agit d'un concept **dynamique** puisque l'état des connaissances, de la technique et du marché évoluent constamment (Ray, 1984, page 76). L'aspect dynamique des réserves est très important, il implique qu'on ne peut prédire à un moment donné combien d'années de production sont encore possibles.

L'USGS définit également une série d'autres termes qu'il serait inutile de détailler ici. Citons simplement celui de **réserve base** qui est une catégorie comprenant les réserves mais également certaines ressources dont on a de bonnes raisons de croire qu'elles pourraient devenir économiquement exploitable dans des horizons temporels planifiables (USGS, 2009). Cette notion est critiquée par Gordon et al. (2006) car indicateur non fiable de ce qui pourra réellement être exploité à long terme.

L'objectif de l'**URR** ou Ultimately Recoverable Resources est d'évaluer le total de toute la ressource qui a ou qui pourra être produite, autrement dit c'est la somme de la production passée et de la production future. Elle est utilisée dans certaines études pour des scénarios de déplétion, car c'est en quelque sorte l'image du « stock initial » dans lequel l'homme vient puiser.

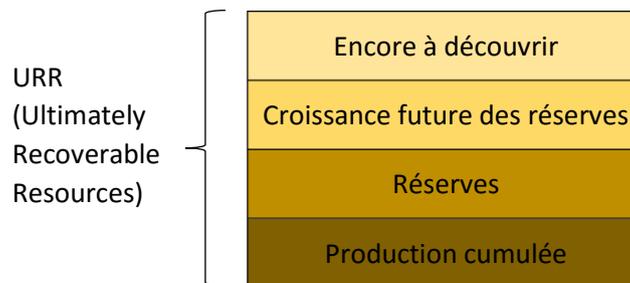


Figure 7 : Décomposition de l'URR, adapté de (Candelise et al., 2012, page 4976)

3.3 Croûte terrestre et gisements

3.3.1 La croûte terrestre

Ci-dessous l'abondance relative des différents atomes formant la croûte terrestre :

Element	% (wt/wt)
Oxygen	45.2
Silicon	27.2
Aluminum	8.0
Iron	5.8
Calcium	5.1
Magnesium	2.8
Sodium	2.3
Potassium	1.7
Titanium	0.9
Total	99.0

Figure 8 : les principaux atomes constituant la croûte continentale terrestre (Skinner, 1979, page 4214)

Le constat est que l'abondance des différents atomes est pour le moins déséquilibrée. De ce constat vont découler certaines conséquences sur les possibilités de gisements métalliques. Skinner (1979, page 4214) subdivise ainsi les métaux en trois groupes :

- Groupe 1 : les métaux dont l'abondance relative dans la croûte est supérieure à 0,1% vont former de nombreux minéraux particuliers. Il n'y a que cinq métaux remplissant ce critère : Si, Fe, Al, Ti et Mg.
- Groupe 2 : abondance relative comprise entre 0,1 et 0,01%. Fréquence suffisante pour former de nombreux minéraux, souvent des « *minéraux accessoires* », c'est-à-dire des minéraux présents en petite quantité dans une roche.
- Groupe 3 : abondance relative inférieure à 0,01%. Hormis circonstances géologiques locales particulières, ils ne formeront pas de gisements. Ce sont les éléments qu'on peut considérer comme rares.

3.3.2 Les gisements

Les gisements sont des zones de la croûte terrestre où la concentration en un certain métal est supérieure à sa concentration moyenne dans la croûte terrestre. Les gisements existent grâce à l'existence sur la planète Terre d'une hydrosphère. À partir de 12 km de profondeur sous la croûte, il y a circulation d'eau portée à haute température par la chaleur interne de la Terre. L'interaction de cette eau chaude avec la roche entraîne un certains nombres de réactions générant la formation de gisements. Pour cette raison, il est jugé peu probable que la Lune et les astéroïdes abritent de gisements métalliques, hormis de fer et de nickel (Skinner, 2001, page 4).

3.4 Variation historique

L'exploitation des gisements miniers d'un pays passe généralement par différentes phases, résumées par le graphique ci-dessous (Skinner, 1979, page 4213). Il montre que l'Angleterre, première puissance industrielle se trouve à un stade où les importations sont supérieures à la production du point de vue du volume, tandis que dans un pays plus récemment industrialisé comme l'URSS l'extraction prédomine. Il faut cependant considérer ce graphique davantage comme un constat empirique que comme une règle absolue.

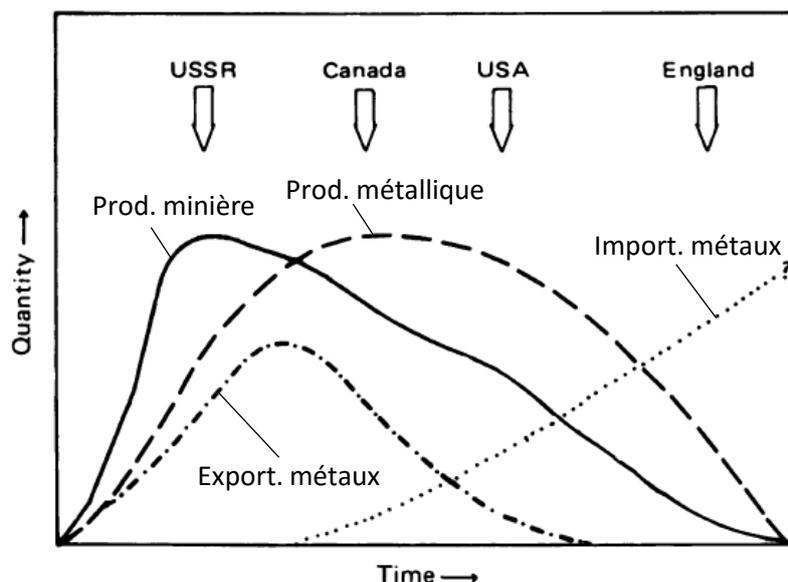


Figure 9 : Évolution de la production minière de plusieurs pays au fil du temps (Skinner, 1979, page 4213)

Entre 1950 et 1981, malgré la hausse de la production de la plupart des métaux, les réserves ont augmenté, dans certains cas drastiquement : ainsi sur cette période de temps les réserves des métaux du groupe platine ont plus que décuplé, celles du minerai de fer plus que triplé, de nickel plus que doublé, etc. Cette hausse s'explique par divers facteurs (Ray, 1984, pages 76-77) :

- Exploration et exploitation de nouvelles régions du monde.
- Les producteurs ne cherchent jamais à connaître le total des réserves de leurs gisements, disposer de réserves pour les 10 à 20 ans à venir (ou 20 à 25 ans selon [Govett et Govett, 1975, page 47]) leur suffit. Dès lors, le chiffre des réserves qu'ils déclarent ne constituent pas une limite définitive, ces réserves sont remises à jour (et donc augmentées) au fur et à mesure par les producteurs.
- Le progrès technique a rendu exploitables des gisements dont l'exploitation n'était jusqu'alors pas envisageable, les faisant passer dans la catégorie des réserves. De la même façon, ce progrès a permis de récolter davantage de minerai dans un même gisement.
- Une hausse du prix du métal peut aussi faire passer un gisement au statut de réserve.
- Les conditions de marché et les infrastructures peuvent avoir une influence ; par exemple, un gisement de pyrite cuprifère de Chypre a été exploité suite à l'apparition d'un marché pour ce type de minerai en Espagne, qui n'existait pas avant, et également grâce à la mise de place d'infrastructures routières et portuaires permettant l'exploitation de ce gisement (Govett et Govett, 1974, page 47). Il est donc également passé au statut de réserve.

Ray (1984, page 77) entrevoit cependant certains facteurs risquant de limiter cette hausse continue de la production et des réserves dans les années ultérieures : le progrès technique permet certes d'exploiter des gisements avec une teneur inférieure, mais cela se fait au prix d'une plus grande production de déchets (puisque'il faut extraire plus de roche pour la même quantité de métal utile) ce qui entraîne des contraintes environnementales croissantes. La deuxième conséquence est la hausse de la consommation énergétique soutenant cette production (point qui sera détaillé par ailleurs).

Concernant le cuivre, on dispose de données sur une longue période, qui montre une hausse continue de la production (Meinert et al., 2016, page 6). La hausse de la production étant supérieure à celle de la population mondiale, cela aboutit à une hausse de la quantité de cuivre par personne :

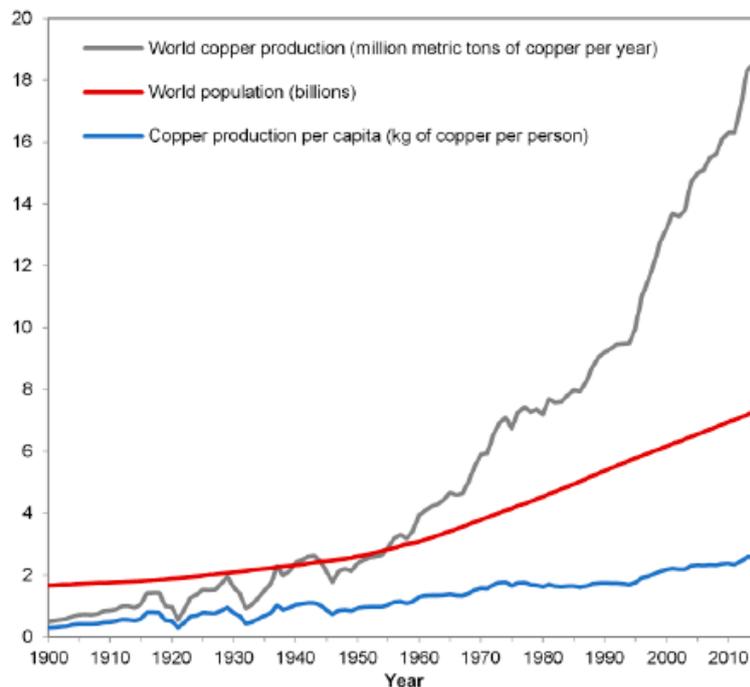


Figure 10 : Production mondiale de cuivre (Meinert et al., 2016, page 6)

3.5 Variation spatiale

3.5.1 Variation géographique

La répartition initiale des gisements de minerai est assez uniforme à la surface de la Terre, il n’y a pas de région originellement pauvres ou riches en minerai (Skinner, 1979, page 4212). Cependant, l’histoire a fait que certaines régions ont été exploitées antérieurement à d’autres de façon intensive, entraînant aujourd’hui des disparités quant à la présence de gisements entre les régions du monde. Ainsi, malgré de nouvelles techniques de prospection, aucun nouveau « *mineral district* » n’a été découvert depuis la chute de l’Empire romain, dans la partie d’Europe ayant été soumise à leur domination. Cela laisse à penser que les gisements restant à découvrir se situent principalement dans les régions historiquement peu ou pas exploitées. Il pourrait également exister des gisements non découverts à de plus grandes profondeurs, sous d’autres couches de sols (Skinner, 2001, pages 7-8).

3.5.2 Variation selon la profondeur

Comment varie la répartition des gisements avec la profondeur ? Selon l’avis dominant, la prévalence des gisements serait maximale entre 0 et 2 à 5 km de profondeur. Cette opinion se fonde sur le fait que la circulation de solutions aqueuses dans le sol à l’origine des gisements est présumée maximale à cette profondeur. Autrement dit, il y aurait moins grande fréquence de gisements à des profondeurs supérieures à 5 km (Skinner, 1979, page 4217).

À noter que la thèse opposée est encore reprise par Govett et Govett (1974, page 52), qui émettent l’hypothèse que davantage de gisements se trouveraient à de plus grandes profondeurs.

3.6 Substitution atomique

Un même minéral peut posséder plusieurs formules chimiques différentes. Si on prend l'exemple de la biotite, sa formule de base contient l'atome Mg. Le Mg peut cependant être substitué par du Cu, Zn, Ni, Co, ou d'autres encore. La substitution est possible entre atomes possédant une charge électrique identique et une taille proche (Skinner, 2001, pages 11-12). Ainsi « *si le rayon des cations diffère de moins d'environ 15%, une substitution complète est généralement possible* » (Skinner, 1979, page 4214).

On peut considérer que si l'atome substituant est présent à un taux supérieur à 0,1 ... 0,01% en masse lors de la formation des gisements, une limite est franchie et il y aura formation d'un nouveau minéral possédant cet atome. Les atomes substituant sont donc en faible concentration dans le minéral de base, en conséquence de quoi la substitution concerne essentiellement les atomes les moins abondants dans la croûte terrestre (Skinner, 2001, pages 11-12).

En conclusion, la substitution a pour effet de « cacher » une importante quantité de ressources dans du « *common rock* » (Skinner, 2001, page 11). Cela aura des conséquences sur la teneur dont on traitera dans le prochain chapitre.

3.7 Impact du prix/marché

Un exemple de montant de réserve variant avec le prix est donné par Govett et Govett (1974, page 50) : ainsi, l'uranium avait des réserves estimées à 660.000 tonnes lorsque son prix était inférieur à 10.000\$ la tonne. Les réserves sont passées à 20.000.000 tonnes avec un prix compris entre 30 et 100.000\$ la tonne.

Certaines interprétations de cet impact du prix sur la réserve poussent même leurs auteurs à critiquer les travaux mettant en évidence des risques de déplétion de certains métaux dans les décennies à venir. Ainsi, Meinert et al. (2016, page 8) écrivent que « *si les prix étaient 10 fois plus élevés ou la technologie 10 fois plus efficiente (les deux se sont produits dans l'histoire de l'extraction de ressources), alors l'évaluation des ressources de cuivre serait bien plus élevée que les estimations actuelles.* » Cette logique amène les auteurs à critiquer la prévision de Northey et al. (2014) prévoyant un pic de production du cuivre avant 2040.

3.8 Prédictions - déplétion

Concernant les prédictions quant à l'épuisement des ressources, citons la critique de Meinert et al. (2016, page 1). D'après ces auteurs, les prédictions de déplétion d'ici 20 ou 30 ans ne peuvent être qu'erronées, étant donné la grande quantité de ressources encore à découvrir d'après les estimations. Ainsi pour le cuivre, ils estiment qu'il y aurait 40 fois plus de cuivre encore à découvrir que les ressources déjà identifiées. Les seules ruptures d'approvisionnement possibles sont donc des ruptures dues à des troubles politiques ou des catastrophes naturelles en un des points de la chaîne d'approvisionnement. Ils résument leur position par la maxime « *L'Âge de la pierre n'a pas pris fin par manque de pierres* ».

Une modélisation de production future de cuivre en tenant compte des différents types de gisements et de l'évolution de la teneur a été réalisée par Northey et al. (2014, page 196). Ci-dessous, le résultat de leur modélisation, qui prédit un pic de production mondial pour le cuivre vers 2035. Les gisements de type porphyre (« *porphyry* ») sont appelés à devenir jouer un rôle grandissant dans les décennies à venir.

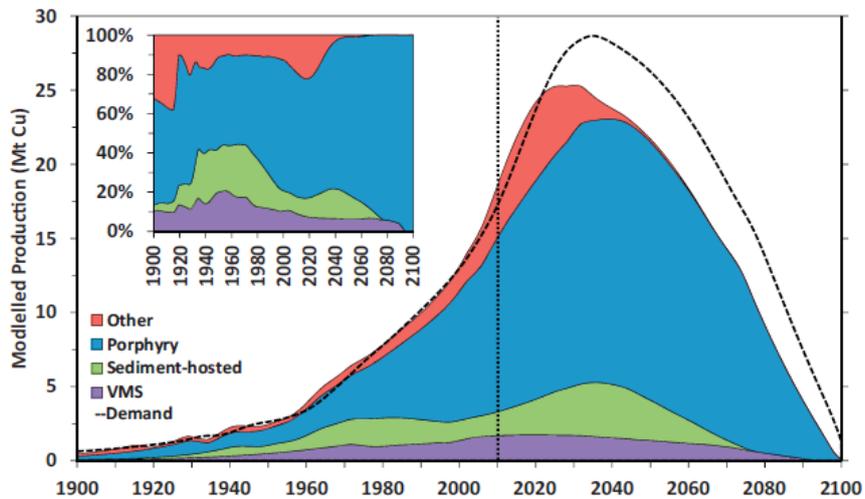


Figure 11 : Un scénario de production mondiale de cuivre par type de gisement (Northey et al., 2014, page 196)

On peut noter que si l'URR dont ils ont tenu compte dans l'étude est diminué de 50%, le pic se produit vers 2020, et vers 2040 s'il est au contraire augmenté de 50%. La conclusion est donc que même avec un URR beaucoup plus élevé, on ne gagne que peu d'années avant le pic, ceci en raison de la croissance permanente de la production.

3.9 Futur des réserves

Faisons le tour de quelques conclusions tirées par des experts sur les réserves.

Govett et Govett (1974, page 54) scindent leurs conclusions en deux horizons temporels :

- À horizon de 25 à 30 ans, il n'y a pas de problème de ressource. Il faut investir dans l'exploration pour découvrir de nouveaux gisements, du même type que ceux déjà exploités.
- À long terme par contre, il faudra probablement se tourner vers des nouveaux types de gisements, plus profonds, à teneur plus faible ou dans les océans, afin de répondre à la demande. Pour ce faire, ils préconisent l'accroissement de l'effort de R&D afin de disposer des techniques permettant d'exploiter de telles ressources le moment venu.

Point intéressant : ils mettent en garde contre le danger caché d'une croissance continue. C'est-à-dire que des réserves pouvant sembler confortables à un instant T peuvent se révéler trop faibles après quelques années de forte hausse de la production.

Ray (1984, page 79) arrive à la conclusion que les réserves ne vont pas entraver la production dans un avenir prévisible. Les menaces les plus immédiates proviennent de la concentration de la production dans certains pays et des risques que cela fait peser sur la sécurité d'approvisionnement. Il constate également la dépendance de la Communauté Européenne quant à son approvisionnement en métaux.

Skinner (2001, page 13) conclut que les réserves sont globalement suffisantes pour assurer la croissance de la demande à l'échelle du siècle sous réserve de développer de nouvelles technologies de prospection en profondeur. Par contre, dès lors qu'on voudra s'attaquer à des gisements non conventionnels (« *low-grade ore* » ou gisements à faible teneur), on peut s'attendre à devoir faire face à une hausse des coûts de production, et il y aura également besoin de développer de nouvelles techniques.

Meinert et al. (2016, page 11) soutiennent la position qu'on est actuellement très loin d'un défaut d'approvisionnement en métaux, grâce au développement de nouvelles technologies et de l'extraction à plus grande profondeur.

Se focalisant sur le cuivre uniquement, le travail de modélisation de Northey et al. (2014) conclut que la principale contrainte pesant sur la production à moyen terme ne sera pas le manque de réserves proprement dites, mais plutôt « *les problèmes environnementaux et économiques liés à la consommation énergétique, à la consommation en eau, et aux émissions de GES* » (Northey et al., 2014, page 198).

3.10 Conclusions

Quand on parle de réserves, le plus important à retenir est qu'il s'agit d'une notion dynamique, et en aucun cas d'une valeur fixe que toute production contribuerait à amputer de manière définitive.

Divers mécanismes contribuent à faire progresser le chiffre des réserves : la prospection, le prix du métal sur le marché, le progrès technique, les infrastructures, la mise en production de nouvelles régions.

Les réserves sont moins importantes dans les pays qui ont été exploités les premiers historiquement, ce qui a poussé les producteurs à continuellement explorer de nouvelles régions du monde pour continuer à accroître la production. À présent, la future hausse de la production passe principalement, outre l'extension des réserves des gisements existants (effectués en continu par les producteurs dès que leur « tampon » de réserves descend sous un seuil de 10 à 25 ans de production), par l'exploitation de gisements à teneur plus faible ou à plus grande profondeur. Dans ce dernier cas néanmoins, il semblerait qu'au-delà de 5km de profondeur, la fréquence des gisements diminue.

Concernant l'exploitation de gisements à teneur plus faible, il y a des conséquences sur l'énergie d'extraction, les coûts et l'empreinte environnementale. On traitera plus en détails de ceci dans le chapitre suivant.

Enfin, il y a toujours une opposition parmi les auteurs entre ceux qui défendent l'idée d'une déplétion prochaine – à fortiori s'il y a continuité dans la croissance de la production – et les auteurs selon lesquels les lois de l'offre et de la demande, par le biais de la hausse des prix, feront en sorte qu'il y aura toujours de nouvelles réserves, et donc toujours possibilité de produire.

4 Teneur des gisements et énergie

4.1 Introduction

Le précédent chapitre traitait des réserves d'un point de vue quantitatif. On parlera dans celui-ci davantage de l'aspect qualitatif des gisements de métaux, qui est représenté par la notion de teneur (« *ore grade* »).

On étudiera la façon dont cette grandeur baisse au fil du temps, et selon quels mécanismes. On cherchera à déterminer les tendances futures pour son évolution.

La teneur est une notion centrale pour l'étude des gisements, car de cette teneur dépendra l'énergie nécessaire à l'extraction et la concentration du minerai. On étudiera l'impact de la teneur du gisement sur l'énergie d'extraction ainsi que les autres facteurs pouvant avoir un impact sur cette énergie. On cherchera enfin quelle est l'ampleur des marges de manœuvre disponibles pour réduire l'énergie d'extraction.

4.2 Définitions

La **teneur** (« *ore grade* ») est le degré de concentration du gisement. Il s'exprime en % massique. Par exemple, une teneur de 1% de cuivre signifie qu'une tonne de roche du gisement contient 10kg de cuivre (1% de 1000kg = 10kg).

La **teneur limite** (« *cut-off grade* ») est la teneur du minerai en-dessous duquel l'exploitation deviendrait sous-économique. On peut noter que généralement les entreprises n'ont pas une idée précise de l'ampleur des réserves situées sous la teneur limite. Sur cette question, deux opinions s'affrontent : Sam Lasky prédisait que plus la teneur était faible, plus grandes étaient les réserves. À l'inverse, des travaux plus récents suggèrent que les réserves sont faibles en-dessous d'une certaine teneur (Skinner, 2001, page 10).

Réserves et teneur limite sont liées : une baisse de la teneur limite suite à une avancée technique entraîne une hausse importante des réserves exploitables. D'une part car des gisements auparavant inexploitable le deviennent, d'autre part car les gisements existants vont pouvoir exploiter davantage de minerai. Diviser la teneur limite par deux augmenterait donc les réserves d'un facteur supérieur à deux (Govett et Govett, 1974, page 53).

4.3 Évolution historique

Crowson (2012, page 69) a compilé les données de plusieurs sources concernant la teneur des gisements de cuivre depuis la fin du 18^e siècle. Il faut noter que les données globales n'abondent pas et qu'il est dès lors difficile d'avoir des moyennes mondiales avant une époque récente par manque de données publiques à l'échelle nationale, à l'exception des USA. Bien que parcellaire, le tableau suivant donne cependant une idée de la tendance qu'a suivie la teneur sur plus de deux siècles.

1770-75	Cornish average	12.17
1800	UK average	9.27
1820-25	Cornish average	8.22
1850	UK average	7.84
1865-72	Calumet and Hecla (Michigan) average	2.76
1870	UK average	6.72
1880	Calumet and Hecla (Michigan)	4.81
1883-88	Rio Tinto (Spain) average	3.06
1890	Calumet and Hecla (Michigan)	3.23
1900	Calumet and Hecla (Michigan)	2.61
1906	US average	2.51
1915	US average	1.66
1925	US average	1.54
1930	US average	1.43
1950	US average	0.89
1970	Western world average	1.11
1980	Western world average	0.88
1990	World average	0.83
2000	World average	0.85
2008	World average	0.77

Figure 12 : Évolution de la teneur moyenne des gisements de cuivre 1770-2008 (Crowson, 2012, page 69)

Mudd a consacré plusieurs articles à l'étude de l'évolution de la teneur des gisements. Il a compilé ses recherches dans un graphique montrant son évolution historique pour différents pays. Le graphique suivant montre également les prédictions futures pour la teneur des gisements de cuivre (Northey et al., 2014, page 197) :

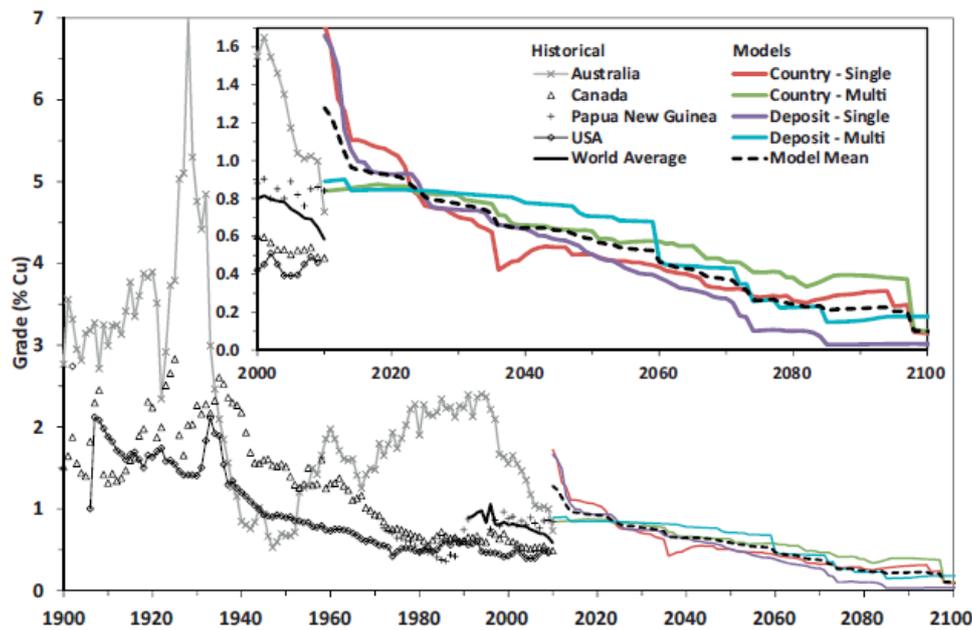


Figure 13 : Évolution historique de la teneur des gisements de cuivre pour plusieurs pays et modélisation de la teneur future (Northey et al., 2014, page 197)

La tendance est à une baisse constante depuis 1900. À cette date, la teneur oscillait entre 2 et 3%, alors qu'elle est aujourd'hui inférieure à 1%. Leur étude conclut à un prolongement de cette tendance dans le futur (de leur aveu, la courbe issue de leur simulation surestime les valeurs de teneurs actuelles et sous-estime les futures, mais la tendance est correcte).

4.4 Mécanismes économiques

Plusieurs facteurs d'ordre économique peuvent expliquer pourquoi et comment évolue la teneur moyenne au fil du temps, et notamment pourquoi la baisse de la teneur pour un métal donné n'est pas continue. Ainsi la baisse de la teneur moyenne du minerai extrait ne reflète pas automatiquement la baisse de la teneur du minerai constituant les réserves.

Lorsque les prix des métaux augmentent, la teneur limite (rappel, c'est la teneur au-dessus de laquelle l'exploitation devient économique) baisse. Dès lors, des gisements auparavant non exploités peuvent entrer en exploitation, et dès lors ils vont tirer la moyenne de la teneur du minerai exploité vers le bas (Northey et al., 2014, page 198). Les améliorations techniques ou certaines économies d'échelle (due au développement de mines plus grandes) peuvent également engendrer ce phénomène.

Lorsque des entreprises minières exploitent un gisement, elles commencent généralement par extraire la partie du gisement possédant la teneur la plus élevée, de façon à amortir au plus vite le capital investi. Par après seulement, elles s'attaqueront aux portions du gisement à teneur plus faible (Northey et al., 2014, page 198). Ainsi, durant les périodes où il y a de nombreuses ouvertures de mines, cela crée un mouvement de la teneur moyenne à la hausse, et inversement quand il y a peu d'ouvertures de mines (Crowson, 2012, page 62).

Un autre facteur influence la teneur moyenne : il s'agit de la répartition à l'échelle mondiale entre les différents types de gisements existant. Si on considère le cuivre, il existe plusieurs types de gisements différents, et pour chacun de ces types de gisement, il y a typiquement une teneur plus ou moins élevée (il y a bien entendu des différences entre chaque gisement au sein d'une même catégorie). L'évolution de la part de chaque type de gisement dans la production totale impacte donc la teneur moyenne. Voici pour le cuivre les teneurs en fonction de chaque type de gisement (Crowson, 2012, page 60) :

	Number of deposits	Lowest decile (% cu)	Median (% cu)	Top decile (% cu)
Porphyry copper	208	0.31	0.54	0.94
Sediment-hosted	57	1	2.1	4.5
Cu skarn	64	0.7	1.7	4
Polymetallic replacement	52	n.a.	0.094	0.87
Polymetallic veins	75	n.a.	n.a.	0.89
Cyprus massive sulphides	49	0.63	1.7	3.9
Besshi massive sulphides	44	0.64	1.5	3.3
Kuroko massive sulphides	432	0.45	1.3	3.5
Synorganic-synvolcanic ni-cu	32	0.13	0.47	1.3

Figure 14 : Nombre de gisements et teneur par type de gisement dans le monde (Crowson, 2012, page 61)

Ce phénomène se combine avec deux autres facteurs : D'une part la fréquence des types de gisements n'est pas la même d'un pays à l'autre, d'autre part la part dans la production mondiale de chaque pays évolue avec le temps. Ainsi pour le cuivre, l'Amérique du Nord dispose principalement de gisements de type porphyre (« *porphyry* ») qui ont une teneur moyenne plus faible que la moyenne mondiale. Comme la part des USA dans la production mondiale a baissé ces dernières années (voir tableau ci-dessous), cela a eu un effet à la hausse sur la teneur mondiale moyenne (Crowson, 2012, page 60).

	1987	1997	2008
Europe	20.8	14.8	9.7
Africa	14.7	5.4	6.4
Middle East and Asia	10.6	12.8	18.9
N America	23.8	22.5	12.2
C and S America	24.9	38.1	46.1
Oceania	5.2	5.8	6.7
World (Mt)	8.6	11.5	15.7

Figure 15 : Part de la production minière de cuivre à l'échelle par continent (Crowson, 2012, page 60)

La teneur descend également quand on extrait plus en profondeur. Les économies d'échelle et l'extension de mines existantes favorisent davantage cette exploitation en profondeur, impactant la teneur moyenne à la baisse (Crowson, 2012, page 61).

Citons enfin l'impact de la présence de coproduits, c'est-à-dire d'autres espèces minérales présentes dans le gisement au côté de l'espèce principale exploitée et qui ont un intérêt économique. Lorsque ces coproduits existent, ils peuvent rendre rentables des gisements avec une teneur (pour le métal principal) plus faible que s'il n'y avait pas ces coproduits (Crowson, 2012, page 67).

4.5 Prévisions

À l'avenir, la teneur des gisements de cuivre devrait continuer à baisser mais moins que les décennies précédentes. La principale cause de la baisse n'est pas due à une question de baisse des réserves, mais plutôt à la mise en exploitation de gisements avec une teneur moins élevée, rendue possible par des améliorations techniques, des exploitations plus grandes rentables malgré une teneur inférieure, une hausse de la part des mines de type porphyre, phénomènes déjà développés dans les points précédents (Northey et al., 2014, page 199 ; Crowson, 2012, page 61-62).

4.6 Énergie de production selon la teneur

4.6.1 Relation teneur-énergie

Il y a un lien direct entre la teneur d'un gisement et l'énergie nécessaire à l'extraction et la concentration du minerai. Comme le montre le tableau ci-dessous, l'énergie nécessaire aux opérations d'extraction (« *mining* ») et de concentration du minerai croissent à mesure que la teneur du gisement décroît. Les opérations suivantes (fusion « *smelting* » et raffinage « *refining* ») sont elles considérées comme identiques dans tous les cas de figure (Skinner, 1979, page 4215) :

	Énergie utilisée [MJ/kg Cu]		
Teneur [%Cu]	0,7	0,1	0,01
Extr. Minière + concentration	77	538	5380
Extr. Par fusion + raffinage	47	47	47
Total	123	584	5426

Figure 16 : Énergie utilisée pour l'extraction et la production de cuivre issu de chalcopirite ($CuFeS_2$), adapté de Skinner (1979, page 4215)

Une autre source montre également l'influence de la teneur sur chaque étape de la production du métal, également pour le cuivre :

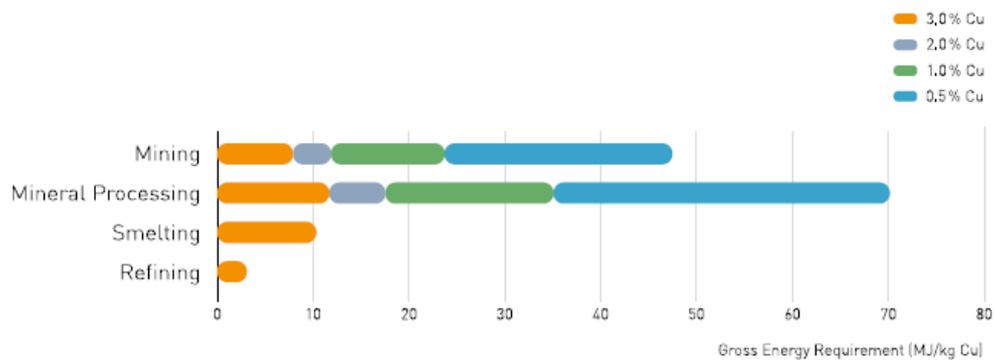


Figure 17 : Énergie nécessaire à chaque étape de la production de cuivre, pour différentes valeurs de teneur (UNEP, 2013, page 88)

Northey et al. (2014, page 191) reprennent à leur compte les chiffres de Norgate et Jahanshahi (2010) pour l'intensité énergétique de différentes opérations d'extraction du minerai en fonction de la teneur des gisements. Le graphique ci-dessous montre qu'on est face à une fonction d'allure « 1/x », autrement dit l'énergie d'extraction augmente très fortement pour de faibles baisses de la teneur, une fois un certain niveau dépassé. Autrement dit, toute baisse de la teneur a des conséquences plus importantes sur l'énergie consommée que la précédente.

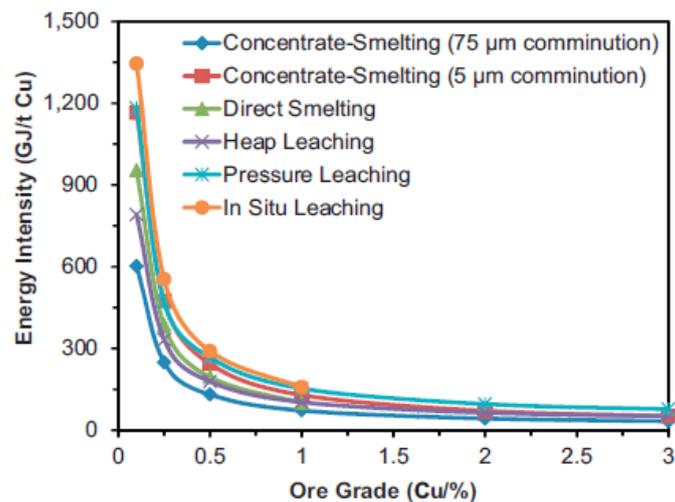


Figure 18 : Énergie de production du cuivre en fonction de la teneur pour différents procédés (Northey et al., 2014, page 191)

4.6.2 Barrière minéralogique

Lorsque la teneur descend très bas, on se retrouve confronté au problème de la barrière minéralogique.

La barrière minéralogique est une conséquence de la substitution atomique dans les minéraux, présentée dans le chapitre sur les réserves. On a vu qu'à partir d'une certaine limite en concentration d'un atome, un minéral distinct est formé. C'est ce minéral distinct qui est concrètement exploité par l'homme. Si par contre il n'y a pas de formation d'un minéral distinct, l'atome se retrouve dans du « *common rock* » et devient très difficile à exploiter. On peut considérer qu'entre ces deux types de ressources se trouve une barrière, en terme de difficulté d'exploitation (Skinner, 2001, page 12).

De ceci découle une probable distribution bimodale des métaux rares (c'est-à-dire autres que Fe, Al, Ti, Mg, Mn) (Skinner, 1976, pages 262-263) :

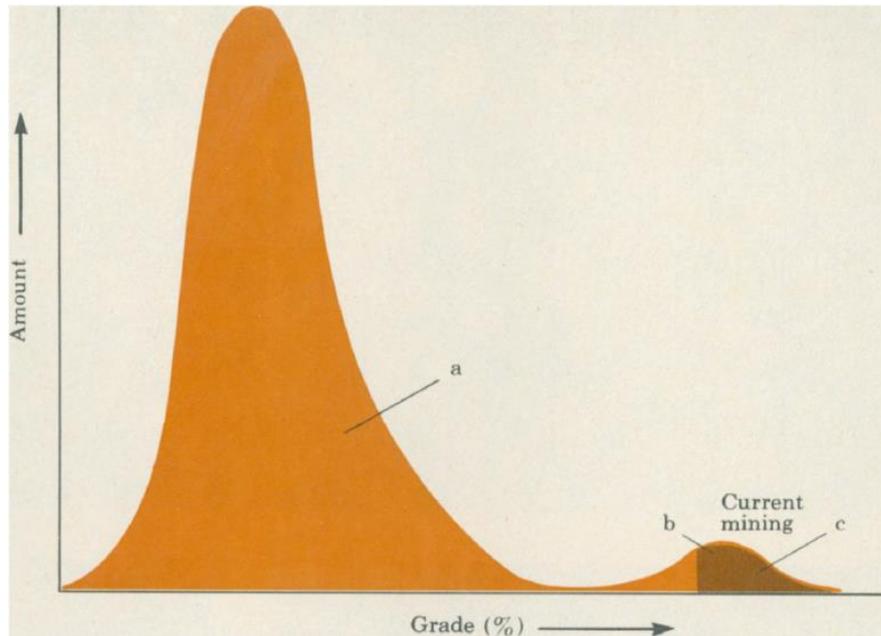


Figure 19 : Distribution probable des métaux rares dans la croûte terrestre - tonnage en fonction de la teneur (Skinner, 1976, page 263)

4.7 Autres facteurs jouant sur énergie

La nature du gisement influence également l'énergie de production d'un certain métal. Le graphique suivant montre que l'exploitation des gisements de type « silicate » est plus gourmande en énergie (d'un facteur 10 environ) que celle des gisements de type « sulfide » pour le cuivre, à teneur équivalente (Skinner, 1979, page 4215) :

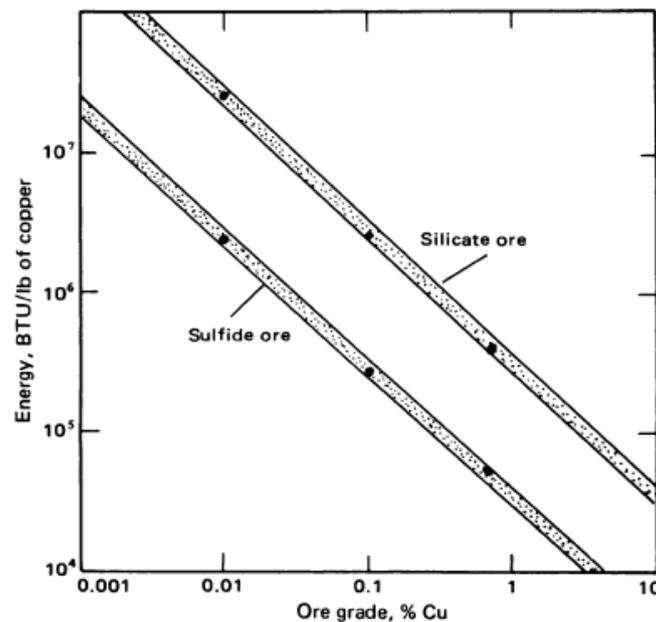


Figure 20 : Énergie de production du cuivre en fonction de la teneur, pour deux types de gisements différents - échelle logarithmique (Skinner, 1979, page 4215)

Le type de mines joue aussi : les mines sous-terraines requièrent davantage d'énergie pour extraire le minerai que les mines à ciel ouvert (Ruth, 1995, page 204). « *Sortir une tonne de roche d'une mine profonde depuis 1 km sous la surface requière un minimum théorique de presque 10MJ, ce qui équivaut au contenu énergétique de 0,25l de diesel, et ce nombre est directement proportionnel à la profondeur de la mine [...]* » (UNEP, 2013, page 77). En pratique, la dépense énergétique est plusieurs fois supérieure à ce minimum théorique. En plus du retrait du minerai, il faut aussi de l'énergie pour creuser, pour extraire l'eau, le tout dépendant des méthodes de minage employées (UNEP, 2013, page 77).

Une fois l'extraction du minerai réalisée, il y a deux possibilités pour en extraire et pour raffiner le métal qui s'y trouve :

- La pyroméallurgie
- L'hydroméallurgie

Le choix quant au procédé à adopter est une décision principalement économique, et dépend également de la teneur du gisement et du type de métal à traiter. Chaque procédé implique des étapes différentes et des consommations en énergie différentes (UNEP, 2013, pages 78-79). Ci-dessous un graphique montrant l'énergie requise pour le processing et la concentration d'une part, l'extraction et le raffinage d'autre part. On voit bien, notamment pour le cuivre, qu'il y a une différence selon le procédé utilisé :

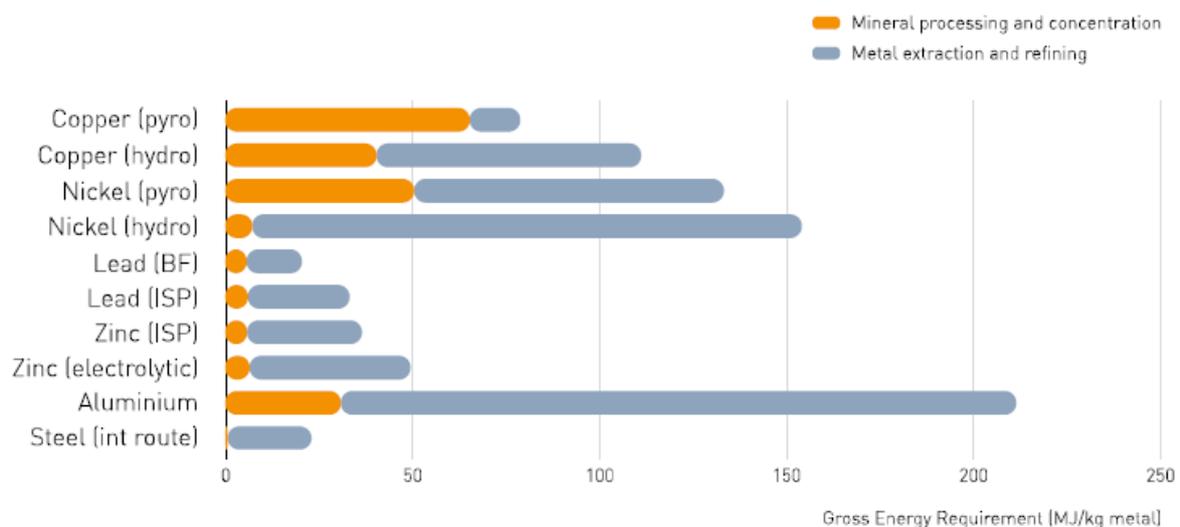


Figure 21 : Énergie de production en fonction de la filière de production (UNEP, 2013, page 83)

4.8 Progrès possibles énergie

Ci-dessous, un graphique montrant le rapport entre l'énergie utilisée pour l'extraction et le minimum théorique (d'après l'énergie de formation) (UNEP, 2013, page 79). Bien qu'obtenir des procédés atteignant ce minimum théorique soit illusoire, le graphique donne une idée de la marge de progression possible, et permet également de comparer la performance relative des procédés pour différentes filières.

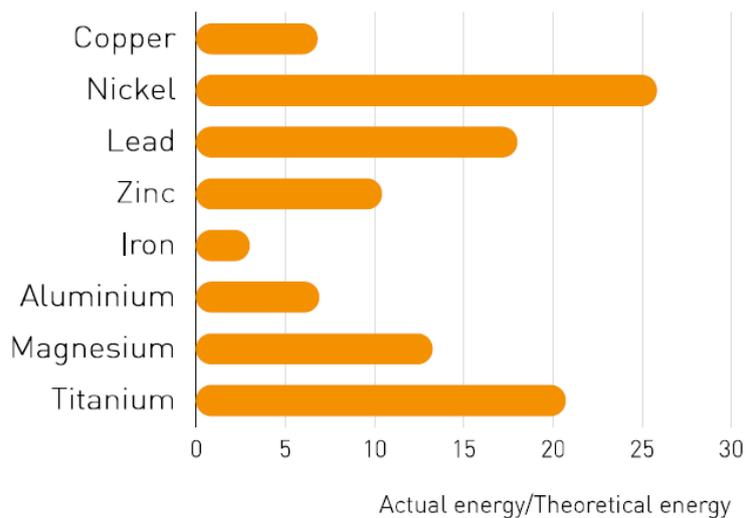


Figure 22 : Rapport entre l'énergie de production réel et le minimum théorique (UNEP, 2013, page 79)

Une autre manière de se faire une idée de la marge de manœuvre disponible est de comparer l'énergie utilisée d'une mine ou d'une usine à l'autre. Certaines installations sont plus vieilles, utilisent des équipements moins performants énergétiquement. Le graphique suivant montre qu'entre les pires usines et les meilleures, il pourrait y avoir de gigantesques gains de performances, si les pires s'alignaient sur les pratiques des meilleures (en gardant en mémoire qu'il y a d'autres facteurs – tels que ceux vus précédemment dans ce travail – pouvant expliquer cette différence).

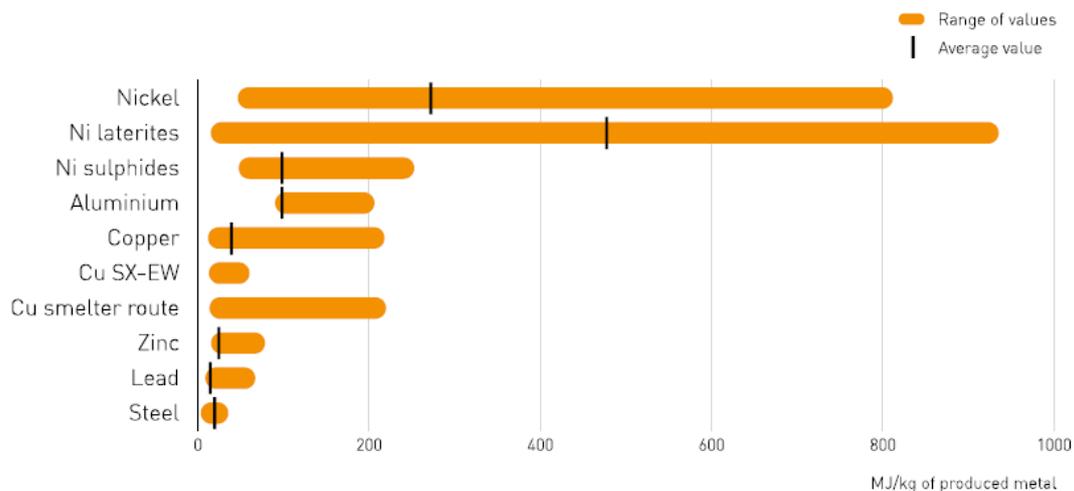


Figure 23 : Intervalles d'énergie de production (de l'extraction minière au raffinage) entre unités de production et valeurs moyennes pour plusieurs métaux (UNEP, 2013, page 83)

On peut enfin montrer le graphique suivant, qui décrit les progrès possibles pour différentes étapes de la production de métaux, pour les USA. On voit que pour certaines étapes, les gains possibles entre la pratique moyenne et les meilleures sont très importants. Autrement dit, sans même avoir besoin d'un quelconque progrès technique, il y a largement de quoi réduire la consommation énergétique du secteur :

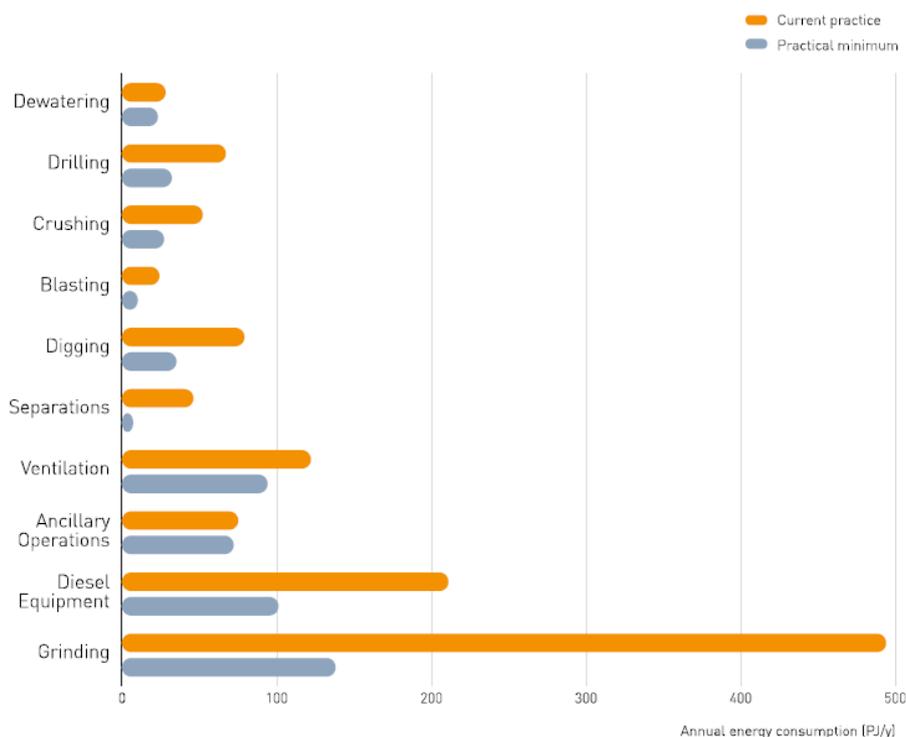


Figure 24 : Comparaison entre l'énergie moyenne et l'énergie minimale réalisée en pratique pour divers postes de dépense énergétique pour l'extraction minière et la production métallique aux USA (UNEP, 2013, page 92)

4.9 Conclusions

La teneur des gisements de cuivre baisse de manière continue depuis plusieurs siècles. À l'avenir, la baisse devrait continuer, quoiqu'à un rythme probablement inférieur à ce qu'il a pu être dans le passé.

De nombreux facteurs influent sur la teneur moyenne : l'ouverture de nouvelles mines, le type de gisement et la part de chaque type dans la production mondiale (liée également à la part de production de chaque pays), le cours du métal plus ou moins élevé permettant d'exploiter des gisements plus ou moins concentrés, de même que les économies d'échelles, les améliorations techniques ou la présence de coproduits permettent d'exploiter des gisements à teneur plus faible.

L'énergie de production dépend fortement de la teneur du minerai, cette énergie croissant de façon exponentielle avec la baisse de la teneur. Une ressource métallique se trouve en concentration importante dans les gisements, et en concentration beaucoup plus faible dans le « *common rock* ». Entre les deux c'est la barrière minéralogique, soit une énorme différence dans l'énergie d'extraction, rendant l'exploitation du « *common rock* » à ce jour inenvisageable.

L'énergie de production dépend également d'autres facteurs tels que le type d'exploitation (à ciel ouvert ou sous-terrain), la profondeur du gisement et le procédé choisi (pyrométallurgie ou hydrométallurgie).

Bien que la baisse de la teneur moyenne laisse entrevoir une hausse de l'énergie de production, il existe parallèlement à cela des marges d'amélioration pour l'énergie d'extraction. On a vu que l'énergie de différents procédés est encore fort loin du minimum théorique, ce qui laisse la porte ouverte à de potentielles améliorations techniques. D'autre part, on a également montré qu'il y a de grandes disparités dans l'énergie de production utilisée entre les exploitations les plus modernes et les plus vétustes, d'où de possibles gains d'énergie si les moins bonnes s'alignent sur les meilleures. Néanmoins, cet alignement implique des investissements dont l'ampleur n'a pas été étudiée dans

cette étude. Soulignons également que ces disparités entre exploitations n'ont pas été détaillées, et qu'il est dès lors difficile de savoir quelle part de la différence d'énergie d'exploitation est due à des différences d'équipements, et quelle part est due à d'autres facteurs.

En plus de la conséquence sur l'énergie d'exploitation, la baisse de la teneur des gisements implique la nécessité d'extraire davantage de roche pour obtenir une même quantité de métal, et donc une hausse de l'impact environnemental local de l'exploitation.

5 Le EROI

5.1 Pourquoi parler du EROI ?

Ce travail traite du EROI des systèmes de production d'énergie pour la raison suivante : on a vu précédemment que l'énergie nécessaire à l'extraction des métaux croissait à mesure que la teneur du gisement diminuait, et que celui-ci suivant précisément une tendance à la baisse sur le long terme. Or l'énergie nécessaire à la production des matériaux entre en ligne de compte du EROI des systèmes de production d'énergie, et en particulier des éoliennes et des panneaux photovoltaïques.

Le cas extrême se produirait si – en raison d'une considérable dépense énergétique pour produire les matériaux – le EROI d'un système de production d'énergie tombait à 1:1. Cela signifierait que ce système produirait au cours de sa durée de vie tout juste assez d'énergie pour compenser l'énergie qu'il a fallu investir pour le mettre en œuvre. Autrement dit, ce système cesserait d'être une source nette d'énergie, et il ne serait plus à proprement parler un système de production d'énergie.

La question qui se pose donc est la suivante : existe-t-il un risque que – la teneur baissant – l'énergie requise pour la production des métaux dégrade le EROI d'un système de production d'énergie jusqu'à l'amener à 1:1 ? Le raisonnement doit même aller plus loin. Puisque un EROI de 1:1 serait absurde, où doit-on fixer la limite d'un EROI « acceptable » du point de vue du système socio-économique qui utilise un système de production d'énergie ? Est-ce à 1,1:1, 2:1, ... ?

Ce chapitre se propose d'apporter des éléments de réponse pour ces deux questions. Il y aura donc premièrement une réflexion sur le EROI minimum dont une société technologique comme la nôtre a besoin, et deuxièmement on essaiera d'évaluer dans quelle mesure l'énergie de production des matériaux peut pénaliser le EROI des systèmes de production d'énergie. Avant d'aborder ces deux questions toutefois, explorons comment est défini le EROI et les facteurs affectant son calcul.

5.2 Définitions

Le EROI est le rapport entre l'énergie que fournira sur sa durée de vie un système de production d'énergie, et l'énergie investie pour sa fabrication. Il s'exprime comme un rapport, par exemple 20:1 signifie que sur sa durée de vie, le système de production d'énergie fournira 20 fois l'énergie qu'a nécessité sa mise en place.

Le EROI peut se définir par l'équation suivante (Weißbach et al., 2013, page 211) :

$$EROI = \frac{E_R}{E_I}$$

Où E_R est l'énergie délivrée par le système de production d'énergie sur sa durée de vie, et E_I l'énergie investie pour sa production.

Dans sa définition, ce concept est très simple à comprendre et à exprimer, et pourtant on constate qu'il y a un grand nombre de facteurs qui entrent en compte dans son calcul, et sur lesquels il peut y avoir des discussions quant aux valeurs à prendre en compte. Cela mène parfois à des désaccords importants entre auteurs, et sur des valeurs de EROI très différentes selon les hypothèses retenues. Les différents facteurs pouvant affecter les résultats dans le calcul du EROI sont l'objet du point suivant.

Notons pour finir l'application de la notion de EROI à un pays entier par Hal et al. (2009). Dans ce cas-là, la valeur du EROI est obtenue par analogie économique, en calculant la proportion du PIB des secteurs de l'énergie dans le total national. Cela donne une image de l'efficacité de ce secteur en terme

énergétique (plus ce secteur occupe une petite part du PIB, au plus il est considéré comme efficace énergétiquement).

5.3 Facteurs affectant calcul EROI

5.3.1 Les bornes du système

L'un des facteurs pouvant mener à des différences entre calculs du EROI est la définition des bornes du système qu'on étudie. Par exemple, pour un panneau photovoltaïque, on peut considérer que le système se limite au panneau lui-même. Une vue plus large inclurait le dispositif de conversion du courant. Pour une éolienne, on peut comptabiliser l'éolienne seule ou également son raccordement à la terre ferme (dans le cas d'une éolienne offshore).

5.3.2 Stockage et surcapacités

Un aspect très important dans le cas des énergies renouvelables comme les panneaux photovoltaïques et les éoliennes, est la question de l'intermittence de la production. Pour y faire face, on peut songer à deux voies principalement : le stockage et les surcapacités (Weißbach, 2013, page 212). Le stockage consiste à stocker l'électricité produite lors des pics de production (par grand vent ou fort ensoleillement) dans des batteries, via les volants d'inertie, par pompage en centrales hydrauliques, etc. L'installation de surcapacités consiste à installer davantage de systèmes de production d'électricité que nécessaire en fonctionnement nominal, pour disposer d'une production suffisante même lors des creux de production. Quelle que soit la voie choisie, elle implique un investissement supplémentaire par rapport à la situation initiale. Selon les auteurs et les études, ces éléments sont ou ne sont pas pris en compte dans le calcul du EROI.

5.3.3 Numérateur ou dénominateur

Dans certains cas, il peut y avoir un questionnement sur la pertinence d'ajouter une consommation énergétique au dénominateur ou de la retrancher au dénominateur (dans l'équation vue précédemment). Selon le cas choisi, le résultat dans le calcul du EROI peut varier grandement (Weißbach, 2013, page 213). Cette situation intervient typiquement pour une centrale électrique qui auto consomme une partie de sa production, pour alimenter certains de ses procédés. On peut donc considérer que cette consommation s'ajoute à l'investissement (dénominateur), ou qu'elle diminue l'énergie fournie (numérateur). Weißbach (2013, page 219) donne l'exemple d'une étude du EROI d'une centrale nucléaire, pour laquelle l'EROI vaut 93 dans un cas, et 53 dans l'autre. Potentiellement, les écarts entre les deux modes de calculs pourraient être encore bien plus grands.

5.3.4 Durée de vie

Puisque la production fournie par le système de production d'énergie est calculée sur la durée de vie, cela implique que cette durée de vie a un impact sur le calcul du EROI. Pour une production annuelle x , et si celle-ci est constante, la production totale sur la durée de vie sera de $20x$ si on considère une durée de vie de 20 ans, $30x$ si on considère 30 ans, etc. Cela aura donc un impact important sur le numérateur dans le calcul du EROI.

5.3.5 Matériaux recyclés ou non

Les matériaux utilisés dans la fabrication des systèmes de production d'énergie peuvent être recyclés ou non. Comme on le verra par la suite, l'impact énergétique de ce choix est considérable. Weißbach (2013, page 214) critique certains auteurs pour le fait qu'ils prennent en compte un taux de recyclage de 100%, supérieur au taux de recyclage moyen du marché, et donc non réaliste.

5.3.6 Autres facteurs

Il existe encore bien d'autres facteurs affectant le EROI d'un système de production d'énergie : citons le choix de l'emplacement du système servant au calcul, par exemple un même panneau PV produira davantage pendant sa durée de vie placé en Espagne qu'en Allemagne. Idem pour une éolienne en fonction du vent disponible (Weißbach et al., 2013, page 216). Certains auteurs choisissent de surpondérer l'énergie électrique par rapport à l'énergie sous une autre forme alors que d'autres tel Weißbach et al.(2013, page 220) contestent cette méthode. Citons enfin l'impact des données : pas nécessairement complètes (il faut alors émettre certaines hypothèses), ou différentes entre plusieurs études.

5.4 Limites EROI sur économie

Venons-en à la première question de ce chapitre : quel est le EROI minimum dont une civilisation technologique telle que la nôtre a besoin pour assurer son fonctionnement ?

Hall et al. (2009, pages 28-29) mettent en avant la nécessité d'un surplus énergétique pour la société, pour pouvoir développer toutes sortes d'activités et notamment les arts, la culture, etc. Cette approche rappelle la question du surplus agricole qui était présenté dans les mêmes termes quelques siècles plus tôt (Roudart, 2015). Ils mentionnent également une « loi du EROI minimum » (page 30) qui stipule que toute forme de vie doit acquérir plus d'énergie que cela ne lui en coûte pour l'acquérir, établissant ainsi un parallèle entre une civilisation et un être vivant.

D'après Lambert et al. (2014, page 164), on peut comparer les besoins énergétiques d'un être humain et ceux d'une société dans la logique d'une pyramide de Maslow :

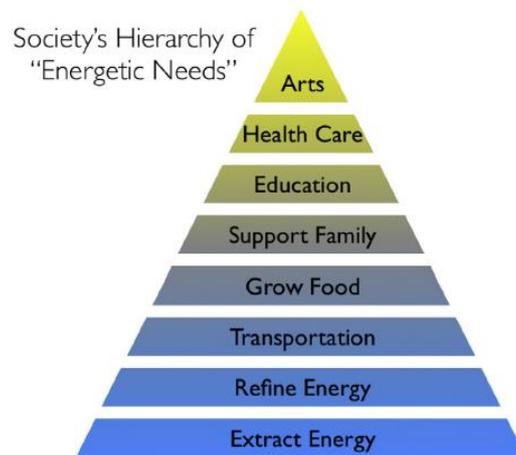


Figure 25 : Les stades de développement d'une société humaine en fonction du EROI global (Lambert et al., 2014, page 164)

Il faut lire la pyramide ci-dessus comme suit : plus le EROI d'une source d'énergie est élevé, plus la société qui utilise cette énergie va pouvoir monter dans la pyramide. Avec un EROI de 1:1, la seule chose qu'on puisse faire, c'est extraire l'énergie. Un petit peu plus et on va pouvoir la raffiner, et ainsi de suite. À noter que cette pyramide décrit les étages pour une énergie fossile mais que le raisonnement s'applique tout à fait un autre type d'énergie.

5.5 Valeur du EROI minimum

Ce constat étant dressé, le questionnement qui suit est : existe-t-il une valeur de EROI en-dessous de laquelle la civilisation technologique telle que nous la connaissons actuellement ne pourrait pas se prolonger ?

Tenant compte des infrastructures de raffinage et de transport qui sont intimement liées à l'utilisation d'un carburant fossile, Hall et al. (2009, page 43) aboutissent à la conclusion que la valeur de **3:1** est un minimum requis pour ce type d'énergie. Autrement dit, un carburant dont le EROI vaudrait 2:1 ne serait pas suffisant pour maintenir la civilisation actuelle, car il n'offrirait pas suffisamment d'énergie pour ne serait-ce que faire fonctionner l'infrastructure qui permette de l'utiliser. Vers la fin de leur articles, ils lancent même l'idée que si on devait prendre en compte un périmètre encore plus large tenant compte de l'infrastructure nécessaire à la formation de tous les travailleurs que requière le secteur énergétique, nous aurions probablement besoin d'un EROI de **5:1** (Hall et al., 2009, page 45).

Weißbach et al. (2013) calculent le EROI pour plusieurs systèmes de production d'électricité. Ils calculent pour chacun d'eux deux EROI différents, le premier dont les bornes se limitent à l'équipement productif proprement dit (le panneau PV, l'éolienne, etc), et le deuxième - « buffered » - pour lequel on tient compte du stockage ou des surcapacités, le cas échéant.

Weißbach et al. (2013, page 214) calculent un « seuil économique » pour le EROI, en-dessous duquel le EROI est considéré comme non économique. Ils aboutissent à une valeur minimale de **7:1** comme seuil économique. Ce chiffre ne doit pas être interprété comme une valeur aussi restrictive (pour le maintien de la civilisation technologique) que ceux de Hall et al., mais plutôt comme une valeur de EROI sous laquelle – dans les conditions économiques actuelles – le système de production d'énergie devra être subventionné si on veut le maintenir. Autrement dit, une plus grande part de l'économie globale serait affectée au maintien de ce système, par rapport à un autre qui disposerait d'un EROI supérieur.

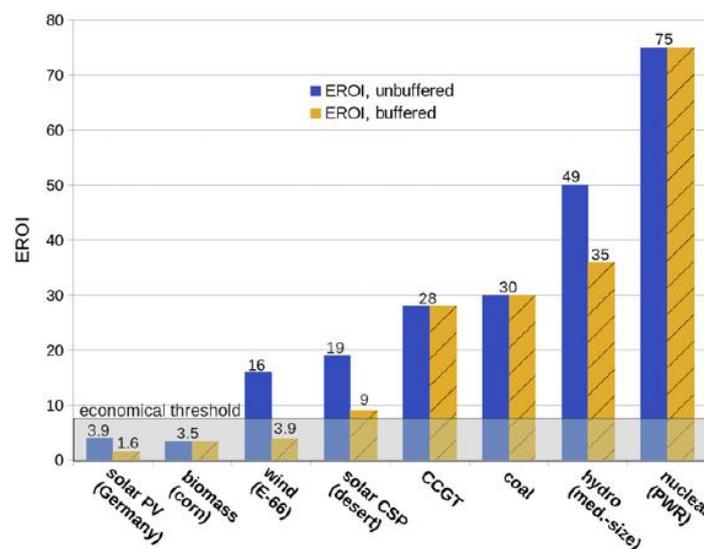


Figure 26 : EROI des systèmes de production d'électricité, tenant compte ou non du buffering, et seuil économique du EROI (Weißbach et al., 2013, page 219)

5.6 Conséquences baisse EROI

La baisse du EROI global a des conséquences sur l'économie qui vont croissant à mesure qu'on se rapproche de la limite fatidique de 1:1. Un système de production d'énergie qui a un EROI de x:1 équivaut à dire que pour une production énergétique de x unités, 1 unité est consacrée à sa fabrication et son maintien, et qu'il reste donc x-1 unités disponibles pour faire fonctionner le reste de l'économie. Ainsi, si le EROI vaut 1:1 $\rightarrow x=1 \rightarrow x-1=0$, et il ne reste rien pour le reste de l'économie.

On peut aussi rapporter cela à un pourcentage : un EROI de 2:1 implique que 50% de l'énergie produite revient au système, et que 50% sont fournis au reste de l'économie. Si on calcule ce pourcentage pour

un EROI allant de 100:1 à 1:1 et qu'on le reporte dans un graphique, on obtient le graphique ci-dessous. Il montre que lorsqu'on passe d'un EROI de 100:1 à 50:1, l'économie ne ressent aucun effet. Par contre, passer de 20:1 à 10:1 est déjà moins anodin, puisque l'énergie disponible pour le reste de l'économie passe de 90% à 80% (ou, la part de l'énergie à consacrer aux systèmes de production d'énergie passe de 10 à 20% de la production énergétique totale). Plus on s'approche de 1:1, plus ce phénomène s'aggrave.

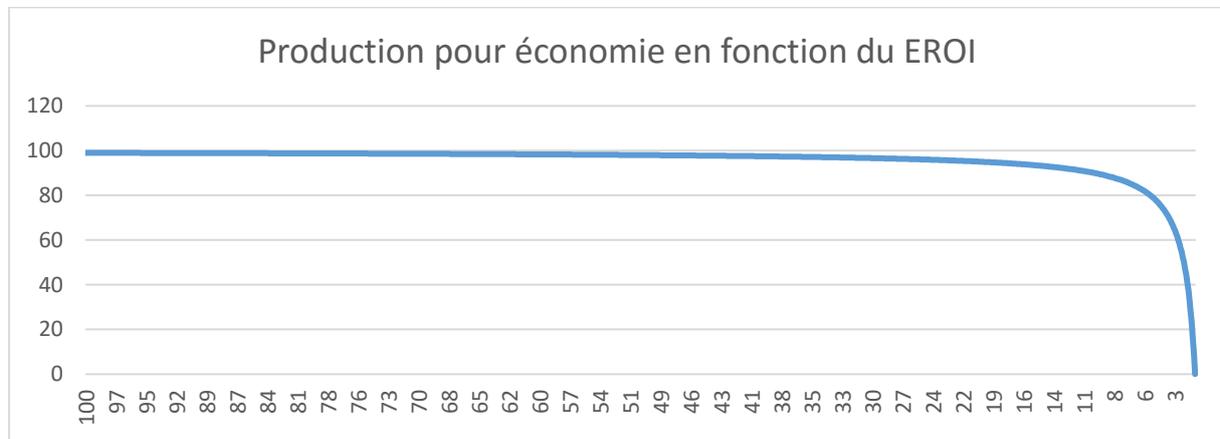


Figure 27 : pourcentage de l'énergie produite disponible pour le reste de l'économie, en fonction du EROI de la source de production

On peut noter que ce phénomène a été également reporté par Lambert et al. (2013, page 154) sous le terme de « *net energy cliff* ».

D'après Hall et al. (2014, page 142), quand la part du PIB consacrée à l'énergie (qui s'approche de l'idée d'un EROI global) est autour de 5%, il y a croissance économique. En revanche, si ce ratio monte autour de 10% ou plus, des récessions tendent à se produire.

5.7 Impact de la teneur sur le EROI

Si pour fabriquer un système de production d'énergie on a besoin d'un métal donné, l'énergie ayant servi à l'extraction de ce métal entre en compte dans le EROI du système. Or, on a vu que la teneur d'un gisement de métal avait des conséquences sur la consommation d'énergie requise pour l'extraction de ce métal. On peut donc en déduire que la teneur du gisement métallique a un impact sur le EROI d'un système de production d'énergie, s'il contient de ce métal.

Fizaine et Court (2015) ont rédigé un article très intéressant consacré à l'étude de cette relation teneur-EROI pour les énergies renouvelables. Ils ont dressé des graphiques établissant cette relation, pour les teneurs de gisements de différents métaux. Ci-dessous, le graphique indiquant la conséquence pour le EROI de différentes valeurs de teneur de minerai de cuivre. À noter que le trait vertical noir représente la valeur actuelle de la teneur.

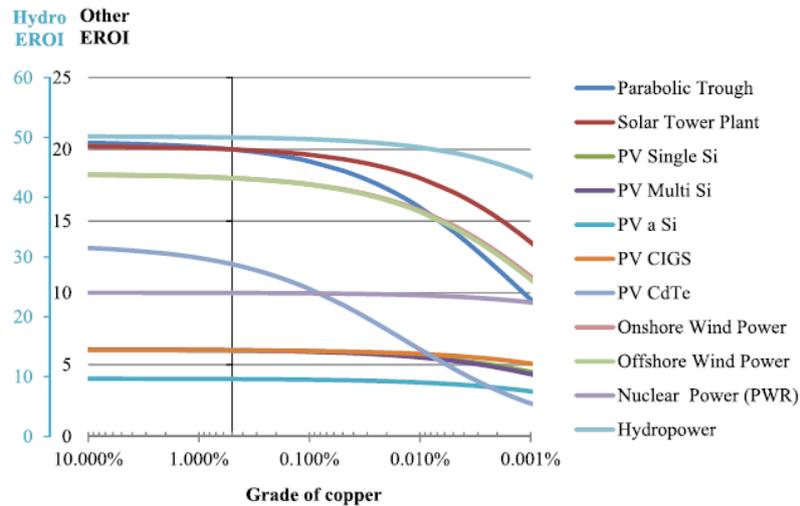


Figure 28 : EROI de systèmes de production d'électricité en fonction de la teneur du minerai de cuivre (échelle logarithmique) (Fizaine et Court, 2015, page 113)

Pour le cuivre, le graphique dévoile deux zones pour la relation teneur-EROI : une première zone où la baisse de la teneur du minerai n'a aucun impact significatif sur le EROI, puis une deuxième où la réduction de la teneur fait chuter progressivement le EROI. La première technologie impactée en cas de dégradation de la teneur du minerai de cuivre est celle du PV CdTe, pour laquelle à la teneur actuelle il y a déjà un impact sur le EROI par rapport à la situation où la teneur est de plusieurs %. Finalement l'impression globale qui ressort de ce graphique est que la marge est encore importante avant d'atteindre la zone de teneur où la dégradation du EROI devient critique. Pour la majeure partie des technologies, la teneur du minerai fait vraiment chuter le EROI à partir de 0,01% et moins, soit quasi un facteur 100 en-dessous de la teneur actuelle.

Ils ont également établi un graphique du même type étudiant la baisse du EROI consécutive à une dégradation de la teneur du minerai d'un certain nombre de métaux rares (sans malheureusement qu'ils en détaillent la liste).

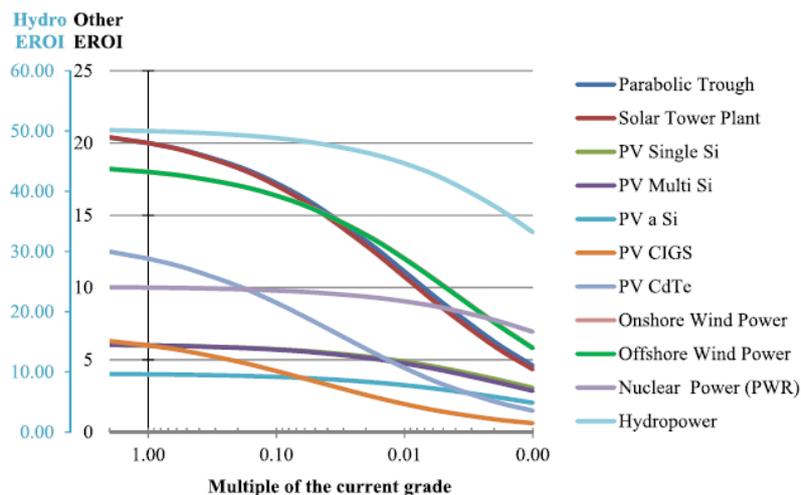


Figure 29 : EROI de systèmes de production d'électricité en fonction de la teneur (1=teneur actuelle) pour un certain nombre de métaux rares (Fizaine et Court, 2015, page 114)

Harmsen et al. (2013) ont consacré un article qui se pose notamment la question des conséquences de la baisse de la teneur du minerai de cuivre sur le EROI des éoliennes, en 2050. D'après leur scénario

médian, ils trouvent que le EROI des éoliennes passe de 25,2:1 à 21,2:1 si on prend en compte l'extension afférente du réseau électrique. Cette baisse du EROI se répartit de la façon suivante :

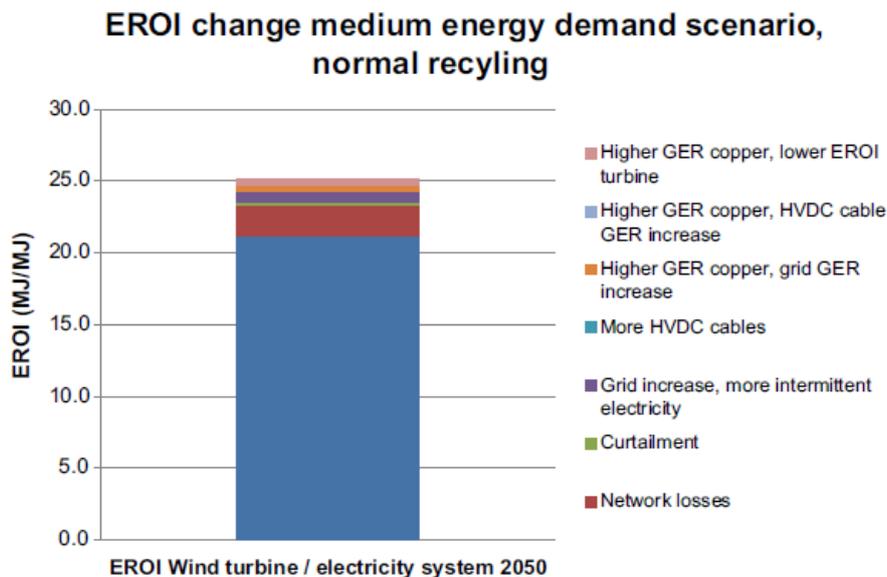


Figure 30 : Impact sur le EROI d'une éolienne « moyenne de 2050 » de la hausse de l'énergie de production (=GER) du cuivre tenant compte également du câblage de raccordement au réseau terrestre (Harmsen et al., 2013, page 71)

Ce que montre ce graphique, c'est que l'augmentation du GER (Gross Energy Requirement) du cuivre d'ici à 2050 a un impact limité sur le EROI des éoliennes. Ci-dessus, seules les catégories « *Higher GER copper ...* » sont attribuables à cette hausse du GER. Finalement, sur une baisse totale de 4 point du EROI, seuls environ 0.8 points sont causés par la hausse du GER du cuivre.

5.8 Conclusions

Finalement, on peut dégager les conclusions suivantes de ce chapitre :

- Le EROI est une notion qui est sujette à interprétations diverses selon les auteurs, et qui est le sujet de controverses
- Les facteurs influençant le EROI sont nombreux
- La baisse du EROI global a peu de conséquences sur l'économie lorsque ce EROI est élevé, mais a un impact qui va croissant à mesure qu'on s'approche de 1:1
- Un EROI minimum global de 3:1 voire 5:1 est indispensable à une société technologique telle que la nôtre, mais 7:1 (environ) est un minimum économique actuellement
- La baisse de la teneur des gisements de métaux et la hausse de l'énergie d'extraction qui en résulte n'aura pas de conséquences importantes sur le EROI tant que cette baisse de la teneur n'excède pas un facteur 10, et surtout 100 ou plus.

6 Criticité

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, on commencera par présenter le concept de criticité. Pour cela, on s'appuiera sur un certain nombre d'études consacrées au sujet. En deux mots, la criticité est une notion qui mesure le risque d'approvisionnement pour une ressource donnée, ce qui inclut des risques géologiques, géopolitiques, environnementaux, économiques et politiques. Selon les études, le risque est mis (ou pas) en parallèle de l'importance de l'usage de la ressource considérée pour l'économie.

6.2 La criticité

Le concept de criticité (« *criticality* » en anglais) est très employé dans la littérature. Il existe un grand nombre d'études de criticité consacrées à la question des métaux. Dans la plupart de ces études, il s'agit de classer un panel de métaux en fonction de leur criticité, soit en attribuant une note globale, soit en les classant en catégories (« critique », « non critique »). L'objectif est de déterminer quels sont les métaux pour lesquels le risque de rupture d'approvisionnement est le plus grand.

Voici une définition d'après une traduction de Roelich et al. (2014, page 379) : « *La criticité est généralement décrite en terme de potentiel de rupture d'approvisionnement d'un matériau particulier, et de l'impact de cette rupture sur le système étudié ; c'est une approche analogue à l'analyse de risque.* »

Cette question dépasse de loin la simple question des réserves. Voici par exemple quelques critères utilisés pour quantifier la criticité, d'après l'étude de 15 « *criticality assessments* » (Achzet et Helbig, 2013, page 437), triés par ordre de fréquence d'apparition décroissant, en ne gardant que les critères les plus fréquents :

1. Concentration de la production entre pays
2. Risque du pays
3. Temps de déplétion
4. Dépendance aux coproduits
5. Concentration de la production entre entreprises
6. Croissance de la demande

On présentera ci-après les critères les plus rencontrés dans notre propre revue de la littérature. Par rapport aux critères listés ci-dessus, on présentera le 1 et le 5 ensemble, puisqu'ils fonctionnent sur les mêmes mécanismes. Le 3 et le 6 seront abordés dans la partie quantitative. On a ajouté à cette liste le facteur « environnement et législation » qui est abordé dans de nombreuses études.

6.3 Concentration de la production

L'un des critères de criticité est la concentration géographique de la production. C'est-à-dire que le risque de rupture d'approvisionnement pour un client est plus élevé si la production d'un métal est concentrée entre un petit nombre de producteurs.

Ray (1984, page 79) et Graedel et al. (2015, page 4257) mentionnent le cas d'une pénurie temporaire de cobalt sur le marché mondial survenue suite à des troubles au Zaïre (maintenant Congo) qui ont entravé la production dans ce pays. L'importance de la pénurie est due au fait que le Zaïre fournissait alors environ 50% du cobalt mondial.

Dans le cas des terres rares, la concentration atteint des sommets, puisque la Chine détient plus de 95% de la production mondiale. Le tableau ci-dessous illustre cette domination écrasante :

Country	2007	2008	2009	2010	2011
China	120,800	124,500	129,400	118,900	105,000
Russia	2,711	2,470	2,500	2,500	2,500
Malaysia	440	150	20	471	498
Brazil	760	540	200	160	188
India	35	22	16	0	0
Australia	0	0	0	0	2,188
USA	0	0	0	0	0
Total	124,746	127,682	132,136	122,031	110,374
China, share	97%	98%	98%	97%	95%

Figure 31 : Production de terres rares par pays, en tonnes d'oxyde de terre rare (REO) (Golev et al., 2014, page 54)

La méthode généralement utilisée par les études sur la criticité pour quantifier le degré de concentration géographique d'une production est le HHI ou Herfindahl-Hirschman Index. Cet indice sera développé et exemplifié dans la partie quantitative de ce travail.

Remarquons que le HHI peut également s'appliquer à la concentration de la production entre entreprises, par exemple chez Rosenau-Tornow et al. (2009, page 169). Autrement dit, il cherche alors à montrer à quel point cette production est contrôlée par un nombre restreint d'entreprises. La logique et la méthode de calcul sont identiques.

6.4 Risque du pays

Plusieurs études utilisent un indice pour quantifier le risque de rupture de livraison d'un pays producteur en raison de troubles politiques. Citons une étude qui quantifie la stabilité des pays au moyen de WGI (World Governance Indicators) de la Banque Mondiale ; « *les WGIs combinent six dimensions de gouvernance : voix et responsabilité, stabilité politique et absence de violence, efficacité du gouvernement, qualité réglementaire, application de la loi et absence de violence, et maîtrise de la corruption.* » (Sievers et al., s.d., page 7, traduction personnelle). La combinaison de cet indice avec le HHI vu précédemment donne une idée du risque géographique global pour un matériau donné. Cela a été fait par Sievers et al. (s.d., page 8), voici le résultat reporté dans un graphique (on peut remarquer que les indices ont été calculés à la fois pour la production minière et pour la production des raffineries) :

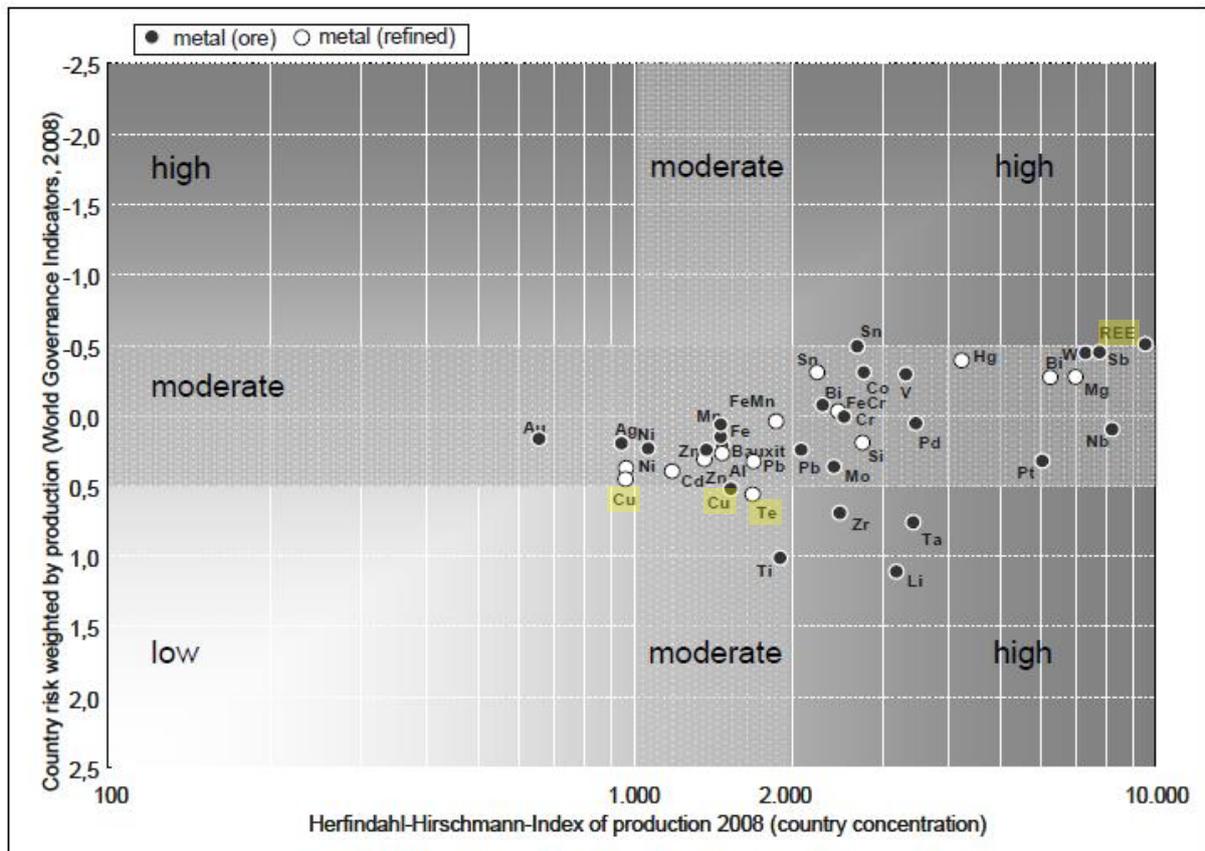


Figure 32 : combinaison du risque de concentration de la production et du risque des pays pour la plupart des métaux (Sievers et al., s.d., page 8)

Notons cependant que cet indice nous semble moins fiable que le HHI, d'une part car quantifier des choses aussi abstraites que la « qualité réglementaire » ou la « stabilité politique » n'est pas une mince affaire, et passe obligatoirement par une part d'arbitraire. D'autre part car l'agrégation de six indices en un seul nécessite également des choix arbitraires quant à la pondération de chaque sous-indice. Notons également la critique de Rosenau-Tornow et al. (2009, page 172) selon qui le défaut des indices développés par les banques ou les compagnies d'investissement est qu'ils se concentrent davantage sur les risques pour l'investissement en général, et non sur le risque d'approvisionnement en tant que tel.

D'autres indices peuvent être utilisés : « le *Global Political Risk Index (GPRI)* de l'*Eurasia Group*, le *Policy Potential Index (PPI)* du *Fraser Institute* ou le *Human Development Index (HDI)* du *United Nations Development Programme* » (Achzet et Helbig, 2013, page 438).

6.5 Dépendance des coproduits

Un autre facteur a une grande importance dans l'approvisionnement en certains métaux, qui est la notion de métal compagnon (ou coproduit). Ce sont des métaux qui sont principalement présents dans des gisements d'un autre métal (et non dans leur propre gisement). Ils sont donc des coproduits du métal principal. Si le coproduit ne représente qu'une petite partie de la production principale d'une mine (en tonnage ou en prix), une hausse de la demande de ce coproduit n'aboutira que rarement à une hausse de la production de celui-ci dans cette mine. En effet, cela impliquerait de devoir augmenter en proportion la production du métal principal, pour lequel la demande n'aurait pas forcément augmenté, et donc se retrouver avec un excédent de production difficile à écouler, ou à prix plus bas (Roelich et al., 2014, page 381).

Finalement, on constate que plusieurs facteurs vont intervenir : une mine augmentera ou non sa production suite à la hausse du prix d'un compagnon en fonction de la part de celui-ci dans le revenu de la mine, donc des taux relatifs entre l'hôte et le compagnon, leurs prix respectifs, les pertes éventuelles dues à la hausse de la production de l'hôte. Autrement dit, la production du métal compagnon est tributaire de celle du métal hôte (ou principal), ce qui ajoute un facteur de rareté (ou d'excès, car ce principe peut jouer dans les deux sens) supplémentaire.

Ci-dessous, un tableau présentant les liens entre métaux hôtes (en bleu) et métaux compagnons (en jaune).

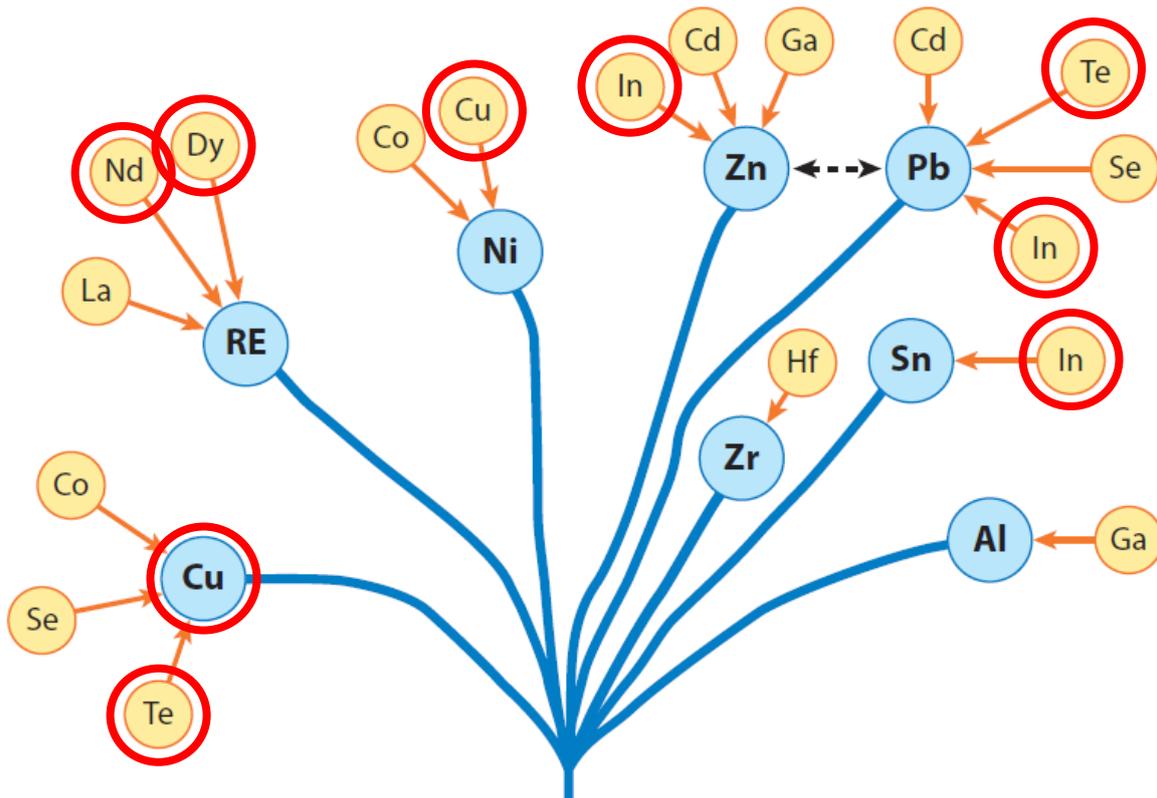


Figure 33 : coproduits en fonction de leur métal-hôte (Graedel, 2011, page 327)

L'indium, le tellure, le dysprosium et le néodyme sont tous produits à 100% comme coproduits de leur(s) hôte(s) (dans le cas du dysprosium et du néodyme, l'hôte consiste en oxydes de terres rares) (Graedel, 2011, page 328).

6.6 Environnement et législation

L'extraction minière a des conséquences environnementales. Ces conséquences peuvent à leur tour avoir des répercussions sur la production. Explicitons ceci ci-dessous.

En Malaisie, une usine de production de terres rares ne sait pas quoi faire de quantités de phosphogypse faiblement radioactif issus de la production des terres rares. De par sa radioactivité, ce matériau n'est pas utilisable dans les bâtiments ni les routes (comme remblais) d'après l'EPA (Environmental Protection Agency) à cause du risque sur la santé humaine. Cela aboutit à d'énormes piles de déchet dont on ne sait que faire à l'heure actuelle, et dont il y a peu de chance que la législation permette l'utilisation (Golev et al., 2014, page 57).

En Chine, la législation s'est récemment durcie, et les nouveaux projets de production de terres rares doivent répondre à d'exigeantes normes d'émission et de traitement des déchets radioactifs. La Chine a même complètement « *banni l'exploitation de la monazite pure en raison d'éléments à haut niveau de radioactivité* » (Golev et al., 2014, page 57). En 2002 aux USA, la pollution des eaux souterraines fut une des causes de la fermeture de la mine de Mountain Pass qui exploitait jusqu'alors des terres rares (Massari et Ruberti, 2013, page 37).

Les impacts écologiques du cadmium ont eu d'importantes conséquences sur la demande et l'approvisionnement de ce métal de par la mise en œuvre de réglementations comme REACH ou RoHS (Achzet et Helbig, 2013, page 436).

Ces exemples montrent que les impacts de l'activité minière sur l'environnement peuvent jouer un rôle sur l'approvisionnement en métal, en rendant plus difficile la mise en place de nouvelles exploitations suite aux freins de la législation. Un durcissement des législations implique également des coûts supplémentaires (suivi des normes, remise en état du terrain, traitement des déchets).

En se basant sur les conclusions des chapitres liés aux réserves et au chapitre sur la teneur des gisements, on peut également supposer que les problèmes environnementaux liés à la production de métaux iront croissant puisqu'il faut aller chercher les gisements plus profondément sous la terre et puisque la quantité de roche à extraire par kilo de métal utile augmente avec la baisse de la teneur, ce qui dans les deux cas signifie plus de déchets à traiter et plus d'énergie (et donc généralement plus d'émissions de CO₂) pour une même quantité de métal produite.

6.7 Conclusions

Il y a un grand nombre de facteurs au-delà des questions géologiques vues dans les chapitres précédents, qui peuvent intervenir dans la facilité ou la difficulté d'approvisionnement en métaux. Le concept de criticité développé dans de nombreuses études rassemblent tous ces facteurs pour attribuer des notes de criticité à des métaux, ou pour les classer en « critique » ou « non critique ».

On a vu que des difficultés d'approvisionnement pouvaient découler de la concentration de la production entre un nombre réduit de pays ou d'entreprises, qui plus est si le pays concerné est un pays à faible stabilité politique. Certains métaux sont des coproduits d'autres métaux et leur production dépend donc de celle de leur hôte, il peut dès lors être difficile de répondre à une hausse de la demande pour le coproduit si la demande pour l'hôte ne change pas. Enfin, les conséquences environnementales de la production minière sont de plus en plus visées par des réglementations, ce qui rend plus difficile et plus coûteux l'installation des nouvelles capacités de production, y compris dans un pays comme la Chine.

7 Étude quantitative

7.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de quantifier quelques-uns des facteurs contribuant à l'approvisionnement en métaux vus dans les chapitres précédents. Voici les facteurs qu'on a choisi de quantifier ici :

- ➔ Les réserves, et une mise en relation de celles-ci avec la production annuelle
- ➔ La teneur du minerai, son évolution, et sa conséquence potentielle sur l'EROI d'une éolienne offshore
- ➔ Le HHI pour les pays, appliqué aux réserves et à la production annuelle

Pour chaque facteur, on expliquera ce qu'on va quantifier, les données utilisées et leur source, les calculs effectués, puis les résultats et les conclusions de ceux-ci, en comparant avec des études comparables le cas échéant.

Les calculs seront effectués pour les 5 métaux ciblés dans cette étude (tellure, indium, néodyme, dysprosium, cuivre), sauf dans le cas de limitations qui seront expliquées le moment venu.

7.2 Réserves – production

La façon la plus simple de se faire une idée de l'importance des réserves pour un métal donné, est de calculer le rapport entre la production annuelle et les réserves de ce métal. Le résultat, en années, est une durée théorique qui indique combien d'années il serait possible de maintenir l'approvisionnement en le métal étudié, si la production annuelle reste la même que l'année de référence. Il s'agit une fois encore d'une durée théorique, car tant le montant des réserves que la production peuvent varier au fil du temps. On nomme ce ratio le ratio « R/P » où R = Réserves et P = Production annuelle. Idéalement, R et P sont issus de données de la même année.

7.2.1 Données

On a cherché les données de réserves et de production à diverses sources. Les chiffres ne sont pas toujours disponibles pour l'année la plus récente. Il peut aussi arriver que les chiffres pour les réserves et ceux pour la production annuelle ne soient pas de la même année. Le détail des données avec leurs sources se trouvent dans l'annexe 2, tableau 1.

7.2.2 Résultats

Ci-dessous le tableau des résultats pour les cinq métaux étudiés ainsi que pour les terres rares, car les données sur le Néodyme et le Dysprosium ne sont pas toujours disponibles en tant que telles, mais au contraire livrées dans la catégorie plus générale des terres rares. Les mentionner renforce la solidité des données.

Métal	Réserves [t]	Production annuelle [t]	R/P [an]
Tellure – Te	24000	450	53
Indium – In	12400	774	16
Cuivre – Cu	700.10 ⁶	18,3.10 ⁶	38
Néodyme – Nd	12.10 ⁶	19000	632
Dysprosium – Dy	1,7.10 ⁶	1500	1133
Terres rares	130.10 ⁶	0,11.10 ⁶	1182

Figure 34 : Réserves, production annuelle et rapport R/P pour 6 métaux

Un autre ratio est également utilisé dans la littérature, c'est aussi un ratio R/P, mais dans lequel on tient compte d'un taux de croissance de la production (ce qui se rapproche plus de la réalité, la production restant rarement constante d'une année sur l'autre). Cela donne une meilleure idée du nombre d'années de production couvertes par les réserves. Par contre, l'inconvénient est que cela requière de formuler des hypothèses sur un taux de croissance « réaliste ». Selon le taux de croissance choisi, le nombre d'années couvertes par les réserves diffère.

7.2.2.1 Valeur des taux

Concernant le **cuivre**, on se basera sur l'historique de la production, puisqu'il s'agit d'un métal utilisé depuis longtemps et dont la production croît assez régulièrement. Dans Rosenau-Tornow et al. (2009, page 166), on voit qu'entre 1960 et 2005 la production passe d'environ 4.10⁶ à 14.10⁶ tonnes par an, soit un taux de croissance de 2,8% par an. Rosenau-Tornow et al. (2009, page 173) dressent deux scénarios pour la croissance de la production du cuivre jusque 2020, et pour ce faire ils choisissent 2% et 3% de croissance annuelle respectivement pour les scénarios « bas » et « haut ». Dans notre calcul, on prendra une valeur intermédiaire de 2,5% par an, qui est compatible avec l'étude précitée ainsi qu'avec l'historique de production.

Graedel (2011, page 326) donne un historique de la production pour le **dysprosium**, qui passe d'environ 400 tonnes annuelles à 1700 tonnes annuelles entre 1995 et 2005, soit une croissance d'à peu près 15% par an. Chez Habib et Wenzel (2014, page 354) on a plutôt 10% par an entre 1995 et 2010. En fait, le calcul du taux dépend fortement de l'intervalle d'années choisi, à fortiori sur un petit intervalle et avec des variations importantes (en %) de la production d'une année sur l'autre. Ajoutons de plus que partant de petites valeurs de production, et puisque l'utilisation massive de ce métal est récente, il est irréaliste de prolonger cette tendance jusque 2050. Concernant les prévisions Habib et Wenzel (2014, page 354) étudient quatre scénarios dans lesquels le taux de croissance 2010-2050 pour la production de dysprosium s'établit entre 4,0 et 4,8% annuel. On prendra l'estimation la plus basse de 4% car les plus élevées reposent sur une hypothèse d'une production secondaire (issue du recyclage) élevée, hypothèse qui n'est pas l'objet de ce point-ci.

Pour le **néodyme**, l'historique de production sur 1995-2010 donne une croissance de 6% par an (Habib et Wenzel, 2014, page 354). On a une prévision de la production de 3,5 à 3,9% annuel chez Habib et Wenzel (2014, page 355). Roelich et al. (2014, page 383) donnent en revanche une prévision de +5,2% annuel entre 2012 et 2050, basée sur l'historique de production de l'oxyde de terre rare (REO). Par un raisonnement analogue au dysprosium, choisissons la valeur de 3,5% comme taux de croissance de la production sur la période 2010-2050.

Concernant la production d'**indium**, l'historique de production issu de Candelise et al. (2012, page 4975) correspond à une croissance d'environ 4,2% par an sur 1990-2010. On n'a pas de source

indiquant des prévisions de production, on en a en revanche qui traitent de la demande future pour ce matériau. Ainsi, Elshkaki et Graedel (2015, page 171) prévoient 4,3% de croissance annuelle de la demande pour ce métal. On prendra cette valeur-là ici.

Enfin, pour le **tellure**, l'historique de la production est assez confus, aucune tendance claire ne se détache. En l'absence de scénario pour la production future, on se basera sur un scénario de la demande, à l'instar de l'indium. Elshkaki et Graedel (2015, page 171) prévoient une forte hausse de la demande de ce métal, d'environ 6,9% par an entre 2010 et 2050. On ne discutera pas ici de la faisabilité ou non d'une telle hausse de la production, mais on comparera simplement ce scénario de hausse avec les réserves disponibles actuellement.

Voici ce que devient le tableau précédent (sans les terres rares), une fois ces taux de croissance pris en compte (en conservant les mêmes données sur les réserves et la production annuelle initiale) :

Métal	Réserves [t]	Production annuelle [t]	R/P [an]	Croissance prod [%]	R/P [an] si croissance
Tellure – Te	24000	450	53	6,9	22
Indium – In	12400	774	16	4,3	11
Cuivre – Cu	700.10 ⁶	18,3.10 ⁶	38	2,5	26
Néodyme – Nd	12.10 ⁶	19000	632	3,5	90
Dysprosium – Dy	1,7.10 ⁶	1500	1133	4,0	97

Figure 35 : Réserves, production annuelle, rapport R/P avec ou sans taux de croissance de la production pour 5 métaux

7.2.3 Conclusions

Notons tout d'abord la chose suivante : concernant le tellure, les données de production étaient assez différentes d'une source à une autre, selon que les données proviennent de l'USGS ou de l'ICSG. Nous n'avons pas pu déterminer la cause de cette différence. Une hypothèse serait que certains chiffres reprennent la production primaire, et d'autre la production raffinée (bien que cela ne permette pas de comprendre une telle différence). Une autre explication possible est une forte variation de la production d'une année sur l'autre pour ce métal.

Le métal pour lequel le ratio R/P est le plus faible est l'indium, suivi du cuivre et du tellure. On remarque que l'industrie du solaire photovoltaïque qui utilise du tellure et de l'indium, est plus exposée à l'insuffisance des réserves que celle de l'éolien avec le néodyme et le dysprosium.

En-dessous de quelle valeur du ratio R/P considère-t-on qu'il y a trop peu de réserves ? Les industriels souhaitent généralement s'assurer de 10 à 25 ans de production dans leurs réserves pour s'assurer d'une visibilité à long terme suffisante, comme on l'a montré dans le chapitre sur les réserves. Si on retient la valeur de 20 ans comme une limite du ratio R/P convenable, cela signifie que seul l'indium peut être considéré comme critique d'après nos résultats. Si on prend en compte la croissance potentielle de la production de ces métaux, les réserves d'indium sont encore plus critiques avec 11 ans seulement de production en réserve, et le tellure et le cuivre s'approchent de la limite des 20 ans sans toutefois l'atteindre.

Pour le dysprosium et le néodyme, on dispose de réserves permettant d'assurer des siècles de production au rythme actuel. On constate néanmoins que pour ces métaux, tenir compte d'un taux de croissance a un énorme impact sur la durée de couverture de la production par les réserves. Ainsi pour le dysprosium, les réserves durent plus de 10 fois moins longtemps quand on tient compte d'un taux de croissance plutôt que si on l'ignore. Cela signifie deux choses : premièrement, que la croissance de

la production est un facteur déterminant de la durée des réserves, secondement que plus la durée considérée est grande, plus le taux de croissance a un impact sur cette durée. Notons toutefois que rien ne garantit la possibilité de maintenir des taux de croissance aussi élevés sur plusieurs décennies.

7.3 Teneur – énergie – EROI

Ici nous allons chercher à déterminer si la dégradation de la teneur des gisements de métaux risque d'impacter le EROI des systèmes de production d'énergie, et l'échelle de temps à laquelle correspond ce risque. On se limitera ici au cas du cuivre et des éoliennes offshore.

Reprenons le raisonnement : on a vu que la teneur du minerai de cuivre exploité suivait une tendance à la baisse de long terme. Parallèlement, l'énergie nécessaire à sa production augmente de manière exponentielle à mesure que baisse la teneur du minerai. Le cuivre intervenant dans la construction des éoliennes, l'énergie de production de celui-ci impacte le EROI (Energy Return On Invested) des éoliennes. Autrement dit, lorsque l'énergie de production du cuivre augmentera à cause de la baisse de la teneur du minerai, le EROI des éoliennes baissera. Le tout est de savoir si le risque d'un impact significatif du EROI existe en raison de ce phénomène, ou s'il demeure négligeable.

7.3.1 Données

Pour notre calcul, nous avons besoin d'un certain nombre de données. Détails et explications ci-dessous.

Concernant la **quantité de cuivre**, Elshkaki et Graedel (2013, page 271), à partir de données de García-Olivares et al. (2012), donnent un chiffre de 10 tonnes de cuivre par [MW] de puissance installée d'une éolienne offshore. Ce chiffre comprend à la fois la composition de l'éolienne elle-même, mais également le câblage nécessaire à son raccordement au réseau terrestre, raison pour laquelle le chiffre pour l'éolienne offshore est bien supérieur à celui de l'éolienne onshore, pour laquelle on est à 2 tonnes de cuivre par MW. Ceci explique le choix d'étudier l'éolienne offshore plutôt qu'onshore, car si l'énergie de production du cuivre devait avoir une incidence sur le EROI, celle-ci se produirait en premier lieu sur l'éolienne offshore.

La **durée de vie** estimée de l'éolienne est de 20 ans selon Weißbach et al. (2013, page 217) et Fizaine et Court (2015, page 112). Pour le **EROI**, on prendra une valeur de 18:1 telle que donnée par Fizaine et Court (2015, page 112). D'autres valeurs existent (16 :1 chez Weißbach et al. [2013, page 217] ou un intervalle de 19,8 à 25,2:1 chez Harmsen et al. [2013, page 70]). La valeur 18:1 est relativement médiane. Précisons que l'objectif ici n'est pas de discuter de la valeur la plus précise pour le EROI, mais de disposer d'une valeur de référence à partir de laquelle quantifier l'impact de la baisse de la teneur du minerai de cuivre sur ce EROI.

Le **facteur de charge** de l'éolienne offshore est estimé actuellement à 28% par Habib et Wenzel (2014, page 350). Bien que cet auteur scénarise une hausse de ce facteur de charge pour les années à venir, nous n'allons pas en tenir compte ici, afin de ne faire apparaître dans les résultats que l'effet sur le EROI dû à la baisse de la teneur du minerai de cuivre.

Le **GER** (Gross Energy Requirement) du cuivre en fonction de la teneur du minerai est donné par Harmsen et al. (2013, page 68). La reprise des données du graphique sous forme de tableau de valeurs donne ceci :

Teneur [%]	GER [MJ/kg]
0,067	800
0,114	500
0,149	400
0,210	300
0,500	169
1,000	105
1,500	89
2,000	75

Figure 36 : Énergie de production (GER) en fonction de la teneur du minerai de cuivre, adapté de Harmsen et al. (2013, page 68)

Comme **teneur actuelle** pour le minerai de cuivre, on prendra la valeur de 0,77% (valeur 2008) qui est donnée par Crowson (2012, page 69) dans son étude très complète consacrée à l'historique et l'évolution de la teneur du minerai de cuivre.

7.3.2 Calculs

On va partir de la formule suivante :

$$EROI = \frac{EnProd}{EnInv + EnCu}$$

Où EnProd est l'énergie produite par l'éolienne sur sa durée de vie, EnInv est l'énergie investie dans la fabrication et la mise en place de l'éolienne à l'exception de l'énergie de production du cuivre, et EnCu est l'énergie ayant servi à produire le cuivre constituant l'éolienne et son raccordement électrique.

On va effectuer nos calculs par [MW] de puissance installée. Avec un facteur de charge de 28%, la production énergétique sur 20 ans se calcule :

$$EnProd = 20[an] * 365 \left[\frac{j}{an} \right] * 24 \left[\frac{h}{j} \right] * 3600 \left[\frac{s}{h} \right] * \frac{28}{100} * 1 \left[\frac{MJ}{s} \right] = 177.10^6 [MJ]$$

L'énergie incorporée du cuivre est fonction du GER du cuivre à la teneur de 0,77% et de la quantité de cuivre de l'éolienne, de 10[t/MW]. Pour une teneur de 0,77%, le GER d'après Harmsen et al. (2013, page 68) est de 100[MJ/kg]. Toujours par [MW] de puissance installée, on a :

$$EnCu = 10000[kg] * 100 \left[\frac{MJ}{kg} \right] = 1.10^6 [MJ]$$

Dans notre situation de référence, le EROI vaut 18:1, donc on peut calculer EnInv à partir des autres facteurs de l'équation de départ :

$$EnInv = \frac{EnProd}{EROI} - EnCu = 8,83.10^6 [MJ]$$

À partir de là, on peut calculer le EROI en fonction de la teneur du minerai pour toutes les valeurs de la teneur du tableau vu précédemment, en faisant varier EnCu d'une ligne à l'autre. On considère EnInv et EnProd comme des constantes indépendantes de la teneur du minerai de cuivre. En reportant les valeurs dans un graphique, on obtient :

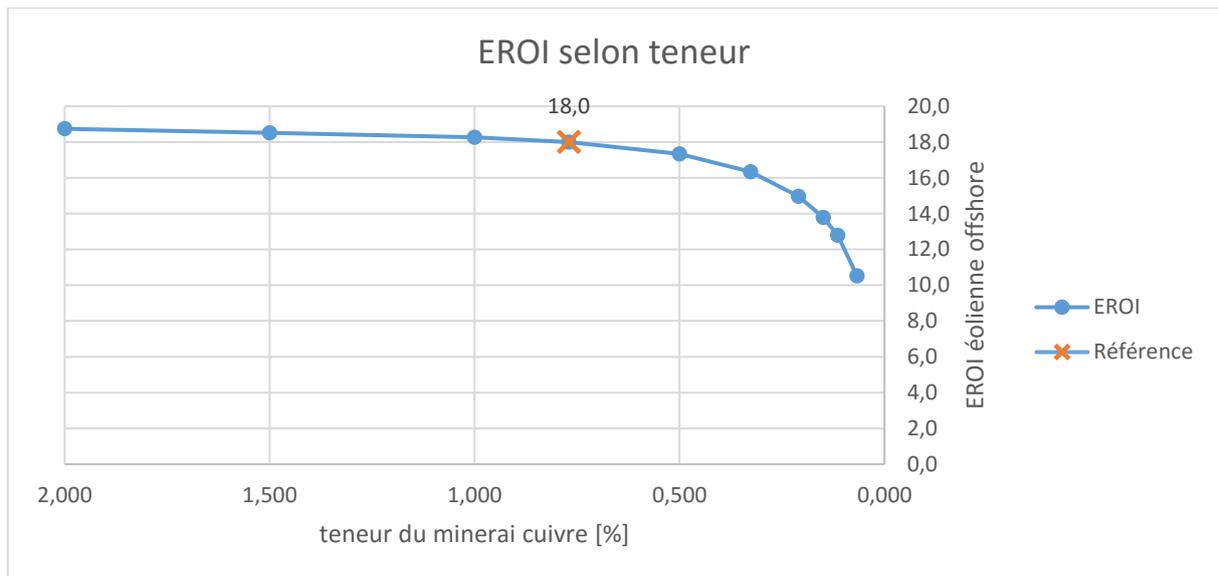


Figure 37 : EROI de l'éolienne offshore en fonction de la teneur du minerai de cuivre qui la compose

7.3.3 Échelle de temps

On a obtenu l'évolution du EROI en fonction de celle de la teneur du minerai, reste à savoir à quel rythme la teneur baissera. Une étude de Northey et al. (2014) aboutit à une prévision d'une baisse continue de la teneur du minerai de cuivre entre 2010 et 2100, pour aboutir à une teneur d'environ 0,1% à cette date, bien que de l'aveu-même des auteurs leur simulation a tendance à surestimer la teneur les premières années (autour de 2010) et à le sous-estimer vers la fin (autour de 2100). À la place de ces résultats qu'il n'est pas facile d'interpréter suite à ces réserves (mais dont le point important est la confirmation d'une continuation de la baisse de la teneur au fil du siècle), on peut regarder du côté de l'historique de la teneur du minerai de Crowson (2012, page 69). En ne tenant compte que des 100 dernières années, le taux de baisse de la teneur du minerai se situe entre 0,5 et 1% (en % de la teneur) par an, selon la première année de l'intervalle choisie.

On va définir arbitrairement trois seuils de baisse du EROI :

- À partir de 5%, seuil de perception
- À partir de 10%, baisse conséquente
- 20% et plus, baisse grave

Dans le tableau ci-dessous, on a coloré chacun de ces seuils respectivement en jaune, orange et rouge.

année	EROI pour 3 taux décroiss. [%/an]		
	0,5	0,75	1
2010	18,0	18,0	18,0
2020	17,9	17,9	17,8
2030	17,9	17,7	17,7
2040	17,8	17,6	17,5
2050	17,7	17,5	17,4
2060	17,7	17,4	17,1
2070	17,6	17,3	16,9
2080	17,5	17,1	16,6
2090	17,5	16,9	16,4
2100	17,4	16,7	16,1

Figure 38 : EROI d'une éolienne offshore en fonction du temps pour trois taux annuels de décroissance de la teneur du minerai de cuivre

7.3.4 Autres métaux

L'éolienne comprend aussi du néodyme et du dysprosium dont notre calcul n'a pas tenu compte dans le calcul précédent. Les données pour ces métaux sont loin d'être aussi complètes et abondantes que pour le cuivre.

On trouve cependant le chiffre 392 [MJ/kg] comme énergie de production pour le néodyme chez Fizaine et Court (2015, page 107), contre 743 [MJ/kg] chez Haque et al. (2014, page 630). La quantité de néodyme par éolienne à aimant permanent est de 124 [kg/MW] selon Elshkaki et Graedel (2013, page 271). Si on considère la valeur plus élevée des deux pour l'énergie de production, on obtient par [MW] de puissance installée :

$$743 \left[\frac{MJ}{kg} \right] * 124 [kg] = 0,092. 10^6 [MJ]$$

Le chiffre obtenu représente environ le dixième de ce qu'on avait pour le cuivre (pour la valeur actuelle du GER). Bien que le néodyme a une énergie de production plus élevée que le cuivre, le fait qu'on en utilise une petite quantité par éolienne rend son impact moindre dans le bilan énergétique de l'éolienne.

On ne dispose pas de chiffres équivalents pour le dysprosium. On trouve chez Haque et al. (2014, page 630) que les valeurs d'énergie de production les plus élevées pour des terres rares (il s'agit de Sm, Eu et Gd) sont d'environ 1000[MJ/kg]. L'utilisation de dysprosium dans une éolienne à aimant permanent se montant à 22[kg/MW] (Elshkaki et Graedel, 2013, page 271), si on considère la valeur d'énergie de production la plus élevée pour des terres rares trouvée dans la source citée précédemment, l'impact sur le bilan énergétique de l'éolienne se monterait alors à environ $0,022.10^6$ [MJ] par [MW] installé, soit une contribution marginale comparée à celle du cuivre.

7.3.5 Conclusions

La baisse de la teneur du minerai a un impact sur le EROI de l'éolienne qui accélère à mesure que cette teneur baisse. Cela provient du fait que le GER du cuivre augmente non pas linéairement mais exponentiellement lorsqu'on s'approche des faibles teneurs.

Si on compare les résultats obtenus ici avec l'étude de Fizaine et Court (2015) on constate une convergence sur le profil de la courbe du EROI en fonction de la teneur. On aperçoit néanmoins des

écarts importants concernant les valeurs obtenues. Ainsi, avec un même EROI de référence de 18 à la teneur actuelle, on arrive à un EROI de 15 lorsque la teneur tombe à 0,21%, alors que chez Fizaine et Court (2015) il faut attendre une teneur de 0,007% environ pour atteindre cette valeur de EROI, soit une différence d'un facteur 30. Principales explications à cette différence : la quantité de cuivre par [MW] d'éolien offshore que nous avons prise est de 10 tonnes par [MW] là où Fizaine et Court (2015) ont pris une hypothèse de 1,48 tonnes par [MW], soit un facteur de presque 7. Ceci découle du fait que nous avons suivi les hypothèses de García-Olivares et al. (2012) qui aboutissaient à ce chiffre par la prise en compte du raccordement au réseau, tel qu'expliqué précédemment. La seconde grande différence est que Fizaine et Court (2015) ont tenu compte d'une teneur de référence de 0,5% là où nous avons pris 0,77%, suivant en cela les données de Crowson (2012), ce qui décale notre courbe vers la gauche (et donc, chute plus rapide du EROI). Enfin, le reste provient probablement d'une relation teneur-énergie différente entre les deux études et d'autres différences méthodologiques.

Quant à l'étude de Harmsen et al. (2013), les résultats obtenus dans leur scénario central pour 2050 (environ 3% de baisse du EROI à cause du GER) sont proches des nôtres, notamment parce que nous avons repris leur courbe teneur-GER, et qu'ils ont considéré la même quantité de cuivre par [MW]. Leur valeur de EROI de base diffère, mais la conclusion exprimée en pourcentage converge.

D'un point de vue temporel, à partir des seuils prédéfinis on arrive au constat que la baisse du EROI des éoliennes offshore suite à la baisse de la teneur du minerai de cuivre ne devient perceptible que pour un taux de baisse de la teneur soutenu (minimum 0,75% par an) et uniquement à partir de la deuxième moitié/fin du 21^e siècle. De plus, d'autres facteurs décrits dans la partie qualitative de ce travail vont entrer en jeu et auront pour effet de retarder le moment où la baisse de la teneur pénalise de manière conséquente le EROI des éoliennes. Citons-en quelques-uns : la réduction de l'énergie d'extraction par améliorations techniques pour une teneur donnée, l'amélioration du facteur de charge des éoliennes. En revanche n'oublions pas que cette étude ne concernait que le cuivre, et que d'autres métaux constituant l'éolienne, s'ils suivent des tendances à la hausse du GER semblables, amplifieront la baisse du EROI.

On constate qu'aucun des seuils critiques pour le EROI (de 3:1 à 7:1) vus dans le chapitre sur le EROI n'a été atteint en 2100. Néanmoins, nous partions d'une valeur de base de 18 :1 et la conclusion pourrait être différente avec un EROI tenant compte du « *buffering* » ou de surcapacités, également vus dans le chapitre EROI.

Pour finir, ajoutons que nous n'avons pas tenu compte du recyclage pour le cuivre, or le métal recyclé ayant un bilan énergétique inférieur, le fait de prendre en compte le recyclage aboutirait à des chiffres plus cléments pour le EROI.

7.4 HHI

7.4.1 La notion de HHI

Le Herfindahl-Hirschman Index ou HHI est un indice utilisé en économie pour quantifier la concentration d'un marché (The United States Department of Justice, s.d.). Plus ce nombre est important, plus cela signifie que le marché étudié est concentré entre les mains d'un nombre réduit d'acteurs. Lorsque le HHI atteint la valeur maximale, on se trouve dans la situation d'un monopole total.

La formule du HHI est la suivante :

$$HHI = \sum_i x_i^2$$

Où x_i représente la part de marché de l'acteur i . Si on exprime les parts de marchés en pourcents, la valeur maximale du HHI est de 10000. Les analystes considèrent généralement un HHI compris entre 1500 et 2500 comme moyennement concentré, et comme très concentré au-dessus de 2500 (The United States Department of Justice, s.d.). On trouve aussi d'autres intervalles, par exemple les limites sont respectivement 1000 et 2000 pour Rosenau-Tornow et al. (2009, page 168).

Exemple de calcul de HHI : soient 3 acteurs possédant des parts de marché respectivement de 50, 30 et 20% ; le HHI vaudra dans ce cas de figure $50^2+30^2+20^2 = 3800$, ce qui d'après le critère vu précédemment correspond à un marché très concentré.

7.4.2 Le HHI et les métaux

Dans le cas qui nous occupe, à savoir la question de la disponibilité des métaux pour fabriquer les systèmes de production d'énergie renouvelable, le HHI est un indice intéressant pour quantifier la concentration de la production ou des réserves en métaux entre les différents pays du monde. Cet indice a d'ailleurs été utilisé par maints auteurs dans les études sur la criticité des métaux.

De cette façon, l'indice donne une indication sur le degré de dépendance d'un pays non producteur pour son approvisionnement en une ressource donnée. Plus la production est concentrée entre peu de pays, plus les pays clients sont en position de faiblesse pour négocier des prix ou des volumes à importer.

De plus, l'indice est un marqueur de risque. Un marché très concentré soumet les pays clients au risque permanent d'une rupture soudaine d'approvisionnement, soit que le pays fournisseur décide de réduire ses quotas d'exportation, soit qu'il ne puisse exporter en raison de troubles internes, d'une catastrophe naturelle, etc.

7.4.3 Données

On utilisera des données de plusieurs sources, comprenant les pourcentages de production et de réserve de chaque pays dans le total mondial, pour les 5 métaux étudiés plus les terres rares. Les détails des chiffres et des sources se trouvent dans les tableaux 2 à 4 de l'annexe 2.

7.4.4 Calculs et résultats

On a calculé le HHI pour les 5 métaux choisis dans le cadre de l'étude : le néodyme (Nd), le dysprosium (Dy), le cuivre (Cu), le tellure (Te) et l'indium (In). Le HHI a été calculé sur base des parts de marché pour la production, et également de la répartition des réserves mondiales. Il y a donc 10 HHI calculés, dont les détails se trouvent en annexe. La raison pour laquelle on a présenté à la fois les chiffres de production et de réserves est la suivante : le HHI basé sur les chiffres de production va nous donner une image de la concentration du marché tel qu'il se présente à l'heure actuelle. Effectuer le même raisonnement sur les réserves apporte davantage d'informations sur la tendance à plus long terme (avec toutes les précautions d'usage lorsqu'on parle des réserves, puisqu'il s'agit d'une grandeur fluctuante, comme on l'a vu dans le chapitre consacré).

Pour qualifier la concentration en « basse », « moyenne » et « élevée », on se basera sur le critère vu précédemment. Pour rappel, selon ce critère, la concentration est considérée comme basse lorsque le HHI est inférieur à 1500, moyenne entre 1500 et 2500, et élevée au-delà de 2500 (avec un maximum possible de 10000). On indiquera en vert les valeurs basses, en orange les moyennes et en rouge les élevées.

Voici le bilan des HHI pour les métaux étudiés :

Métal	HHI production	HHI réserves
Tellure – Te	919	1550
Indium – In	3444	5662
Dysprosium – Dy	9802	5364
Néodyme – Nd	8308	3160
Cuivre - Cu	1446	1455

Figure 39 : HHI des réserves et de la production annuelle pour 5 métaux

7.4.5 Conclusions

7.4.5.1 Le cuivre

D’après la classification choisie ci-avant, le cuivre ne présente pas de risque de concentration aussi bien sur le critère de la production que sur celui des réserves. Il faut néanmoins émettre deux observations : la première est que le score d’environ 1450 pour le HHI (aussi bien en production qu’en réserve) est en fait très proches de l’intervalle 1500-2500 qui définit une concentration moyenne. La deuxième observation est que le détail des chiffres montre que le Chili produit à lui seul environ 30% du cuivre mondial, et possède également environ 30% des réserves. On peut donc interpréter de ces réserves importantes que le Chili ne va probablement pas perdre sa place de leader du cuivre dans les années qui viennent. Le chiffre de 30% de la production et des réserves est important, et cela signifie qu’une rupture d’approvisionnement du marché mondial en provenance du Chili pourrait avoir d’importantes conséquences pour les pays clients. Les autres producteurs ont des parts de marché beaucoup plus faibles (10% et moins) et une défaillance de leur part aurait donc beaucoup moins d’importance. En conclusion, le HHI modéré pour le cuivre masque en réalité un risque important, le Chili, accompagné d’une myriade de producteurs moins dominants et donc moins risqués.

7.4.5.2 Le tellure

Le tellure bénéficie d’un HHI faible à modéré d’après les calculs réalisés. Cependant, comme on l’a déjà mentionné, les chiffres de production varient fortement d’une source à l’autre, ce qui limite la fiabilité des résultats.

7.4.5.3 L’Indium

Une grande concentration de la production et plus encore, des réserves en Chine, expliquent la valeur importante du HHI pour ce métal.

7.4.5.4 Le Dysprosium et le Néodyme

Le dysprosium et le néodyme sont deux terres rares, et à ce titre, elles souffrent du même handicap que les autres terres rares : la concentration hégémonique de la production en Chine. Cette concentration équivalent à un quasi-monopole explique les chiffres proches du maximum pour le HHI de ces métaux. La très grande criticité de cette situation a poussé d’autres acteurs à lancer ou relancer la production de terres rares. Du côté des réserves, la concentration n’est pas aussi défavorable que pour la production, et il existe donc des marges de manœuvre pour que d’autres acteurs hors de Chine jouent un rôle dans ce marché.

7.4.5.5 Globales

Le calcul du HHI pour les réserves et la production arrive généralement à la même conclusion, en terme de catégorie (basse – moyenne – élevée). Si on regarde plus attentivement les valeurs du HHI, il y a des différences, dont les plus parlantes concernent les terres rares, pour lesquelles la production est

beaucoup plus concentrée que les réserves, mettant en évidence que ce qui empêche la production ailleurs qu'en Chine n'est pas l'absence de la ressource, mais d'autres facteurs (environnementaux notamment). Pour l'indium, c'est le contraire, à savoir une plus grande concentration des réserves que de la production. Le tellure présente une situation proche entre les deux HHI. Quant au cuivre, l'égalité est presque parfaite : la part de production reflète celle des réserves, ce qui s'explique probablement par le fait que ce métal est produit depuis longtemps et en grande quantité.

Si on considère que le problème de la production se pose à plus court terme que celui des réserves, on peut conclure que les terres rares (Nd et Dy) sont clairement les plus problématiques. A plus long terme, si on considère les réserves, c'est l'indium et également les terres rares qui préoccupent. Néanmoins, l'indium étant produit à faible volume actuellement, on peut supposer que les efforts d'exploration croîtront en cas de forte demande pour ce métal.

7.5 Conclusions

Sur le court terme, le problème le plus criant est celui de la concentration de la production des terres rares en Chine, comme l'a montré l'analyse du HHI. Cela concerne donc le dysprosium et le néodyme, ce qui signifie que c'est la production d'éoliennes qui est soumise à ce risque, bien que le photovoltaïque y soit également opposé par le biais de l'indium, dans une moindre mesure.

La question des réserves relativement à la production a mis en avant un risque plus important pour l'indium, et dans une moindre mesure pour le cuivre et le tellure, ce qui concerne cette fois la production photovoltaïque. Néanmoins, le risque n'est pas immédiat, et la demande pour ces métaux mènera probablement à des efforts pour accroître le montant de ces réserves. Les terres rares bénéficient quant à elles de très importantes réserves, même en tenant compte de taux de croissance important de la production.

Enfin la question de la dégradation du EROI des éoliennes sous l'effet de la hausse de l'énergie de production des métaux est à envisager sur le long terme. Notre analyse a montré que l'impact des grands métaux tel le cuivre sur ce EROI sera probablement plus important que celui des petits tels le néodyme et le dysprosium, par le fait que ces derniers sont utilisés en petite quantité dans l'application. Cela reste néanmoins à approfondir faute de données suffisantes pour ces métaux. De l'autre côté du spectre, il serait également intéressant de creuser la question pour l'impact du fer sur le EROI, ce qui sort du cadre de ce travail. Enfin, ce risque mériterait d'être étudié pour le cas d'un panneau photovoltaïque.

8 Solutions

8.1 Le recyclage

8.1.1 Part dans la production

Le recyclage est évoqué par de nombreux auteurs comme une solution pour améliorer la disponibilité en matériaux, spécialement pour les pays qui disposent de peu de production primaire sur leur sol (Golev et al., 2014, page 55).

Cependant, comme le relèvent de nombreux auteurs, le recyclage ne joue qu'un rôle négligeable dans l'approvisionnement total en un certain métal tant que la production de celui-ci est en phase de croissance forte, et que les applications dans lesquelles interviennent ce métal ont une grande durée de vie.

Illustrons ce principe avec la petite simulation suivante : on considère qu'un métal part d'un niveau de production de 100 en 2000. À partir de cette date-là, la production primaire augmente de 5% par an jusque 2040, date à laquelle la production primaire se stabilise. Si l'application qui utilise ce métal a une durée de vie de 20 ans (typiquement : une éolienne) et que le taux de recyclage du métal est de 0% avant 2000 et 50% à partir de cette date, le profil de production est le suivant :

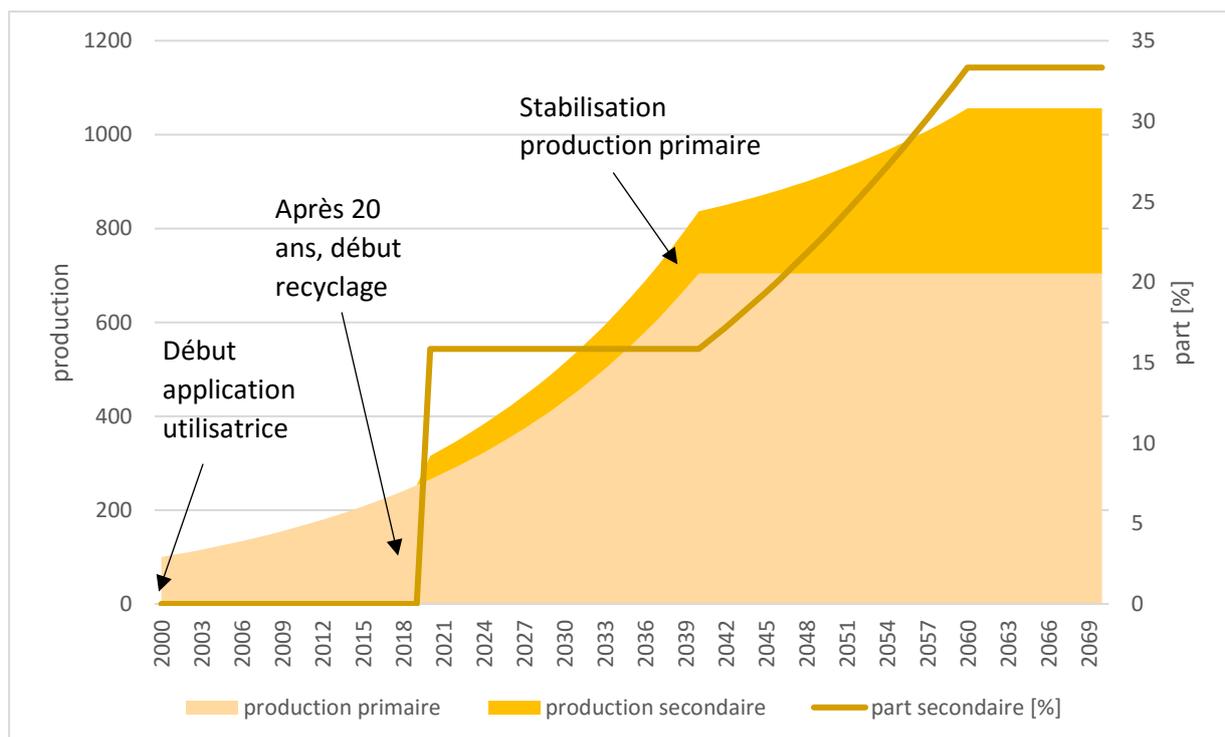


Figure 40 : Production primaire et secondaire (indice 100 en 2000) et part de la production secondaire dans le total, selon hypothèses formulées dans le travail

Avant 2020, la production secondaire est nulle, à partir de 2020 et jusque 2040, elle s'établit à 16% de la production totale. On constate que même avec un taux de recyclage correct de 50%, seule une petite partie de la production peut être reprise par la production secondaire. Ceci s'explique par le décalage entre le moment où l'éolienne (ou autre application utilisant le métal) est construite et celui où ce métal devient disponible pour réutilisation. Pendant cet intervalle de temps, la production primaire a continué à croître, réduisant la part de la production secondaire dans le total.

À partir du moment où la production primaire se stabilise, la part de la production secondaire dans le total commence à croître, jusqu'à atteindre son maximum et s'y stabiliser. Elle représente alors 1/3 du total.

Cette petite simulation montre bien que la part de la production secondaire dans le total ne peut pas être élevée tant que la production primaire continue de croître, et cela est d'autant plus vrai que le taux de croissance est élevé, et que la durée de vie des applications utilisant le métal est grande. Ci-dessous, un petit tableau montre quelle part représente la production secondaire dans le total pour différents taux de croissance de la production primaire et plusieurs durées de vie des applications (taux de recyclage de 50%).

Part de la production secondaire [%]				
Durée de vie [an]	Taux crois. prod. primaire [%]			
	0	2	5	10
20	33	25	16	7
25	33	23	13	4
30	33	22	10	3

Figure 41 : Pour un métal donné, part de la production secondaire dans le total si taux de recyclage de 50%, pour différents taux de croissance de la production primaire et différentes durées de vie moyennes des équipements utilisant ce métal

Cependant, le recyclage reste une solution particulièrement intéressante pour les pays qui ne disposent pas d'une grande capacité de production primaire sur leur propre territoire.

8.1.2 Économies d'énergie

Le recyclage des métaux permet de substantielles économies d'énergies, par rapport à la production primaire de métal. Le gain principal réside dans le fait qu'il ne faut plus traiter d'énormes quantités de minerai pour en extraire le métal, puisqu'on en dispose déjà sous sa forme concentrée. L'avantage est d'autant plus vrai pour les métaux étant produits à partir de gisements à faible teneur, ou ayant une énergie de formation élevée (UNEP, 2013, page 84).

Cependant, certaines étapes n'existant pas dans la production primaire viennent s'ajouter dans le cas du recyclage : il faut en effet collecter le métal, puis il faut bien souvent le traiter pour retirer les peintures, traitements de surface, et autres matériaux adhérant au métal recherché. Le métal peut également se trouver sous forme d'alliage. Ces étapes ont également un coût énergétique dont il faut tenir compte dans le bilan du recyclage (UNEP, 2013, page 84).

Quand on effectue le bilan total, cependant, le résultat est clairement un gain du recyclage par rapport à la production primaire, ainsi qu'en témoigne ce tableau.

Metal/Product	% Savings	References
Aluminium	90–97	Norgate & Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001), Quinkert et al. (2001), International Aluminium Institute (2011), Chapman and Roberts (1983)
Copper	84–88	Norgate and Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001)
Gold	98	ecoinvent v2.2
Lead	55–65	Norgate and Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001)
Magnesium	97	USEPA (1994)
Nickel	90	Norgate and Rankin (2002)
Palladium	92–98	ecoinvent v2.2
Platinum	95	ecoinvent v2.2
Rhodium	98	ecoinvent v2.2
Silver	96	ecoinvent v2.2
Steel	60–75	Norgate and Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001)
Stainless Steel (304)	68	Johnson et al. (2008), Eckelman (2010)
Titanium	67	Chapman and Roberts (1983)
Zinc	60–75	Norgate and Rankin (2002), Gaballah and Kanari (2001)

Figure 42 : Économies d'énergie permises par le recyclage (UNEP, 2013, page 86)

Pour le cuivre, on voit que l'économie d'énergie du recyclage est de 84 à 88%.

8.2 Le « Design for Recycling »

Améliorer le taux de recyclage des métaux est souhaitable. Cela requière néanmoins de prendre des actions à tous les stades de la vie des métaux. Une attention particulière doit être portée à la conception des équipements utilisant des métaux. Il faut penser ceux-ci dès la conception en ayant en tête la façon dont on va les démonter et recycler leurs composants.

Ainsi est né le concept de « *Design for Recycling* » ou « *DfR* ». Voici quelques mots d'ordre de ce concept, d'après Graedel (2012, pages 330-332) :

- Minimiser le nombre de composants et de matériaux différents, viser la simplicité
- Quand l'emploi d'un matériau dangereux est requis, le rendre facilement identifiable et démontable
- Lors de la conception, utiliser le « *reverse fishbone diagram* » qui décrit les étapes par lesquelles on démonte pièce par pièce un équipement ; utiliser ce diagramme révèle au concepteur les améliorations possibles pour rendre le démontage plus facile
- Recourir à des alliages courants qu'on pourra récupérer pour des usages similaires, plutôt que des alliages ultra-spécifiques

Qui plus est, la stratégie de recyclage doit être adaptée selon le type de technologie concerné, et plus précisément en fonction du ratio entre la durée de vie moyenne de l'équipement et la durée du cycle de vie de sa technologie. Par exemple pour une télévision la durée de vie de l'équipement est généralement supérieure à celle de sa technologie, autrement dit elle deviendra obsolète avant d'être hors service. Dans ce cas de figure, un recyclage intégral est le plus indiqué (ce qui inclut la réutilisation de certains composants). En revanche, dans le cas d'un container (qui a plus de chance d'être utilisé avant

l'obsolescence de la technologie), une refabrication (« *remanufacturing* ») sera généralement plus pertinente.

Enfin, on constate que le recyclage d'un équipement a plus de probabilité d'être effectué lorsque le rapport valeur des composants/nombre et intrication des composants se situe au-dessus d'une certaine valeur. Autrement dit, il y aura un intérêt économique à démonter un équipement pour en extraire les composants si ceux-ci sont précieux. Par exemple, les batteries automobiles sont présentées comme au-dessus de la limite, les machines à café comme en-dessous. Donc, lors de la conception d'un équipement, si on utilise des matériaux de peu de valeur, il faut les rendre d'autant plus faciles à retirer/démonter/recycler.

8.3 La substitution

La substitution est le principe par lequel, pour une application donnée, on remplace un matériau par un autre. Cela peut signifier le remplacement d'un métal par un autre métal, mais pas uniquement. Par exemple, aux USA, on recourt de plus en plus à la fibre de verre en lieu et place du cuivre et de l'aluminium (Ruth, 1995, page 210).

Dans certaines applications, il est possible de remplacer un métal par un autre métal aux caractéristiques proches. Voici quelques substitutions métalliques possibles pour les panneaux PV et les éoliennes :

Métal	Usage	Métal substituant
In	Cellule PV	Sb – Antimoine
Te	Cellule PV	Se – Sélénium
Nd	Éolienne	SmCo – Alliage Samarium-Cobalt
Dy	Éolienne	Tb – Terbium

Figure 43 : Substitution des métaux, d'après Graedel (2012, page 328)

Citons néanmoins un inconvénient à la substitution : le risque est de déplacer le problème de rareté sur un autre métal, puisque la demande pour celui-ci augmentera suite à la substitution. De plus, la substitution n'est pas toujours possible ou elle ne permet pas toujours de conserver les mêmes performances que le métal initial.

8.4 Les « Elements of Hope » (Diederer, 2010a)

André Diederer a développé le concept d'« *Elements of Hope* » ou éléments de l'espoir. L'idée est de prendre conscience de la rareté de bon nombre de métaux que nous utilisons pourtant dans de plus en plus d'applications – et particulièrement dans la haute technologie telle que les SPER – et de revenir sur le long terme à l'utilisation des éléments chimiques les plus abondants à la surface de la Terre.

Voici la classification effectuée par l'auteur :

H	C	N	O	P	S	Cl	non-metal elements
Na	Mg	Al	Si	Elements of Hope			
K	Ca	Fe					
Ti	Cr	Mn	Cu	all other elements:			
B	F	Ar	Br	Critical elements			
Frugal elements							

Figure 44 : « Elements of Hope », « Frugal » et « Critical elements » (Diederer, 2010b)

Comme on peut le voir sur le tableau, aucun des métaux étudiés au cours de ce travail n'est présent dans la catégorie des « *Elements of Hope* ». Le cuivre figure dans la catégorie intermédiaire des « *frugal elements* ». Tous les autres (tellure, indium, dysprosium, néodyme) sont dans la dernière catégorie, celle des « *critical elements* ». La logique prônée par Diederer est de toujours privilégier les « *Elements of Hope* » lors de la conception d'un équipement. Les « *Frugal Elements* » doivent être réservés pour les applications plus spécifiques, et les « *critical elements* » uniquement quand aucune alternative n'existe.

Il cite deux exemples : pour les panneaux photovoltaïques, il préconise l'utilisation de panneaux à base de silicium amorphe ou de matériaux organiques. Concernant les aimants permanents, la solution proposée est de recourir à des alliages Mn-Al (Diederer, 2010b, page 96).

8.5 Durée de vie

Prolonger la durée de vie des équipements permet d'utiliser moins de matériau par unité de temps. Cependant, on constate de manière assez paradoxale que les SPER ont des durées de vie généralement moins élevées que leurs concurrents fossiles ou nucléaires, exception faite des centrales hydroélectriques. Voici par exemple les durées de vie considérées par Fizaine et Court (2015, page 112) :

Technologie	Durée de vie [an]	Sources
PV (Si, CIGS, CdTe)	25	Raugei et al., 2012
Éolien (onshore-offshore)	20	Kubiszewski et al. (2010), Weißbach et al. (2013, page 217)
Nucléaire	40-60	Hall and Day (2009), Weißbach et al. (2013, page 218)
Centrale charbon	50	Weißbach et al. (2013, page 218)
Centrale hydroélectrique	100	Weißbach et al. (2013, page 217)

Figure 45 : Durée de vie de divers systèmes de production d'électricité, adapté de Fizaine et Court (2015, page 112)

Autrement dit, les SPER PV et éoliens exploitent un flux d'énergie qui se renouvelle en permanence, mais l'exploitation de ce flux renouvelable s'effectue au prix d'une utilisation non renouvelable de ressources métalliques (plus exactement partiellement renouvelable en fonction du taux de recyclage).

Améliorer la durée de vie de ces équipements aurait plusieurs avantages : d'une part cela réduirait le besoin en matériaux par unité de temps, d'autre part le EROI serait amélioré puisque la production énergétique totale de l'équipement sur sa durée de vie serait accrue.

8.6 Accords commerciaux

Rosenau-Tornow et al. (2009, page 165) suggère aux compagnies qui dépendent d'un approvisionnement en métal pour leur business de signer des accords de long terme avec leurs fournisseurs, ainsi que de diversifier ceux-ci. Ce conseil est tout à fait applicable au cas d'un Etat. Notons cependant que la diversification peut être dans certains cas limitée par le nombre très restreint de fournisseurs potentiels, comme on a pu le voir dans le cas des terres rares.

Tiess (2010, page 193) cite l'exemple de la Convention de Lomé de 1976 entre l'UE et un certain nombre de pays africains, caribéens et du Pacifique, et dont l'objet était de garantir les exportations de matières premières vers l'Europe tout en garantissant des compensations financières pour ces pays en cas de fluctuations des prix des matières premières. Tiess déplore qu'à ce jour il n'y ait pas de renouvellement prévu de cette Convention au-delà de 2020.

8.7 Législation

Faire évoluer la législation peut être une manière pour accroître la disponibilité en métaux. Ainsi s'agissant de l'Union Européenne, Tiess (2010, page 193) note la complexité législative concernant l'exploitation minière, menant à des délais allant jusqu'à dix ans pour obtenir des licences d'exploitation. Simplifier ces procédures permettrait d'accroître la production domestique pour l'UE.

Si on se place du point de vue de l'Union Européenne et s'agissant des législations environnementales contraignantes, on peut se poser la question de savoir s'il est préférable pour l'environnement d'importer des terres rares de Chine produites dans des conditions environnementales désastreuses (Massari et Ruberti, 2013, page 42), ou s'il faut assouplir certaines législations européennes en la matière pour faciliter la production domestique.

8.8 Conclusions

Il existe plusieurs solutions pour réduire les contraintes pesant sur l'approvisionnement en métaux. Le recyclage pourrait être une contribution importante, même s'il ne sera que de peu d'effet à court terme pour les métaux dont la production est en forte croissance, et servant dans des applications à grande durée de vie comme les éoliennes ou les panneaux PV. Le « *Design for recycling* » est nécessaire pour améliorer le taux recyclage, en particulier pour les petites pièces de faible valeur.

Établir des relations commerciales permettra à un pays de réduire son exposition au risque de rupture d'approvisionnement s'il est importateur. Adapter la législation minière est une piste, dont les aspects négatifs potentiels doivent être également évalués. La substitution de métal est souvent possible, moyennant parfois des pertes de performances.

Enfin, la philosophie des « *Elements of Hope* » ouvre des perspectives pour l'approvisionnement en métaux (et autres matériaux) sur le long et le très long terme.

9 Conclusions

9.1 Conclusions sur les contraintes

Dans ce travail, on a cherché à évaluer si la disponibilité en matériaux pouvait affecter la production de systèmes de production d'énergie renouvelables (SPER) de types panneaux photovoltaïques et éoliennes offshore. On a pour ce faire procédé à l'étude de trois contraintes potentielles : la question des réserves, celle de l'énergie de production des métaux et l'impact sur le EROI, et une famille de contraintes issues des études de criticité.

Une des conclusions de notre étude est que sur le court terme, les facteurs contraignant l'approvisionnement en métaux ne sont pas les facteurs géologiques proprement dit, mais plutôt ceux-ci : les capacités de production (dont le développement est freiné notamment par des contraintes environnementales), les contraintes dues à la coproduction, la concentration de la production dans peu de pays. Les risques de la coproduction et de la concentration concernent plus particulièrement les « petits » métaux (indium et tellure) et les terres rares (dysprosium et néodyme).

La contrainte sur la ressource géologique opère à plus long terme. S'il est difficile d'estimer le moment de l'épuisement des réserves étant donné l'aspect dynamique de celles-ci, la tendance de fond de la baisse de la teneur des gisements paraît établie, tout du moins pour le cuivre. Ceci nous mène à rejeter le point de vue soutenu notamment par Meinert et al. (2016) selon lequel l'épuisement d'une ressource ne peut pas avoir lieu puisque toute raréfaction à un instant t mène – suite à l'augmentation de son prix – à des efforts de prospection qui aboutissent à l'accroissement des réserves de cette ressource. Or la baisse continue de la teneur des gisements signifie qu'en moyenne ce qui s'ajoute à une réserve est de qualité inférieure au contenu de la réserve à un moment donné. Par qualité inférieure on entend qu'il faudra consommer davantage d'énergie pour obtenir une même quantité de métal in fine. Nous nous rangeons davantage derrière la position de Harmsen et al. (2013, page 73) lorsqu'il écrit : « *Les réserves, actuellement souvent utilisées pour évaluer la rareté [d'une ressource], ont à peine changé durant les dernières décennies en dépit d'une production accrue, et pourraient bien ne pas changer dans un futur proche. En revanche, les besoins en énergie pour la production minérale vont probablement augmenter, ce qui fait potentiellement de cette méthode [= l'évaluation du besoin en énergie] un indicateur de rareté bien plus significatif* » (traduction personnelle).

C'est cette contrainte sur l'énergie d'extraction qui sera prédominante sur le long terme. Dans l'étude, nous avons cherché à savoir si le EROI des SPER pouvait être réduit suite à la hausse de l'énergie de production des métaux, et la conclusion pour ce qui concerne l'impact du cuivre sur le EROI d'une éolienne offshore selon les hypothèses vues dans le chapitre quantitatif est que cet impact ne devrait pas être significatif avant la deuxième moitié du 21^e siècle. Ce résultat doit être pris comme une première approche et davantage de recherches dans cette voie seraient les bienvenues. Notons que cette contrainte jouera principalement pour les « grands » métaux, soient ceux qui sont utilisés massivement dans le corps d'un SPER, et non les métaux utilisés à l'état de « trace » simplement pour doper les performances d'un alliage (comme peut l'être le dysprosium). La discussion sur le seuil de EROI minimum nécessaire à une société développée s'est finalement révélée non déterminante dans notre étude, étant donné la faible baisse du EROI de l'éolienne qu'on a trouvée à l'échelle du siècle.

Pour finir avec l'analyse des contraintes, notons également l'amplification à venir d'autres contraintes sous l'effet de la baisse de la teneur des gisements : la hausse des coûts d'extraction et des impacts environnementaux (puisque l'on extrait davantage de matière du sol), ces impacts pouvant eux-mêmes entraîner un durcissement des législations environnementales à l'encontre de l'extraction minière.

9.2 Réflexions sur les limites des études

Beaucoup d'études portant sur la criticité des ressources mettent face à face deux aspects : le risque d'approvisionnement de la ressource d'une part, l'importance de cette ressource pour l'entité étudiée (que cela soit un pays ou une technologie) d'autre part. Ainsi, l'Union européenne situe ses métaux sur un graphique dont chacun de ces aspects constitue un axe, graphique dans lequel les métaux critiques se trouvent en haut à droite, autrement dits sont considérés critiques les métaux qui sont en même temps risqués sur le plan de l'approvisionnement, et essentiels à l'industrie de l'UE (Ad-Hoc Working Group on Raw Materials, 2014, page 20).

Or, notre travail s'est principalement focalisé sur le côté « risque d'approvisionnement » et peu sur celui de l'importance de chaque métal pour les SPER étudiées. On a vu dans le chapitre sur la sensibilité que plusieurs alternatives conceptuelles existent tant pour les éoliennes que pour les panneaux PV, et dans le chapitre consacré aux solutions que des substitutions de métaux sont possibles pour conserver des propriétés fonctionnelles similaires. Cela signifie qu'il nous est difficile de conclure sur une des questions initiales de ce travail – à savoir dans quelle mesure le développement des SPER pourrait être entravé par la disponibilité en métaux – au-delà des conclusions d'ordre plus général déjà mentionnées dans les premiers paragraphes de cette conclusion. Le point suivant prolonge cette critique.

On a vu que pour chaque filière (éolienne ou solaire photovoltaïque), il existait plusieurs technologies différentes (éolien onshore, offshore, moteur à aimant permanent ou non, panneaux Si cristallin ou amorphe, couches minces, ...), et pour chacune d'entre elles, il existe souvent un ou plusieurs substituts métallique (remplacement du Te par le Se, par exemple). Or les études présentées dans le cadre de la revue de littérature se limitent souvent à l'étude d'un nombre restreint de technologies et/ou d'un nombre restreint de matériaux, en fixant des hypothèses ou des scénarios pour « tout le reste ».

Le problème de cette approche est le suivant : admettons qu'on arrive à la conclusion qu'un métal « A » ne sera pas disponible en quantité suffisante pour assurer la production d'une certaine technologie, mais que cette indisponibilité peut être résolue par le recours à une autre technologie nécessitant un autre métal « B » disponible en quantités suffisantes. La conclusion de l'étude serait alors que l'objectif de production de SPER est atteignable moyennant cette substitution de A par B. En parallèle de cette étude, on peut imaginer une autre étude sur d'autres technologies arrivant au même type de conclusion, à savoir que l'objectif est atteignable grâce à la substitution du métal « C » par le métal « B ». Le problème est que, puisque ces deux études s'ignorent ou en tout cas gardent un scope limité à leur technologie et leur métal, elles aboutissent à une conclusion de faisabilité qui serait peut-être différente si les deux études avaient été intégrées. Peut-être n'est-il pas possible de substituer à **la fois A par B et C par B**.

Comme le périmètre des études est nécessairement limité par le temps disponible au chercheur et par son domaine de compétence, pourrait-on imaginer l'intégration des études sur les ressources au moyen de simulations globales (à la manière de ce qu'on réalise pour le climat), qui mettraient ainsi en évidence les incompatibilités qui existent entre certaines stratégies ? Notons cependant que même une approche telle que celle-ci buterait à un moment où un autre sur des limites, car la question de la disponibilité des ressources dépend elle-même d'évolutions dans une série d'autres domaines qu'il serait difficile d'intégrer entièrement dans la simulation : l'économie, les choix politiques et de consommation, l'évolution technologique, démographique, etc.

10 Bibliographie

- Achzet B., Helbig C. (2013), « How to evaluate raw material supply risks-an overview », *Resources Policy*, 38, pp. 435-447, doi : 10.1016/j.resourpol.2013.06.003
- Ad-Hoc Working Group on Raw Materials (2014), « Report on Critical raw materials for the EU », *European Commission*, pp. 1-41, May 2014
- Candelise C., Speirs J.F., Gross R.J.K. (2012), « Materials availability for thin film (TF) PV technologies development : A real concern ? », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 4972-4981, 2012, doi : 10.1016/j.rser.2011.06.012
- Commission Européenne (2014), « COMMUNICATION DE LA COMMISSION AU PARLEMENT EUROPÉEN, AU CONSEIL, AU COMITÉ ÉCONOMIQUE ET SOCIAL EUROPÉEN ET AU COMITÉ DES RÉGIONS - Un cadre d'action en matière de climat et d'énergie pour la période comprise entre 2020 et 2030 », *COM(2014) 15 final*, 22 janvier 2014, CELEX-52014DC0015-FR-TXT.pdf
- Crowson P. (2011), « Some observations on copper yields and ore grades », *Resources Policy*, pp. 59-72, December 2011, doi : 10.1016/j.resourpol.2011.12.004
- Dessus B. (2014), « Déchiffrer l'énergie », Belin, ISBN 978-2-7011-6440-3
- Diederer A. (2010a), « Global Resource Depletion – Managed Austerity and the Elements of Hope », *Eburon*, ISBN 978-90-5972-425-9
- Diederer A. (2010b), « Materials Scarcity, Managed Austerity and the Elements of Hope », *TNO Defence, Security and Safety Physical Protection & Survivability*, Rijswijk, The Netherlands, présentation pdf récupérée le 19 07 2016 de http://www.wachstumimwandel.at/wp-content/uploads/Andr_Diederer_-_Materials_Scarcity_Managed_Austerity_and_the_Elements_of_Hope_new.pdf
- Elshkaki A., Graedel T.E. (2013), « Dynamic analysis of the global metal flows and stocks in electricity generation technologies », *Journal of Cleaner Production*, 59, pp. 260-273, July 2013, doi : 10.1016/j.jclepro.2013.07.003
- Elshkaki A., Graedel T.E. (2014), « Dysprosium, the balance problem, and wind power technology », *Applied Energy*, 136, pp. 548-559, October 2014, doi : 10.1016/j.apenergy.2014.09.064
- Elshkaki A., Graedel T.E. (2015), « Solar cell metals and their hosts: A tale of oversupply and undersupply », *Applied Energy*, 158, pp. 167-177, doi : 10.1016/j.apenergy.2015.08.066
- Fizaine F., Court V. (2015), « Renewable electricity producing technologies and metal depletion: A sensitivity analysis using the EROI », *Ecological Economics*, 110, pp. 106-118, doi : 10.1016/j.ecolecon.2014.12.001
- Fthenakis V. (2009), « Sustainability of photovoltaics : The case for thin-film solar cells », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, pp. 2746-2750, May 2009, doi : 10.1016/j.rser.2009.05.001
- García-Olivares A, Ballabrera-Poy J., García-Ladona E., Turiel A. (2012), « A global renewable mix with proven technologies and common materials », *Energy Policy*, 41, pp. 561-574, doi : 10.1016/j.enpol.2011.11.018

- 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, pp. 52-59, doi : 10.1016/j.resourpol.2014.03.004
- Govett G.J.S., Govett M.H. (1974), « The concept and measurement of mineral reserves and resources », *Resources Policy*, pp. 46-55, September 1974
- Graedel T.E. (2011), « On the Future Availability of the Energy Metals », *The Annual Review of Materials Research*, pp. 323-335, March 2011, doi : 10.1146/annurev-matsci-062910-095759
- Graedel T.E., Harper E.M., Nassar N.T., Nuss P., Reck B.K. (2015), « Criticality of metals and metalloids », *PNAS*, vol. 112, no. 14, pp. 4257-4262, doi : 10.1073/pnas.1500415112
- Gutfleisch O., Willard M.A., Brück E., Chen C.H., Sankar S.G., Liu J.P. (2011), « Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient », *Advanced Materials*, 23, pp. 821-842, doi : 10.1002/adma.201002180
- Habib K., Wenzel H. (2014), « Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling », *Journal of Cleaner Production*, 84, pp. 348-359, April 2014, doi : 10.1016/j.jclepro.2014.04.035
- Habib K., Wenzel H. (2016), « Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective – using the case of direct-drive wind turbines », *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 3852-3863, doi : 10.1016/j.jclepro.2015.07.064
- Hall C.A.S., Balogh S., Murphy D.J.R. (2009), « What is the Minimum EROI that a Sustainable Society Must Have? », *Energies*, 2, pp. 25-47, doi : 10.3390/en20100025
- Hall C.A.S., Lambert J.G., Balogh S.B. (2014), « EROI of different fuels and the implications for society », *Energy Policy*, 64, pp. 141-152, doi : 10.1016/j.enpol.2013.05.049
- Haque N., Hughes A., Lim S., Vernon C. (2014), « Rare Earth Elements: Overview of Mining, Mineralogy, Uses, Sustainability and Environmental Impact », *Resources* 2014, 3, pp. 614-635; doi : 10.3390/resources3040614
- Harmsen J.H.M., Roes A.L., Patel M.K. (2013), « The impact of copper scarcity on the efficiency of 2050 global renewable energy scenarios », *Energy*, 50, pp. 62-73, January 2013, doi : 10.1016/j.energy.2012.12.006
- Hermann W.A. (2006), « Quantifying global exergy resources », *Energy*, 31, pp. 1685-1702, 2006, doi : 10.1016/j.energy.2005.09.006
- Hoenderdaal S., Espinoza L.T., Marscheider-Weidemann F., Graus W. (2013), « Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? », *Energy*, 49, pp. 344-355, 2013, doi : 10.1016/j.energy.2012.10.043
- Institute for Energy and Transport (IET) (2016), « Materials information system – Tellurium », *European Commission*, 7 april 2016 (website last update), récupéré le 9 août 2016 de <https://setis.ec.europa.eu/mis/material/tellurium>
- Institute for Energy and Transport (IET) (2016), « Materials information system – Indium », *European Commission*, 7 april 2016 (website last update), récupéré le 9 août 2016 de <https://setis.ec.europa.eu/mis/material/indium>

- Kleijn R., van der Voet E., Kramer G.J., van Oers L., van der Giesen C. (2011), « Metal requirements of low-carbon power generation », *Energy*, 36, pp. 5640-5648, July 2011, doi : 10.1016/j.energy.2011.07.003
- Knoeri C., Wäger P.A., Stamp A., Althaus H.-J., Weil M. (2013), « Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand – With material flow supply modelling approaches », *Science of the Total Environment*, 461-462, pp. 808-812, doi : 10.1016/j.scitotenv.2013.02.001
- Lambert J.G., Hall C.A.S., Balogh S., Gupta A., Arnold M (2014), « Energy, EROI and quality of life », *Energy Policy*, 64, pp. 153-167, doi : 10.1016/j.enpol.2013.07.001
- Marshall J.M., Dimova-Malinovska (2002), « Photovoltaic and Photoactive Materials – Properties, Technology and Applications », *NATO Science Series*, ISBN 978-1-4020-0824-5
- Massari S., Ruberti M. (2013), « Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies », *Resources Policy*, 38, pp. 36-43, doi : 10.1016/j.resourpol.2012.07.001
- McKelvey V.E. (1974), « Potential mineral reserves », *Resources Policy*, pp. 75-81, December 1974
- Meinert D.L., Robinson G.R.Jr., Nassar N.T. (2016), « Mineral resources: Reserves, Peak Production and the Future », *Resources*, pp. 1-14, February 2016, doi : 10.3390/resources5010014
- Nassar N.T., Barr R., Browning M., Diao Z., Friedlander E., Harper E.M., Henly C., Kavlak G., Kwatra S., Jun C., Warren S., Yang M-Y, Graedel T.E. (2012), « Criticality of the Geological Copper Family », *Environmental Science & Technology*, 46, pp. 1071-1078, doi : 10.1021/es203535w
- nef.org.uk (s.d.), « Types of Photovoltaic (PV) Cells », *National Energy Foundation*, récupéré le 2 août 2016 de <http://www.nef.org.uk/knowledge-hub/solar-energy/types-of-photovoltaic-pv-cells>
- Northey S., Mohr S., Mudd G.M., Z. Weng, D. Giurco (2014), « Modelling future ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining », *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 190-201, October 2013, doi : 10.1016/j.resconrec.2013.10.005
- Polinares (2012), « Fact Sheet: Indium », *Polinares – EU Policy on Natural Resources*, Polinares working paper n°39, March 2012, récupéré le 9 août 2016 de http://www.polinares.eu/docs/d2-1/polinares_wp2_annex2_factsheet5_v1_10.pdf
- Ray G.F. (1984), « Mineral reserves – Projected lifetimes and security of supply », *Resources Policy*, pp. 75-80, June 1984
- Reck T.B., Graedel T.E. (2012), « Challenges in Metal Recycling », *Science*, 337, pp. 69.-695, doi : 10.1126/science.1217501
- Roelich K., Dawson D.A., Purnell P., Knoeri C., Revell R., Busch J., Steinberger J.K. (2014), « Assessing the dynamic material criticality of infrastructure transitions : A case of low carbon electricity », *Applied Energy*, 123, pp. 378-386, January 2014, doi : 10.1016/j.apenergy.2014.01.052
- Rosenau-Tornow D., Buchholz P., Riemann A., Wagner M. (2009), « Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials-a combined evaluation of past and future trends », *Resources Policy*, 34, pp. 161-175, doi : 10.1016/j.resourpol.2009.07.001
- Roudart L. (2015) « The role of Agriculture in Development : A History of Thought », chapitre 2 du cours *Economics and Agricultural Policies in Developing Countries* (SOCA-D471-0-201516), Université Libre de Bruxelles 2015-2016

- Ruth M. (1995), « Thermodynamic constraints on optimal depletion of copper and aluminum in the United States: a dynamic model of substitution and technical change », *Ecological Economics*, 15, pp. 197-213
- Sievers H., Buchholz P., Huy D. (s.d.), « Evaluating supply risks for mineral raw materials », *Budenanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, GER*, pp. 1-13
- Singer D.A. (s.d.), « Estimating Amounts of Undiscovered Mineral Resources », *U.S. Geological Survey*, pp. 79-84
- Skinner B.J. (1976), « A Second Iron Age Ahead? », *American Scientist*, Vol. 64, Issue 3, pp.258-269, May 1976
- Skinner B.J. (1979), « Earth resources », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, Vol. 76, No. 9, pp. 4212-4217, September 1979
- Skinner B.J. (2001), « Exploring the resource base », *Department of Geology and Geophysics – Yale University*, keynote talk presented at the workshop « The Long-Run Availability of Minerals », Washington, DC, April 22-23, 2001
- The United States Department of Justice (s.d.), « Herfindahl-Hirschman Index », récupéré le 9 août 2016 de <https://www.justice.gov/atr/herfindahl-hirschman-index>
- Tiess G. (2010), « Mineral policy in Europe : Some recent developments », *Resources Policy*, 35, pp. 190-198, doi : 10.1016/j.resourpol.2010.05.005
- U.S. Geological Survey (2005), « Indium statistics », in Kelly, T.D., and Matos, G.R., comps., Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: *U.S. Geological Survey Data Series* 140, available online at <http://pubs.usgs.gov/ds/2005/140/> - récupéré le 8 août 2016
- U.S. Geological Survey, U.S. Department of the Interior (2015), « MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2015 », *USGS*, récupéré le 9 août 2016 de <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2015/mcs2015.pdf>
- UNEP (2013), Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, *A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel*, van der Voet E.; Salminen R.; Eckelman M.; Mudd, G.; Norgate T.; Hirschier R. – Chapter 4 : « Metal Production and Energy Use »
- USGS Mineral Resource Program (2014), « Tellurium —The Bright Future of Solar Energy », *USGS*, <https://pubs.usgs.gov/fs/2014/3077/pdf/fs2014-3077.pdf>
- USGS (2009), [Appendixes], *USGS*, récupéré le 9 août de <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2009/mcsapp2009.pdf>
- Valero Alicia, Valero Antonio (2010), « Physical geonomics: Combining the exergy and Hubbert peak analysis for predicting mineral resources depletion », *Resources, Conservation and Recycling*, 54, pp. 1074-1083, 2010, doi : j.resconrec.2010.02.010
- Valero Alicia, Valero Antonio, Martinez A. (2010), « Inventory of the exergy resources on earth including its mineral capital », *Energy*, 35, pp. 989-995, 2010, doi : 10.1016/j.energy.2009.06.036
- Valero Antonio, Valero Alicia (2010), « Exergoecology: A thermodynamic approach for accounting the Earth's mineral capital. The case of bauxite-aluminium and limestone-lime chains », *Energy*, 35, pp. 229-238, 2010, doi : 10.1016/j.energy.2009.09.013

Weißbach D., Ruprecht G., Huke A., Czerski K., Gottlieb S., Hussein A. (2013), « Energy intensities, EROIs (energy returned on invested) and energy payback times of electricity generating power plants », *Energy*, 52, pp. 210-221, doi : 10.1016/j.energy.2013.01.29

Zuser A., Rechberger H. (2011), « Considerations of resource availability in technology development strategies : the case study of photovoltaics », *Resources, Conservation and Recycling*, 56, pp. 56-65, September 2011, doi : 10.1016/j.resconrec.2011.09.004

11 Annexes

11.1 Annexe 1 : analyse des études

Titre	Auteur-date	Méthodo	Période étudiée	Sources én. étudiées	Métaux étudiés	CCL* SPER** critiques	CCL métaux critiques	Autres commentaires et conclusions
Dynamic analysis of the global metal flows and stocks in electricity generation technologies	Elshkaki et Graedel, 2013	Simulations sur base de deux scénarios : Market First et Policy First	1980-2050	10 principaux (éolien, pv, nucléaire, ...)	Tous	PV toutes catégories Éolien pas critique	In, Dy, Ag, Te	<p>Posent des hypothèses d'évolution future pour la demande d'électricité (intensité et conso par secteur, par pays, ...)</p> <p>Posent des hypothèses sur la répartition onshore/offshore (pour l'éolien) ou selon les différents types de PV</p> <p>Obtiennent des graphiques des productions et des parts de chaque mode de production pour chaque scénario</p> <p>Il peut y avoir d'énormes différences pour certains métaux entre les scénarios</p> <p>Discutent de différentes hypothèses : avancées techno, recyclage, etc</p> <p>Approvisionnement secondaire jouera un rôle sur le long terme</p>

Titre	Auteur-date	Méthodo	Période étudiée	Sources én. étudiées	Métaux étudiés	CCL* SPER** critiques	CCL métaux critiques	Autres commentaires et conclusions
The impact of copper scarcity on the efficiency of 2050 global renewable energy scenarios	Harmse n et al., 2012	Construction de courbes de production de cuivre et d'énergie, puis étude de 4 (dont 1 de référence) scénarios variant selon demande en énergie, électrification et part intermittence	2010-2050	Principalement éolien et réseau électrique	Cuivre	Éolien pas critique : EROI éolien baisse de 3%	Cu → GER en hausse d'un facteur 2-7	Focus sur baisse ore grade Impact énergie extraction cuivre sur EROI de l'éolien « the energy requirement for mineral production is likely to increase, making the method a potentially more meaningful scarcity indicator »
Metal requirements of low-carbon power generation	Kleijn et al., 2011	Étude de 3 mixes énergétiques : CCS, low-carbon et IEA BLUE Map, réduction de 80-90% des émissions de CO2 Calcul impact métaux et CO2 des mixes	Statique (2050 pour Blue Map)	Tous les principaux pour électricité (éoliens, nucléaire, pv, hydraulique, ...)	Nombreux grands métaux (Fe, Al, Cu, Ag, ...), pas de terres rares	PV et éolien : grande hausse demande métaux	Ni (CCS), Mo, Ag (PV)	Réseau : requiert plus d'Al et Cu Remarques : chiffres livrés par mode de production ou par mix (interprétation pas évidente) Manque un peu de détails sur l'origine des métaux requis dans tel ou tel mix

Titre	Auteur-date	Méthodo	Période étudiée	Sources én. étudiées	Métaux étudiés	CCL* SPER** critiques	CCL métaux critiques	Autres commentaires et conclusions
Considerations of resource availability in technology development strategies : the case study of photovoltaics	Zuser et Rechberger, 2011	Étude pour 3 scénarios : Pessimiste, Neutre et Optimiste (par rapport au progrès technique, à l'irradiation moyenne)	2005-2040	PV (c-Si, a-Si, CdTe, CIGS)	Cités dans étude : Cd, Te, Si, Ag, In, Ga,	c-Si (pour Si et Ag) CdTe et CIGS (limitation ressources > marché, production, réserves)	Ag, Te, In, Si (purifié)	Concernant le Si, il est très abondant dans la croûte terrestre, mais capacité de purification limitées.
Dysprosium, the balance problem, and wind power technology	Elshkaki et Graedel, 2014	Demande en métal de l'éolien basé sur Policy First. Supply en Dy basé sur 3 scénarios.	2015-2050	Éolien	Dy, Nd et autres REEs	NA	NA	Partant d'une certaine production de Nd, l'étude analyse les surproductions requises des autres terres rares. Étude assez différente des autres du tableau, un peu trop « scénarisée »
Materials availability for thin film (TF) PV technologies development : A real concern ?	Candeliere et al., 2011	Analyse par différents biais : revue de la littérature, réserves, shift technologique, marché et prix, ...	Statique (max 2050 dans revue études prospectives)	PV thin film (CdTe et CIGS)	Te, In	L'approvisionnement en Te et In n'est pas considérés comme critique (hormis études avec hypothèses très conservatrices pour le PV CdTe et CIGS. Par contre, impact possible sur le prix → impact sur déploiement de ces technos.	-	-

Titre	Auteur-date	Méthodo	Période étudiée	Sources én. étudiées	Métaux étudiés	CCL* SPER** critiques	CCL métaux critiques	Autres commentaires et conclusions
Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling	Habib et Wenzel, 2014	4 Scénarios pour la demande en Nd et Dy comparés avec le supply BAU : Baseline, Blue Map, Blue hi Ren, 100% REN ; analyse géologique, géopolitique	2000-2050 (2100)	Éolien (+ véhicule électrique)	Dy, Nd	NA Pas de contrainte géologique à moyen terme Contrainte principalement de cadence d'ouverture de mines + risque géopolitique (surtout Dy) due à la concentration		Rôle du recyclage minime à moyen terme, essentiel par après, pour répondre à la demande tout en diminuant le risque géopolitique.
Sustainability of photovoltaics : The case for thin-film solar cells	Fthenakis, 2009	Étude des productions des métaux hôtes (Cu pour Te et Se, Zn pour In et Ge), des productions en propre possibles, du recyclage. Aspects économiques. Impacts environnementaux.	2005-2100	PV thin film (CdTe et CIGS)	Te, In, Ge, Se, Cd	Chacune des technos étudiées peut soutenir une croissance de 30-40% de la demande jusque 2020.	Limités par la production des métaux-hôtes.	Des améliorations techniques aideraient le développement : couches plus minces, meilleure récupération à la production primaire, meilleur recyclage.

Titre	Auteur-date	Méthodo	Période étudiée	Sources én. étudiées	Métaux étudiés	CCL* SPER** critiques	CCL métaux critiques	Autres commentaires et conclusions
Assessing the dynamic material criticality of infrastructure transitions : A case of low carbon electricity	Roelich et al., 2014	Étude de criticité de façon dynamique : le risque de rupture d'approvisionnement est calculé sur la période d'étude à partir des scénarios Core et Renewables du DECC, pour l'éolien. Prise en compte de contraintes environnementales , de la contrainte compagnon-hôte, de l'accès, ...	2012-2050	Éolien	Nd	Sur la période d'étude, on a une légère baisse du risque d'approvisionnement en Nd, laquelle est plus que contrebalancée par une hausse de l'exposition au risque du fait d'une plus grande dépendance aux éoliennes « direct drive »		Le risque qu'ils évaluent est un risque relatif. Il est surtout utile comme outil de comparaison entre différents choix de politiques énergétiques différents.

Titre	Auteur-date	Méthodo	Période étudiée	Sources én. étudiées	Métaux étudiés	CCL* SPER** critiques	CCL métaux critiques	Autres commentaires et conclusions
Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies ?	Hoender daal et al., 2012	Combinaison de deux hypothèses pour la capacité éolienne installée, avec deux hypothèses pour la part de turbines « direct drive », ce qui donne 4 scénarios. Analyse de la demande d'autres marchés. Analyse production future via nouveaux projets.	2008-2050	Éolien	Dy	À court terme, la demande excède l'offre, à long terme (2050) les réserves sont suffisantes. La contrainte est donc la capacité de production et non la géologie.		

* CCL = conclusions

** SPER = Système de Production d'Énergie Renouvelable

11.2 Annexe 2 : calculs étude quantitative

Tableau 1 : Réserves et production Te-In-Cu-Nd-Dy-Terres rares

Métal	Réserves [t]	Source	Production annuelle [t]	Source	R/P [an]
Tellurium – Te	24000	[1], page 163 Chiffres 2014	450	[3] Chiffres 2011	53
Indium – In	12400	[2], page 3 Chiffres 2010	774	[4] Chiffres 2013	16
Cuivre – Cu	700.10 ⁶	[1], page 49 Chiffres 2014	18,7.10 ⁶	[1], page 49 Chiffres 2014	37
Néodyme – Nd	12.10 ⁶	[5], page 266 Chiffres 2009	19000	[5], page 266 Chiffres 2009	632
Dysprosium – Dy	1,7.10 ⁶	[5], page 266 Chiffres 2009	1500	[5], page 266 Chiffres 2009	1133
Terres rares	130.10 ⁶	[1], page 129 Chiffres 2014	0,11.10 ⁶	[1], page 129 Chiffres 2014	1182

[1] : U.S. Geological Survey et U.S. Department of the Interior (2015)

[2] : Polinares (2012)

[3] : Institute for Energy and Transport (IET) (2016a), chiffres de l'International Copper Study Group (ICSG)

[4] : Institute for Energy and Transport (IET) (2016b), chiffres de l'USGS

[5] : Elshkaki et Graedel (2013)

Tableau 2 : Production Nd-Dy-Te-In

Sources :	Europa.eu (compilation diverses sources), chiffres 2012		Europa.eu (compilation diverses sources), chiffres 2012		ISGS, chiffres 2011		USGS, chiffres 2013	
	Nd		Dy		Te		In	
	pays	% prod	pays	% prod	pays	% prod	pays	% prod
1	Chine	91	Chine	99	Chine	18	Chine	53
2	USA	4	Australie	1	Japon	14	Corée	19
3	Australie	3	USA	0	Belgique	13	Japon	9
4	Inde	1	Inde	0	Allemagne	8	Canada	8
5	Russie	1	Russie	0	Canada	6	Belgique	4
6					Russie	6	Russie	2
7					Kazakhstan	4	Pérou	1
8					Philippines	4	Autres	3
9					Corée S.	4		
10					Suède/Finland	4		
11					Indonésie	3		
12					Inde	3		
autres		0		0		12		0
TOTAL		100		100		99		99
HHI		8308		9802		919		3444

Remarque : pour le calcul du HHI quand le pourcentage de la catégorie « autres » est non nul, on a simplement effectué une approximation consistant à dire que tout ce qui est « autre » est à 1% de part de marché. Donc, si « autres » est à 10%, on considère qu'il y a 10 pays à 1% de part de marché, ce qui revient à ajouter 10 points au HHI ($10 * 1^2$).

Exemple de calcul : HHI pour la production de Te = $18^2+14^2+13^2+8^2+6^2+6^2+4^2+4^2+4^2+4^2+3^2+3^2+12 = 919$

Tableau 3 : Réserves Nd-Dy-Te-In

Sources :	Habib et Wenzel (2014, page 349)**		Habib et Wenzel (2014, page 349)**		Candelise et al. (2012, page 4979) (USGS 2010)		Candelise et al. (2012, page 4979) (USGS 2008)	
	Nd		Dy		Te*		In	
	pays	% réserves	pays	% réserves	pays	% réserves	pays	% réserves
1	Chine	53	Chine	72	Pérou	38	Chine	75
2	CIS	15	CIS	11	USA	7	Pérou	3
3	USA	10	USA	7	Canada	2	USA	3
4	Inde	2	Australie	1			Russie	1
5	Australie	2					Canada	1
autres		18		9		53		17
TOTAL		100		100		100		100
HHI		3160		5364		1550		5662

* remarque : chiffres incomplets

** compilation de sources, chiffres 2011

Tableau 4 : Cuivre

Source : USGS, mcs-2016- coppe.pdf	Cuivre			
	Production 2015		Réserves 2015	
	[kt]	[%]	[kt]	[%]
Chili	5700	30	210000	29
Chine	1750	9	30000	4
Pérou	1600	9	82000	11
USA	1250	7	33000	5
Congo (Kinshasa)	990	5	20000	3
Australie	960	5	88800	12
Russie	740	4	30000	4
Canada	695	4	11000	2
Zambie	600	3	20000	3
Mexique	550	3	46000	6
Autres	3900	21	150000	21
Total monde (arrondi)	18700		720000	
Total top 10	14835	79	570800	79
HHI		1446		1455